

ヒートポンプ給湯機のダイナミクスと 電気・熱・水の連携を考慮した 需要側エネルギーシステムの 技術選択・設備容量計画・運転計画の同時最適化 Optimal Joint Planning of Technology Selection, Capacities Planning, and Operation Scheduling for Demand-Side Energy System considering Dynamics of Heat Pump Water Heater and Linkage of Electricity, Heat, and Water

勝崎友裕*・重信颯人**・高橋明子***
Tomohiro Katsuzaki Ryuto Shigenobu Akiko Takahashi
伊藤雅一**・鈴木遥介***・寺崎寛章**
Masakazu Ito Yosuke Suzuki Hiroaki Terasaki

Abstract

Heat pump water heaters (HPWHs) are attracting considerable attention as a pivotal renewable energy technology for achieving carbon neutrality in commercial and residential sectors. This study proposes an optimization model that comprehensively incorporates the dynamics of HPWHs and their interaction with electricity, heat, and water. Formulated as a joint optimization problem of technology selection, capacities planning, and operation scheduling, the model enables a potential evaluation of an HPWH-based energy system. Numerical simulations, conducted for a single household in Fukui City over five days during the winter season, reveal that introducing a photovoltaic system, an HPWH, and a gas water heater (GWH) can minimize CO₂ emissions. In this configuration, the optimal HPWH capacity is 11.7 kW, leading to a 41.4% reduction in CO₂ emissions compared to an HPWH-only scenario. However, implementing this configuration would require reducing the current cost of renewable energy equipment by approximately 1/6.5. Furthermore, the derivation of a solution that combines HPWH and GWH is thought to derive from considering time variation in the coefficient of performance (COP), highlighting the importance of considering dynamics in HPWH modeling.

Key words : Photovoltaic System, Gas Water Heater, Coefficient of Performance (COP), Energy Management System (EMS), Mixed-Integer Linear Programming (MILP)

1. はじめに

近年、日本ではカーボンニュートラル(CN)の実現¹⁾に向けてグリーントランスフォーメーション(GX)という概念が提唱され²⁾、再生可能エネルギー(RE)の利用が促進されている³⁾。日本の2022年度の最終エネルギー消費のうち、業務他部門と家庭部門は全体の31.2%を占めており⁴⁾、CN達成にはこれらの部門でのGX化が肝要である。

特に、2021年度のデータによれば、エネルギー消費量のうち給湯用途が、業務部門では11.7%(床面積あたり換算)、家庭部門では27.0%(世帯あたり換算)を占める⁵⁾。この給湯用途の消費量をエネルギー源別の内訳で見ると、化石燃料(ガス、石油、石炭)の利用が、業務部門では86.5%、家庭部門では85.1%を占めており、ヒートポンプ給湯機(HPWH)

や太陽熱集熱器(STC)などによる電力やRE熱源の利用は約14%に留まる⁶⁾。

このように、業務他部門と家庭部門のGX化を通じてCNの実現を目指す上で、給湯用途でのRE由来の電源や熱源の利用拡大には更なる可能性が残されている。

他方、持続可能なエネルギーシステムへの世界的な移行に際し、ヒートポンプ(HP)技術の重要性は高い⁷⁾。日本が世界で初めて製品化した家庭用自然冷媒CO₂HPWHのエコキュートは2023年8月に累計出荷台数900万台を突破し、今後も導入が拡大することが見込まれている⁸⁾。欧州では、2022年3月にロシア産化石燃料依存からの脱却を目指す政策REPowerEUが発表され、向こう5年間でHP機器を1000万台導入する数値目標が掲げられている⁹⁾。同年11月には世界規模でHP技術に特化したものとしては初の報告書The Future of Heat Pumpsが発行され¹⁰⁾、HP技術は世界的な盛り上がりを見せている。

特に、同報告書では、HP技術はクリーンな暖房技術としてのみならず、エネルギーセキュリティ、エネルギー貧

Corresponding author; Tomohiro Katsuzaki,

E-mail: katsuzaki.tomohiro@pws.fuee.u-fukui.ac.jp

* 福井大学大学院工学研究科総合創成工学専攻

** 福井大学学術研究院工学系部門

*** 福井大学学術研究院基盤部門カーボンニュートラル推進本部
〒910-8507 福井市文京3-9-1

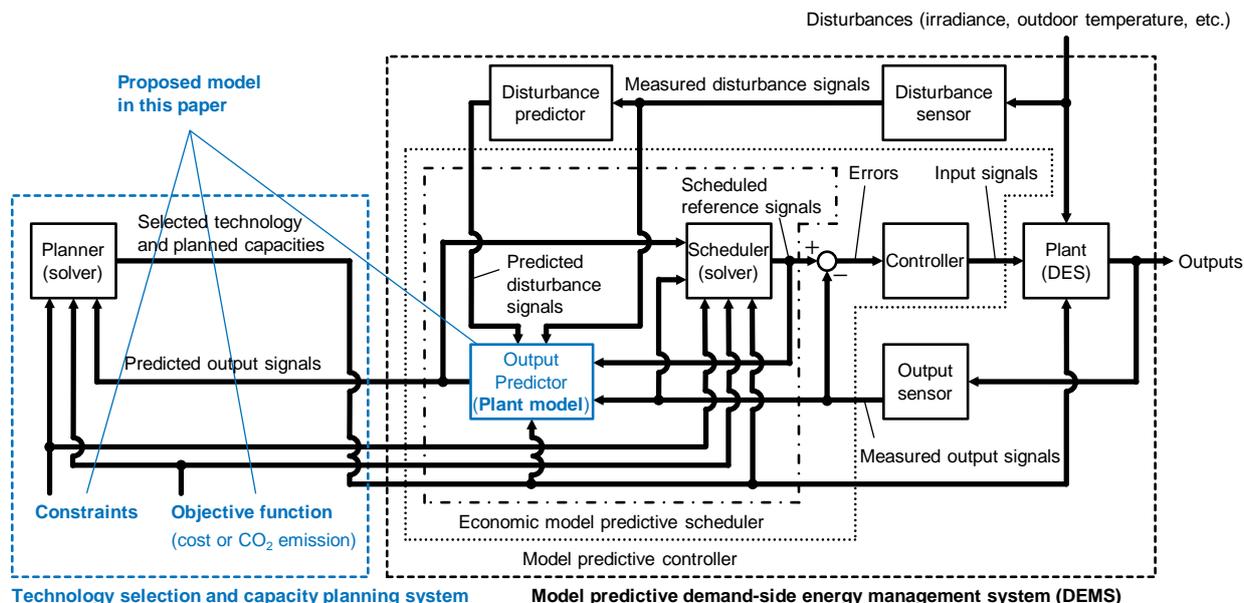


図1 需要側エネルギーシステムの運用を考慮した技術選択と設備容量計画の最適化を行うためのシステムアーキテクチャ

困などのコスト面の課題も含め、3つのE(安定供給、経済効率性、環境適合)のすべての面でその役割が期待される技術と位置づけられている¹¹⁾。これは、日本のエネルギー政策の基本概念にも合致し¹²⁾、持続可能な社会の実現へ向けて国内外問わずHP技術の導入と利用が不可欠であることが認識されていることが分かる。

また、HP技術の普及活動および技術課題に対する国際共同研究の取り組みは国際エネルギー機関(IEA)のHP技術協力プログラム(HPT TCP)に主導されている¹³⁾。同プログラムの2024年現在の進行中プロジェクト(Annex)としては、最適なHP機器の設計と運用(Annex 66)¹⁴⁾や循環型経済におけるHP技術(Annex 65)¹⁵⁾がある。これらより、直近のHP技術の課題としては、HP機器を含むエネルギーシステムにおける技術選択、設備容量計画、運用の全体最適化技術の開発、ライフサイクルにかかる総コストや総CO₂排出量の評価技術の開発であることが分かる。

以上を踏まえ、本稿では、業務他部門における小規模な事業所1棟やテナント1区間、家庭部門における住宅1軒などの需要側エネルギーシステム(DES)を対象とする。また、本稿では、小規模なビル用エネルギー管理システム(BEMS)の一部や家庭用エネルギー管理システム(HEMS)の総称を需要側エネルギー管理システム(DEMS)と呼び、DESの運用はDEMSによって行われることを想定する。そのうえで、DESにおけるHPWHを中心とする多様な機器の技術選択と設備容量計画を、DEMSによって行われるDESの運転計画を考慮した上で、総コストや総CO₂排出量を評価指標とした全体最適化により立案する数理モデルを提案する。なお、本モデルは筆者らの先行研究でのモデル¹⁶⁾やそれらに関連する千住らのモデル¹⁷⁾⁻²⁴⁾を基にしており、必要に応じ

てこれらを参照されたい。

本稿の以降の構成は次の通りである。2.では、本稿で提案するモデルの位置づけと既存研究との比較を行う。3.では、構築したDESのプラントモデルと制約について述べる。4.では、3.で述べたモデルと制約を基に最適化問題(最適化モデル)を定式化する。5.では、数値実験の条件と結果を示し、それに対する考察を行う。最後に、6.では、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2. 提案するモデルの位置づけと既存の研究との比較

2.1 想定するアーキテクチャとモデルの位置づけ

本稿で想定するDESの運用を考慮した技術選択と設備容量計画の最適化を行うためのシステムアーキテクチャを図1に示す。本システムは技術選択と設備容量計画の最適化システムと運用の最適化を行うモデル予測型DEMSが連系されたシステムを示し、技術選択、設備容量計画、運転計画は各計画器(図1のPlannerとSchedulerに相当)によって同時最適化が行われることを想定する。本稿で提案するモデルは図1の青字部分に相当するDESの簡略化プラントモデル(SPM)とそれを基にした技術選択(TS)、設備容量計画(CP)、運転計画(OS)の同時最適化問題(JOP)である。以後、本稿では、前者をSPM-TSCPOS-DES、後者をJOP-TSCPOS-DESと呼ぶ。なお、本稿執筆時時点では図1の青字部分以外のシステムの構築は行っておらず、運転計画においてもモデル予測型(逐次予測、逐次計画)ではない単一の決定論的計画のみを扱う点に注意されたい。運用(モデル予測型の計画を基にしたモデル予測制御)を含む包括的なシステムの構築と有効性検証は今後の課題とする。

2.2 提案するモデルと既存のモデルの比較

多様な機器を含む DES は主にハイブリッドシステム²⁵⁾としてモデル化され、多くの場合は計算機利用を前提とするため、離散時間系の非線形時変システムとして扱われる。モデル内の非線形式をそのまま最適化問題に組み込む場合、その問題は混合整数非線形計画(MINLP)問題となる。

MINLP 問題の解法としては数理計画法などの厳密解法に加え、メタヒューリスティクスや人工知能を利用した近似解法が広く用いられている。これらの手法のうち、最適解が保証される点、Big M²⁶⁾やインジケータ変数²⁷⁾などを用いた線形近似や式変形の手法が確立されている点、近年の計算機やソルバーの性能が向上している点などを踏まえ、本稿では数理計画法の利用を選択し、線形近似や式変形を用いて混合整数線形計画(MILP)問題として定式化を行う。

DES の技術選択、設備容量計画、運転計画を MILP 問題に組み込む場合、計算時間を現実的な範囲内に収めるために、基となる DES のプラントモデルを簡略化することが一般的である。既存のモデル^{16)-24), 28)-69)}では、HPWH のダイナミクスが過度に単純化されるか、場合によっては無視されることが多い。これは HP 機器がダイナミクスの考慮の必要のない定格一定運転で高効率を示すとされている⁷⁰⁾ことが一因と考えられる。ここで、ダイナミクスとは、現代制御工学などの分野では、狭義に状態方程式または差分方程式として表される「状態量の時間変化」を指すことが多い。本稿ではより広義な意味として、状態量の時間変化に加えて入力と出力の時間変化をダイナミクスと呼ぶ。

しかし、このようなダイナミクスの単純化または無視には問題がある。DES 全体の最適化を考慮する場合、HPWH 単体の効率ではなく、システム全体の効率が向上する運用が求められる。この場合の運用は必ずしも定格一定運転であるとは限らない。特に、HPWH が部分負荷運転を行う場合、ダイナミクスの考慮の欠如はモデルの精度低下を招きかねない。

さらに、最近では、HPWH はデマンドレスポンス(DR) ready な機器としても注目されている⁷¹⁾。柔軟な DR を実現するためには、定格一定運転に加え、部分負荷運転も精緻に考慮したシステム設計が望ましい。DR ready を視野に入れたモデル化を行うことで、HPWH の運用は社会全体の最適化に寄与し、エネルギー利用の新たな可能性を引き出すことが期待される。

他方、DES のモデル化においては、電気、熱、水といったエネルギーセクターの相互連携(セクターカップリング)が重要となる。特に、電気と熱の連携を担う HP ユニット(HPU)と、熱と水の連携を担う貯湯槽(HWT)で構成される HPWH は、DES におけるエネルギーフローの要としての役割を果たす。

以上を踏まえ、本稿では、HPWH のダイナミクスと電気・熱・水の連携を考慮した SPM-TSCPOS-DES を構築し、それを基にした JOP-TSCPOS-DES を定式化する。HPWH のダイナミクスとして、入出力である入力電力、出力熱力、状態量である貯湯温、貯湯量、蓄熱量、沸き上げ目標温度、成績係数(COP)のダイナミクスをそれぞれ考慮する。また、エネルギー・資源(DES 内で需要家が使用するエネルギー形態)として電気、熱、水、および自動車の移動に使用する移動エネルギーをそれぞれ考慮する。

本稿で提案する JOP-TSCPOS-DES(最適化モデル)と既存の HPWH を含むエネルギーシステムの最適化モデル^{23), 46)-69)}の比較を表 1 に示す。なお、表 1 では、レビューの少ない国内グループからの文献についてまとめている。海外グループからの文献における比較に関しては既存のレビューである文献⁷²⁾などを参照されたい。表 1 に示すように、本モデルのように HPWH のダイナミクスと電気・熱・水の連携を詳細に考慮した最適化モデルは筆者の知る限りでは存在しない。これは文献⁷³⁾などで示されている文献においても同様であり、これらの詳細化が本研究の新規性となる。

3. 需要側エネルギーシステムのプラントモデルと制約

JOP-TSCPOS-DES の定式化を行うためには、プラントモデルが必要である。プラントモデルの構築には、プラントのシステム構成とエネルギーフローを分析し、システムの操作量(入力信号)と制御量(出力信号)を特定した上で、最適化問題としての定式化と求解に適するようにモデルを簡略化することが重要である。本研究では、DES の技術選択と設備容量計画と運転計画(TSCPOS)を含む設計のために簡略化されたプラントモデル(SPM-TSCPOS-DES)を構築した。本章では、構築した SPM-TSCPOS-DES と制約について述べる。

3.1 想定するシステム構成

本稿で想定する DES の構成機器一覧を下記に、想定する DES のシステム構成の模式図を図 2 に示す。DES は 5 個のサブシステムと 31 個の機器から構成される。この構成は既製品の住宅用 V2H 蓄電システム「eneplat」⁷³⁾の構成を参考にした。

(1) 太陽光発電利用システム(PVUS)

- ・太陽光発電アレイ(PVA)
- ・ハイブリッドパワーコンディショナー(HPC)
- ・蓄電池用充放電器(DC/DC コンバータ)(BCD)
- ・バッテリー式電気自動車用充放電器(VCD)
- ・蓄電池(BAT)
- ・バッテリー式電気自動車(BEV)
- ・電力切替ユニット(PSU)
- ・スマート分電盤(SDB)

表1 提案する最適化モデルと既存のヒートポンプ給湯機を含むエネルギーシステムの最適化モデルの比較

Ref.	Authors	Year	Plant	Obj.	Solving methods			Considerations										
					TS	CP	OS	Dynamics of heat pump water heater						Energy types				
								Input ele. power	Output thermal power	Stored water temp.	Stored water volume	Stored thermal energy	target heating temp.	COP	Ele.	Heat	Water	Mobi.
46)	M. Asari, et al.	2009	DS	UC min.	×	×	GA	×	×	△ [†]	△ [†]	⊙	×	×	⊙	⊙	△ [†]	×
47)	Y. Hanai, et al.	2011	DS	LF max.	×	×	ES, OPF	△ [†]	△ [†]	?	?	?	×	×	⊙	⊙	?	○
48)	T. Ikegami, et al.	2011	HES	UC min.	ES	×	MILP	⊙	⊙	△ [†]	△ [†]	⊙	△ [†]	○	⊙	⊙	△ [†]	×
49)	T. Oda, et al.	2013	TSys.	TC min.	LP	LP	LP	⊙	⊙	?	?	⊙	×	×	⊙	⊙	?	×
50)	T. Masuta, et al.	2013	TSys.	OC min.	×	Tabu.S	Tabu.S	△ [†]	△ [†]	△ [†]	△ [†]	×	×	×	⊙	⊙	△ [†]	○
51)	Y. Tomita, et al.	2013	CES	MO min.	×	×	Tabu.S	△ [†]	△ [†]	△ [†]	△ [†]	⊙	×	?	⊙	⊙	△ [†]	×
52)	K. Tokoro, et al.	2014	DES	TC min.	PSO	PSO	PSO	⊙	⊙	⊙	×	⊙	×	⊙	⊙	⊙	⊙	×
53)	T. Miyamoto, et al.	2016	DES	UC min.	×	ES	OA	△ [†]	△ [†]	?	?	?	×	×	⊙	⊙	?	×
23)	Y. Miyazato, et al.	2017	HES	MO min.	NSGA-II	NSGA-II	NSGA-II	△ [†]	△ [†]	⊙	○	⊙	×	×	⊙	⊙	△ [†]	○
54)	I. Nawata, et al.	2017	HES	UC min.	×	×	MILP	△ [†]	△ [†]	⊙	⊙	⊙	△ [†]	⊙	⊙	⊙	⊙	○
55)	Y. Iwafune, et al.	2017	DES	UC min.	ES	ES	MILP	△ [†]	△ [†]	△ [†]	△ [†]	⊙	×	⊙	⊙	⊙	△ [†]	×
56)	M. Takahashi, et al.	2017	TSys.	OC min.	×	×	MILP	⊙	⊙	×	×	×	×	?	⊙	⊙	?	×
57)	K. Kondo, et al.	2019	DES	RE min.	×	×	MILP	△ [†]	△ [†]	△ [†]	⊙	△ [†]	×	△ [†]	⊙	△ [†]	⊙	×
58)	T. Wakui, et al.	2019	BES	UC min.	×	×	MILP	△ [†]	△ [†]	⊙	△ [†]	⊙	×	○	⊙	⊙	⊙	×
59)	S. Katayama, et al.	2020	BES	UCO ₂ min.	MILP	MILP	MILP	⊙	⊙	?	?	⊙	×	○	⊙	⊙	?	×
60)	H. Omori, et al.	2020	TSys.	UC min.	×	ES	MILP	⊙	⊙	△ [†]	△ [†]	⊙	×	○	⊙	⊙	△ [†]	×
61)	S. Kimata, et al.	2020	BES	UC min.	×	×	MILP	△ [†]	△ [†]	×	×	⊙	×	×	⊙	⊙	×	×
62)	K. Nagano, et al.	2021	HES	UC min.	ES	ES	MILP	⊙	⊙	△ [†]	△ [†]	⊙	×	×	⊙	⊙	△ [†]	×
63)	A. Ishikawa, et al.	2022	HES	UC min.	×	×	GA	△ [†]	△ [†]	△ [†]	△ [†]	⊙	×	×	⊙	⊙	△ [†]	×
64)	R. Kasahara, et al.	2022	DS	UC min. or RPF max.	ES	ES	LP	⊙	⊙	△ [†]	△ [†]	⊙	×	×	⊙	⊙	△ [†]	×
65)	M. Saito, et al.	2022	BES	UC min.	×	×	MILP	⊙	⊙	△ [†]	△ [†]	⊙	×	?	⊙	⊙	△ [†]	×
66)	Y. Kida, et al.	2023	CES	TC min.	LP	LP	LP	⊙	⊙	△ [†]	△ [†]	⊙	×	×	⊙	⊙	△ [†]	○
67)	Y. Tanahashi, et al.	2023	BES	TC min.	PSO	PSO	MILP	⊙	⊙	⊙	?	⊙	×	⊙	⊙	⊙	△ [†]	×
68)	S. Yamamoto, et al.	2024	BES	UC min.	×	×	MILP	△ [†]	△ [†]	⊙	×	⊙	△ [†]	×	⊙	⊙	△ [†]	×
69)	T. Higashitani, et al.	2024	HES	TC min.	ES	ES	MILP	△ [†]	△ [†]	×	×	⊙	×	○	⊙	⊙	×	○
This study	T. Katsuzaki, et al.	2025	DES	TC min. or TCO ₂ min.	MILP	MILP	MILP	⊙	⊙	⊙	○	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○

Ref.: reference, Obj.: objectives, TS: technology selection, CP: capacities planning, OS: operation scheduling, ele: electricity, temp.: temperature, COP: coefficient of performance, Mobi.: mobility, DS: distribution system, HES: home energy system, TSys.: transmission system, CES: community energy system, BES: building energy system, DES: demand-side energy system, a general term for HES and part of BES
 UC: utility cost, LF: load factor, OC: operating cost, TC: total cost (UC or OC, and equipment cost), MO: multi-objective, RE: error with reference trajectory
 UCO₂: CO₂ emission amount by using utility, RPF: reverse power flow, TCO₂: total CO₂ emission amount (UCO₂ and equipment CO₂ emission amount),
 GA: genetic algorithm, ES: exhaustive search including manual model switching, OPF: optimal power flow (algorithm unknown),
 MILP: mixed-integer linear programming, LP: linear programming, Tabu.S: tabu search, PSO: particle swarm optimization, OA: original algorithm,
 NSGA-II: non-dominated sorting genetic algorithm II⁷⁴,
 ⊙: considered as optimization variables, ○: considered as constants, △[†]: not directly considered,
 △[†]: considered as only a few patterns, modes, or rules, ×: not considered, ?: unknown whether considered or not.

- (2) 太陽熱集熱利用システム(STCUS)
 - ・ガス給湯機(GWH)
 - ・貯湯槽(HWT)
 - ・太陽熱集熱器(STC)
 - ・空気熱ヒートポンプユニット(HPU)
- (3) 需要側負荷システム(DLS)

- ・交流電力負荷(AEL)
- ・給湯負荷(HWL)
- ・水道冷水負荷(CWL)
- ・BEV 走行時電力負荷(REL)
- ・ガソリンエンジン車(GEV)
- ・GEV 走行時ガソリン負荷(RGL)

3.3 変数の定義

本稿では、決定変数(人間や制御器が操作でき、意思決定を行いたいもの)、補助変数(他の決定変数の値の決定により値が一意に決定される変数のこと)⁷⁵⁾、パラメータ(媒介変数と呼ばれ、効率や CO₂ 排出係数などの機器を特徴付けるもの)、外生変数(気温や日射強度などのモデルの外から与えられるもの)の総称を単に変数と呼ぶ。本稿では、各変数の記号として**決定変数は赤字**、**補助変数は青字**、**パラメータと外生変数は黒字**、**最適化後に求める値は紫字**で表す。

計算機による JOP-TSCPOS-DES の求解を想定するため、本稿では SPM-TSCPOS-DES を離散時間系の非線形時変システムとして扱う。ゆえに、本稿では主に連続時間値 X_t の代わりに離散時間値 X_k を用いて変数を表記する。

SPM-TSCPOS-DES と制約で使用する変数の一覧を本稿での登場順に下記に示す。

\hat{H}_k	k の予測日射強度[kW/m ²]
H_{PVA}^{test}	標準試験条件 ⁷⁶⁾ の日射強度[kW/m ²]
α_{PVA}	PVA の温度係数[°C]
\hat{T}_k	k の予測外気温[°C]
T_{PVA}^{test}	標準試験条件 ⁷⁶⁾ の PVA の温度[°C]
$\hat{f}_{PVA,k}$	容量 1 kW あたりの PVA の k の予測発電電力を 求めるための補助関数の値[p.u.]
$\hat{p}_{PVA,k}$	容量 1 kW あたりの PVA の k の予測発電電力[p.u.]
$\hat{p}_{PVA,k}^{cur}$	容量 1 kW あたりの PVA の k の予測抑制電力[p.u.] (容量を超えるため発電できないとした電力)
C_{PVA}	1 枚あたりの PV モジュールの容量[kW/item]
N_e	e の枚数[item] $\forall e \in \{PVA, STC\}$
C_e	e の容量[kW or kWh or L] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv} \setminus \{STC, HPU\}$
$P_{PVA,k}$	PVA の k の発電電力[kW]
$P_{PVA,k}^{cur}$	PVA の k の抑制電力[kW]
$P_{HPC,k}^{P2H}$	HPC の k の PVA から PSU への出力電力[kW]
$P_{HPC,k}^{P2B}$	HPC の k の PVA から BCD への出力電力[kW]
$P_{HPC,k}^{P2V}$	HPC の k の PVA から VCD への出力電力[kW]
$P_{HPC,k}^{cur}$	HPC の k の抑制電力[kW](HPC の制御により 出力しなかった PVA の発電電力)
$P_{HPC,k}^{B2H}$	HPC の k の BCD から PSU への充放電電力[kW] (正値は PSU への放電, 負値は PSU からの充電)
$P_{HPC,k}^{B2V}$	HPC の k の BCD から VCD への充放電電力[kW] (正値は VCD への放電, 負値は VCD からの充電)
$P_{BCD,k}$	BCD の k の HPC への充放電電力[kW] (正値は HPC への放電, 負値は HPC からの充電)
$P_{HPC,k}^{V2H}$	HPC の k の VCD から PSU への充放電電力[kW] (正値は PSU への放電, 負値は PSU からの充電)
$P_{VCD,k}$	VCD の k の HPC への充放電電力[kW] (正値は HPC への放電, 負値は HPC からの充電)
$f_{HPC,k}$	HPC の k の PSU への充放電電力を

	求めるための補助関数の値[kW] (正値は PSU への放電, 負値は PSU からの充電)
η_{HPC}^{in}	HPC の交流(AC)から直流(DC)への変換効率[-]
η_{HPC}^{out}	HPC の DC から AC への変換効率[-]
$\eta_{HPC,k}$	HPC の k の変換効率の切替関数 ⁷⁷⁾ の値[-]
$P_{HPC,k}$	HPC の k の PSU への充放電電力[kW] (正値は PSU への放電, 負値は PSU からの充電)
η_e^{in}	e の HPC から e' への変換効率[-] $\forall (e, e') \in \{(BCD, BAT), (VCD, BEV)\}$
η_e^{out}	e の e' から HPC への変換効率[-] $\forall (e, e') \in \{(BCD, BAT), (VCD, BEV)\}$
$\eta_{e,k}$	e の k の変換効率の切替関数 ⁷⁷⁾ の値[-] $\forall e \in \{BCD, VCD\}$
$P_{e',k}$	e' の k の e への充放電電力[kW] $\forall (e', e) \in \{(BAT, BCD), (BEV, VCD)\}$ (正値は e への放電, 負値は e からの充電)
\hat{v}_k^{car}	自動車の k の予測走行速度[km/hour]
η_{REL}	BEV の電費(交流電力量消費率の逆数)[km/kWh]
η_{RGL}	GEV の燃費[km/L]
$\hat{P}_{REL,k}$	REL の k の予測走行需要電力[kW]
$\hat{v}_{RGL,k}$	RGL の k の 予測走行需要ガソリン使用速度[L/hour]
$\eta_{e'}^{in}$	e' の電気エネルギーから化学エネルギーへの変換効率[-] $\forall e \in \{BAT, BEV\}$
$\eta_{e'}^{out}$	e' の化学エネルギーから電気エネルギーへの変換効率[-] $\forall e \in \{BAT, BEV\}$
$\eta_{e',k}$	e' の k の変換効率の切替関数 ⁷⁷⁾ の値[-] $\forall e' \in \{BAT, BEV\}$
$f_{e',k}$	e' の k の予測走行需要電力を求めるための 補助関数の値[kW] $\forall e' \in \{BAT, BEV\}$
$\alpha_{e'}$	e' の自己放電率[hour] $\forall e' \in \{BAT, BEV\}$
$E_{e',k}$	e' の k の蓄電量[kWh] $\forall e' \in \{BAT, BEV\}$
$r_{e',k}^{SOC}$	e' の k の蓄電率(SOC)[-] $\forall e' \in \{BAT, BEV\}$
C_e^{RM}	e の既製品容量[kW or kWh or L] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv} \setminus \{PVA, STC, HPU, HWT\}$
$\tau_{BEV}^{SOC,sug}$	DES からの BEV の出発時における 利用者の希望下界 SOC[-]
$\hat{\delta}_{REL,k}$	BEV の k の VCD との予測接続状態[-] (0 は VCD と切断, 1 は VCD と接続)
$\hat{P}_{AEL,k}$	AEL の k の予測需要電力[kW]
$P_{HPU,k}^{heat}$	HPU の k の加熱における入力電力[kW]
C_{ESM}	ESM の契約電力[kW]
C_{HPU}^{heat}	HPU の加熱における出力熱力の容量[kW]
η_{GWH}	GWH の変換効率[-]
q^{gas}	ガスの単位発熱量[kWh/m ³]
$u_{GWH,k}$	GWH の k の使用ガス速度[m ³ /hour]

$W_{GWH,k}$	GWH の k の出力熱力[kW]	$r_{HPU,k}^{COP,heat,on}$	HPU 稼働時のみを抽出した HPU の k の加熱における COP[-] (稼働時は $r_{HPU,k}^{COP,heat}$, 非稼働時は 0)
$\hat{v}_{HWT,k}^{out}$	HWT から HWL への k の 予測温水出水速度[L/hour]	E_{HPU}^{heat}	HPU の加熱における総入力電力量[kWh]
$\hat{v}_{HWT,k}^{in}$	上水道から HWT への k の 予測冷水入水速度[L/hour]	Q_{HPU}^{heat}	HPU の加熱における総出力熱量[kWh]
$\hat{V}_{HWT,k}$	HWT の k の予測貯湯量[L]	$v_{HWL,k}^{dilute}$	上水道からの HWL の k の 湯温調整用冷水入水速度[L/hour]
c^{water}	体積 1 L あたりの水の熱容量[kJ/(°C · L)]	$\hat{T}_{HWL,k}$	HWL の k の予測需要湯温[°C]
n^{sph}	1 時間あたりの秒数[second/hour]	$\hat{v}_{HWL,k}$	HWL の k の予測需要湯量使用速度[L/hour]
α^{water}	水温体積積[°C · L]から熱量[kWh]への 変換係数[kWh/(°C · L)]	$P_{ESM,k}$	ESM の k の売買電力[kW] (正値は外部からの買電, 負値は外部への売電)
$T_{HWT,k}$	HWT の k の貯湯温[°C]	$P_{ESM,k}^{buy}$	ESM の k の買電電力[kW]
$Q_{HWT,k}$	HWT の k の蓄熱量[kWh]	$P_{ESM,k}^{sell}$	ESM の k の売電電力[kW]
$W_{HWT,k}^{out}$	HWT から HWL への k の出力熱力[kW]	$E_{ESM,k}^{buy}$	ESM の k 時点での総買電量(メータ値)[kWh]
\hat{T}_k^{tap}	k の予測上水道水温[°C]	$E_{ESM,k}^{sell}$	ESM の k 時点での総売電量(メータ値)[kWh]
$\hat{W}_{HWT,k}^{in}$	上水道から HWT への k の予測入力熱力[kW]	$\hat{E}_{ESM}^{buy,start}$	ESM の予測開始総買電量(メータ値)[kWh]
β_{HWT}	HWT の総合熱損失係数[kW/(m ² · °C)]	$\hat{E}_{ESM}^{sell,start}$	ESM の予測開始総売電量(メータ値)[kWh]
A_{HWT}	HWT の表面積[m ²]	$E_{ESM,k}$	ESM の k 時点での総正味買電量(メータ値)[kWh]
$W_{HWT,k}^{loss}$	HWT の k の損失熱力[kW]	C_{ESM}^{use}	ESM の最大利用容量[kW]
$W_{STC,k}$	STC の k の出力熱力[kW]	$U_{GSM,k}$	GSM の k 時点での総使用ガス量(メータ値)[m ³]
$W_{HPU,k}^{heat}$	HPU の k の加熱における出力熱力[kW]	\hat{U}_{GSM}^{start}	GSM の予測開始総使用ガス量(メータ値)[m ³]
$T_{HPU,k}^{heat}$	HPU の k の加熱における沸き上げ目標温度[°C]	$\hat{v}_{CWL,k}$	CWL の k の予測需要水量使用速度[L/hour]
$T^{waterBoil}$	水の沸点[°C]	$v_{WSM,k}$	WSM の k の冷水入水速度[L/hour]
V_{HWT}^{cap}	HWT の容積[L]	$V_{WSM,k}$	WSM の k 時点での総給水上水道量(メータ値)[L]
$r_{HWT,k}^{SOH}$	HWT の k の蓄熱率(SOH)[-]	\hat{V}_{WSM}^{start}	WSM の予測開始総給水上水道量(メータ値)[L]
α_{STC}	STC の有効透過吸収積[-]	$C_{ESM,j}^{use}$	ESM の j の最大利用容量[kW]
β_{STC}	STC の総合熱損失係数[kW/(m ² · °C)]	$\gamma_j^{ele,bas,PR}$	j の電気基本料金の日割値[JPY]
F_{STC}	STC の熱除去因子[-]	$\gamma^{ele,bas,PR}$	電気基本料金の日割値[JPY]
a_e	1 枚あたりの e の面積[m ² /item] $\forall e \in \{PVA, STC\}$	$E_{ESM,z}^{buy,PR}$	ESM の z の総買電量の日割値[kWh]
$f_{STC,k}^{gen}$	1 枚あたりの STC の k の集熱熱力を 求めるための補助関数の値[kW/item]	$\Delta E_{ESM,z}^{buy,PR}$	ESM の z の総買電量の日割上界値の増加量 (z の区間幅)[kWh]
$w_{STC,k}^{gen}$	1 枚あたりの STC の k の集熱熱力[kW/item]	$\gamma_z^{ele,buy}$	z の買電料金単価[JPY/kWh]
$W_{STC,k}^{cur}$	STC の k の出力における抑制熱力[kW] (STC の制御により出力しなかった熱力)	$f_z^{ele,buy,PR}$	z の買電料金の日割値を求めるための補助 関数の値[JPY]
A^{roof}	PVA と STC を設置可能な屋根面積[m ²]	$\gamma^{ele,buy,PR}$	買電料金の日割値[JPY]
$T_{HPU,k}^{heat,on}$	HPU 稼働時のみを抽出した HPU の k の加熱における沸き上げ目標温度[°C] (稼働時は $T_{HPU,k}^{heat}$, 非稼働時は 0)	$\gamma^{ele,adj}$	電気燃料費調整単価[JPY/kWh]
η_{HPU}	HPU の除霜運転時効率低下の考慮係数[-]	$\gamma^{ele,sur}$	RE 発電促進賦課金単価[JPY/kWh]
$\hat{\eta}_{HPU,k}$	HPU の k の考慮係数の切替関数 η の値[-]	$\gamma^{ele,adj,PR}$	電気燃料費調整額の日割値[JPY]
T^{DTH}	HPU の通常運転と除霜運転の切替のための 外気温の閾値(除霜閾値(DTH))[°C]	$\gamma^{ele,sur,PR}$	RE 発電促進賦課金の日割値[JPY]
α_{HPU}^{heat}	HPU の COP 計算のための回帰係数 α [-]	$\gamma^{ele,sell}$	売電料金単価[JPY/kWh]
β_{HPU}^{heat}	HPU の COP 計算のための回帰係数 β [°C]	$\gamma^{ele,sell,PR}$	売電料金の日割値[JPY]
γ_{HPU}^{heat}	HPU の COP 計算のための回帰係数 γ [°C]	$\gamma^{ele,use,PR}$	電力量料金の日割値[JPY]
δ_{HPU}^{heat}	HPU の COP 計算のための回帰係数 δ [°C]	$\gamma^{ele,PR}$	電気料金の日割値[JPY]
$r_{HPU,k}^{COP,heat}$	HPU の k の加熱における COP[-]	g^{ele}	電気 CO ₂ 排出係数[kg-CO ₂ /kWh]
		$G^{ele,buy,PR}$	買電による CO ₂ 排出量の日割値[kg-CO ₂]

$G_{ele,sell,PR}$	売電による CO ₂ 排出削減量の 日割値[kg-CO ₂]	N_e^{life}	e の減価償却期間の年数(耐用年数)[year] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv}$
$G_{ele,PR}$	電気 CO ₂ 排出量の日割値[kg-CO ₂]	g_e	e のメンテナンスを除くライフサイクル CO ₂ (LCCO ₂)排出係数[kg-CO ₂ /item or kg-CO ₂ /kW or kg-CO ₂ /kWh or kg-CO ₂ /L] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv}$
$\gamma_s^{gas,bas,PR}$	s のガス基本料金の日割値[JPY]	y_e^{DC}	e の \mathcal{T} あたりの $y_e \forall e \in \mathcal{E}^{inv}$ [JPY/item or JPY/kW or JPY/kWh or JPY/L]
$y_s^{gas,buy}$	s の買ガス料金単価[JPY/m ³]	g_e^{DC}	e の \mathcal{T} あたりの $g_e \forall e \in \mathcal{E}^{inv}$ [kg-CO ₂ /item or kg-CO ₂ /kW or kg-CO ₂ /kWh or kg-CO ₂ /L]
$\gamma_{gas,bas,PR}$	ガス基本料金の日割値[JPY]	$y_{e'}^{ini,DC}$	e' の初期蓄電量の充電費用の \mathcal{T} あたりの 減価償却費の単価[JPY/kWh] $\forall e' \in \{\text{BAT, BEV}\}$
$y_{gas,buy}$	買ガス料金単価[JPY/m ³]	$g_{e'}^{ini,DC}$	e' の初期蓄電量の充電 CO ₂ 排出量の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出係数 [kg-CO ₂ /kWh] $\forall e' \in \{\text{BAT, BEV}\}$
$U_{GSM,s}^{PR}$	GSM の s の総使用ガス量の日割値[m ³]	$y_{HWT}^{ini,DC,gas}$	HWT の初期蓄熱量の加熱費用の \mathcal{T} あたりの減価償却費の単価[JPY/m ³]
$\gamma_{gas,buy,PR}$	買ガス料金の日割値[JPY]	$g_{HWT}^{ini,DC,gas}$	HWT の初期蓄熱量の加熱 CO ₂ 排出量の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出係数 [kg-CO ₂ /m ³]
$y_{gas,adj}$	ガス原料費調整単価[JPY/m ³]	$y_{HWT}^{ini,DC,water}$	HWT の初期蓄熱量の給水費用の \mathcal{T} あたりの減価償却費の単価[JPY/L]
$\gamma_{gas,adj,PR}$	ガス原料費調整額の日割値[JPY]	$g_{HWT}^{ini,DC,water}$	HWT の初期蓄熱量の給水 CO ₂ 排出量の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出係数[kg-CO ₂ /L]
$\gamma_{gas,use,PR}$	ガス従量料金の日割値[JPY]	$y_{GEV}^{ini,DC}$	GEV の初期燃料残量の給油費用の \mathcal{T} あたりの減価償却費の単価[JPY/L]
$\gamma_{gas,PR}$	ガス料金の日割値[JPY]	$g_{GEV}^{ini,DC}$	GEV の初期燃料残量の給油 CO ₂ 排出量の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出係数[kg-CO ₂ /L]
g^{gas}	ガス CO ₂ 排出係数[kg-CO ₂ /m ³]	$r_e^{cost,total}$	e の経費率(資本回収係数やメンテナンス 年経費率を含む総年経費率)[-] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv}$
$G_{gas,PR}$	ガス CO ₂ 排出量の日割値[kg-CO ₂]	$r_e^{CO_2,total}$	総年経費率の概念に相当する e の CO ₂ 排出量の比率[-] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv}$
$V_{WSM,l}^{PR}$	WSM の l の総給水上水道量の日割値[L]	Y_e^{DC}	e の \mathcal{T} あたりの減価償却費[JPY] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv}$
$\Delta V_{WSM,l}^{-PR}$	WSM の l の総給水上水道量の日割上限値の 増加量(l の区間幅)[L]	G_e^{DC}	e の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv}$
$y_l^{water,use}$	l の上水道従量料金単価[JPY/L]	$Y_{e'}^{ini,DC}$	e' の初期蓄電量の充電費用の \mathcal{T} あたりの減価償却費[JPY] $\forall e' \in \{\text{BAT, BEV}\}$
$f_l^{water,use,PR}$	l の上水道従量料金の日割値を求めるための 補助関数の値[JPY]	$G_{e'}^{ini,DC}$	e' の初期蓄電量の充電 CO ₂ 排出量の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂] $\forall e' \in \{\text{BAT, BEV}\}$
$\gamma_{water,use,PR}$	上水道従量料金の日割値[JPY]	$Y_{HWT}^{ini,DC}$	HWT の初期蓄熱量の給湯費用の \mathcal{T} あたりの減価償却費[JPY]
$V_{WSM,q}^{PR}$	WSM の q の総排水下水道量の日割値[L]	$G_{HWT}^{ini,DC}$	HWT の初期蓄熱量の給湯 CO ₂ 排出量の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂]
$\Delta V_{WSM,q}^{-PR}$	WSM の q の総排水下水道量の日割上限値の 増加量(q の区間幅)[L]	$Y_{GEV}^{ini,DC}$	GEV の初期燃料残量の給油費用の \mathcal{T} あたりの減価償却費[JPY]
$y_q^{sewage,use}$	q の下水道従量料金単価[JPY/L]	$g_{GEV}^{ini,DC}$	GEV の初期燃料残量の給油 CO ₂ 排出量の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出係数[kg-CO ₂ /L]
$f_q^{sewage,use,PR}$	q の下水道従量料金の日割値を求める ための補助関数の値[JPY]	$r_e^{CO_2,total}$	e の CO ₂ 排出量の比率[-] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv}$
$\gamma_{sewage,use,PR}$	下水道従量料金の日割値[JPY]	Y_e^{DC}	e の \mathcal{T} あたりの減価償却費[JPY] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv}$
$\gamma_{water,bas,PR}$	上水道基本料金の日割値[JPY]	G_e^{DC}	e の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂] $\forall e \in \mathcal{E}^{inv}$
$\gamma_{sewage,bas,PR}$	下水道基本料金の日割値[JPY]	$Y_{e'}^{ini,DC}$	e' の初期蓄電量の充電費用の \mathcal{T} あたりの減価償却費[JPY] $\forall e' \in \{\text{BAT, BEV}\}$
$\gamma_{water,PR}$	上下水道料金の日割値[JPY]	$G_{e'}^{ini,DC}$	e' の初期蓄電量の充電 CO ₂ 排出量の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂] $\forall e' \in \{\text{BAT, BEV}\}$
g^{water}	上下水道 CO ₂ 排出係数[kg-CO ₂ /L]	$Y_{HWT}^{ini,DC}$	HWT の初期蓄熱量の給湯費用の \mathcal{T} あたりの減価償却費[JPY]
$G_{water,PR}$	上下水道 CO ₂ 排出量の日割値[kg-CO ₂]	$G_{HWT}^{ini,DC}$	HWT の初期蓄熱量の給湯 CO ₂ 排出量の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂]
y^{oil}	ガソリン販売価格[JPY/L]	$Y_{GEV}^{ini,DC}$	GEV の初期燃料残量の給油費用の \mathcal{T} あたりの減価償却費[JPY]
$g^{oil,buy}$	ガソリン製造時 CO ₂ 排出係数[kg-CO ₂ /L]	$g_{GEV}^{ini,DC}$	GEV の初期燃料残量の給油 CO ₂ 排出量の \mathcal{T} あたりの減価償却 CO ₂ 排出係数[kg-CO ₂ /L]
$g^{oil,run}$	ガソリン燃焼時 CO ₂ 排出係数[kg-CO ₂ /L]		
γ^{oil}	ガソリン代[JPY]		
$G^{oil,buy}$	ガソリン製造時 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂]		
$G^{oil,run}$	ガソリン燃焼時 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂]		
G^{oil}	ガソリン CO ₂ 排出量[kg-CO ₂]		
N_{day}	\mathcal{T} の日数[day]		
n_{dpy}	1年あたりの日数[day/year]		
y_e	e の資本的支出(設備投資費)の単価 [JPY/item or JPY/kW or JPY/kWh or JPY/L]		

$G_{GEV}^{ini,DC}$	GEV の初期燃料残量の給油 CO ₂ 排出量の T あたりの減価償却 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂]
$\gamma_{ini,DC}$	T あたりの総減価償却費[JPY]
$G_{ini,DC}$	T あたりの総減価償却 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂]
$\gamma^{total,RP}$	T あたりの総コスト[JPY]
$G^{total,RP}$	T あたりの総 CO ₂ 排出量[kg-CO ₂]

また、ホールダを利用して離散時間値 X_k を連続時間値 X_t にホールドする際には、状態量を表す $E_{e',t}, r_{e',t}^{SOC}, \hat{V}_{HWT,t}, E_{ESM,t}^{buy}, E_{ESM,t}^{sell}, E_{ESM,t}, U_{GSM,t}, V_{WSM,t}$ はそれぞれ $E_{e',k}, r_{e',k}^{SOC}, \hat{V}_{HWT,k}, E_{ESM,k}^{buy}, E_{ESM,k}^{sell}, E_{ESM,k}, U_{GSM,k}, V_{WSM,k}$ の一次ホールド、それ以外の $Q_{HWT,t}, r_{HWT,t}^{SOH}$ を除く X_t は対応する X_k の零次ホールドで表せられるものとする。なお、状態量 $Q_{HWT,k}, r_{HWT,k}^{SOH}$ はそれぞれ後述の(48)式、(56)式で示され、これらは零次ホールドと一次ホールドの積として一部で不連続性を持つ折れ線関数で表せられるものとする。

なお、本稿では HPWH のダイナミクスの考慮において、温度、電力、熱力、COP は零次ホールド、貯湯量は一次ホールド、蓄熱量は区分的に零次または一次となる不連続な折れ線関数としている。これらの仮定は数理最適化問題の定式化を想定したモデル化によるものであるが、実プラントにおけるダイナミクスとの誤差が生じる要因となる。本仮定を基にした本モデルの妥当性検証は今後の課題とする。

3.4 想定するエネルギーフローと操作量と制御量

本稿で想定する DES の操作量と制御量の一覧を下記に、想定する DES 内のエネルギーフローを示すブロック線図を図 3 に示す。

(1) 操作量

$$\{P_{HPC,k}^{P2H}, P_{HPC,k}^{P2B}, P_{HPC,k}^{P2V}, P_{HPC,k}^{PB2H}, P_{HPC,k}^{PB2V}, P_{HPC,k}^{PV2H}, u_{GWH,k}, W_{STC,k}\}_{k \in \mathcal{K}}, \{N_e\}_{e \in \{PVA, STC\}}, C_{BEV}, \{E_{e',k}\}_{e' \in \{BAT, BEV\}, k \in \{1\}}, \{T_{HWT,k}\}_{k \in \{1\}}, \{T_{HPU,k}\}_{k \in \mathcal{K}' \setminus \{1\}}$$

(2) 制御量

$$\{P_{PVA,k}, P_{PVA,k}^{cur}, P_{HPC,k}^{cur}, f_{HPC,k}, \eta_{HPC,k}, P_{HPC,k}, W_{GWH,k}, W_{HWT,k}^{out}, W_{HWT,k}^{loss}, P_{HPU,k}^{heat}, W_{HPU,k}^{heat}, COP_{HPU,k}^{heat}, COP_{HPU,k}^{heat, on}, f_{STC,k}^{gen}, W_{STC,k}^{gen}, W_{STC,k}^{cur}, v_{HWT,k}^{dilute}, P_{ESM,k}, P_{ESM,k}^{buy}, P_{ESM,k}^{sell}, v_{WSM,k}\}_{k \in \mathcal{K}}, \{\eta_{e,k}, P_{e,k}\}_{e \in \{BCD, VCD\}, k \in \mathcal{K}}, \{\eta_{e',k}, P_{e',k}, f_{e',k}\}_{e' \in \{BAT, BEV\}, k \in \mathcal{K}}, \{C_e\}_{e \in \{inv\} \setminus \{BEV, HWT, STC, HPU\}}, C_{HPU}^{heat}, C_{ESM}, C_{ESM}^{use}, E_{HPU,k}^{heat}, Q_{HPU,k}^{heat}, \{E_{e',k}\}_{e' \in \{BAT, BEV\}, k \in \mathcal{K}' \setminus \{1\}}, \{T_{HWT,k}\}_{k \in \mathcal{K}' \setminus \{1\}}, \{T_{HPU,k}\}_{k \in \{1\}}, \{r_{e',k}^{SOC}\}_{e' \in \{BAT, BEV\}, k \in \mathcal{K}'}, \{Q_{HWT,k}, r_{HWT,k}^{SOH}, T_{HPU,k}^{heat}, \tau_{HPU,k}^{heat, on}, E_{ESM,k}^{buy}, E_{ESM,k}^{sell}, E_{ESM,k}, U_{GSM,k}, V_{WSM,k}\}_{k \in \mathcal{K}'}, \gamma_{gas, bas, PR}, \{z_{ele, buy, PR}\}_{z \in Z}, \gamma_{ele, buy, PR}, \gamma_{ele, adj, PR}, \gamma_{ele, sur, PR}, \gamma_{ele, sell, PR}, \gamma_{ele, use, PR}, \gamma_{ele, PR}, G_{ele, buy, PR}, G_{ele, sell, PR}, G_{ele, PR}, \gamma_{gas, bas, PR}, \gamma_{gas, buy, PR}, \gamma_{gas, buy, PR}, \gamma_{gas, adj, PR}, \gamma_{gas, use, PR}, \gamma_{gas, PR}, G_{gas, PR}, \{l_{water, use, PR}\}_{l \in L}, \gamma_{water, use, PR}, \{q_{sewage, use, PR}\}_{q \in Q}, \gamma_{sewage, use, PR}, \gamma_{water, PR}, G_{water, PR}, \gamma_{oil, buy}, G_{oil, run}, G_{oil}, \{Y_e^{DC}, G_e^{DC}\}_{e \in \{inv\} \setminus \{HWT\}}, \{Y_{e'}^{ini, DC}, G_{e'}^{ini, DC}\}_{e' \in \{BAT, BEV\}}, \gamma_{HWT}^{ini, DC}, G_{HWT}^{ini, DC}, \gamma_{GEV}^{ini, DC}, G_{GEV}^{ini, DC}, \gamma_{ini, DC}, G_{ini, DC}$$

$$\gamma^{total, PR}, G^{total, PR}$$

3.5 機器ごとのプラントモデルと制約

本研究で構築した SPM-TSCPOS-DES と制約を機器ごとに下記に示す。本稿では、モデルにおける定義や代入処理としての等式と等式制約における等式を区別するため、前者は「 \triangleq 」、後者は「 $=$ 」を用いて表記する。

(1) 太陽光発電アレイ(PVA)

PVA のモデルと制約は、

$$\hat{f}_{PVA,k} \triangleq \frac{\hat{H}_k}{H_{test}^{PVA}} [1 - \alpha_{PVA} (\hat{T}_k - T_{PVA}^{test})], \forall k \in \mathcal{K}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \hat{p}_{PVA,k} \\ \hat{p}_{PVA,k}^{cur} \end{cases} \triangleq \begin{cases} \begin{bmatrix} \hat{f}_{PVA,k} \\ 0 \end{bmatrix} & \text{if } \hat{f}_{PVA,k} < 1 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ \hat{f}_{PVA,k} - 1 \end{bmatrix} & \text{otherwise} \end{cases}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (4)$$

$$C_{PVA} \triangleq C_{PVA} N_{PVA}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} P_{PVA,k} \\ P_{PVA,k}^{cur} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \hat{p}_{PVA,k} \\ \hat{p}_{PVA,k}^{cur} \end{bmatrix} C_{PVA}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (6)$$

$$0 \leq N_{PVA}, N_{PVA} \in \mathbb{Z}, \quad (7)$$

で表される。本モデルでは、屋根設置 PVA の使用を想定する。(3)式は Fuentes ら⁷⁸⁾による Osterwald⁷⁹⁾のモデルの異形モデルを示し、PVA の温度は予測外気温 \hat{T}_k に等しいものと仮定する。(4)式は PVA の予測発電電力 $\hat{p}_{PVA,k}$ [p.u.]の PVA の容量(1[p.u.])による飽和を考慮する式を示す。

(2) ハイブリッドパワーコンディショナー(HPC)

本稿で想定する HPC 内のエネルギーフローを示すブロック線図を図 4 に示す。

HPC のモデルと制約は、

$$P_{HPC,k}^{cur} \triangleq P_{PVA,k} - P_{HPC,k}^{P2H} - P_{HPC,k}^{P2B} - P_{HPC,k}^{P2V}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (8)$$

$$P_{BCD,k} \triangleq P_{HPC,k}^{B2H} - P_{HPC,k}^{P2B} + P_{HPC,k}^{B2V}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (9)$$

$$P_{VCD,k} \triangleq P_{HPC,k}^{V2H} - P_{HPC,k}^{P2V} - P_{HPC,k}^{B2V}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (10)$$

$$f_{HPC,k} \triangleq P_{HPC,k}^{P2H} + P_{HPC,k}^{B2H} + P_{HPC,k}^{V2H}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (11)$$

$$\eta_{HPC,k} \triangleq \begin{cases} \frac{1}{\eta_{HPC}^{in}} & \text{if } f_{HPC,k} < 0 \\ \eta_{HPC}^{out} & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (12)$$

$$P_{HPC,k} \triangleq \eta_{HPC,k} f_{HPC,k}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (13)$$

$$C_{HPC} \triangleq \max_{k \in \mathcal{K}} |P_{HPC,k}|, \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_{HPC,k} \leq 0, 0 \leq P_{HPC,k}^{P2H}, P_{HPC,k}^{P2B} \leq 0 & \text{if } P_{BCD,k} < 0 \\ 0 \leq P_{HPC,k}^{B2H}, P_{HPC,k}^{P2B} = 0, 0 \leq P_{HPC,k}^{B2V} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_{HPC,k}^{V2H} \leq 0, 0 \leq P_{HPC,k}^{P2V}, 0 \leq P_{HPC,k}^{B2V} & \text{if } P_{VCD,k} < 0 \\ 0 \leq P_{HPC,k}^{V2H}, P_{HPC,k}^{P2V} = 0, P_{HPC,k}^{B2V} \leq 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_{HPC,k}^{P2H} = 0, P_{HPC,k}^{B2H} \leq 0, P_{HPC,k}^{V2H} \leq 0 & \text{if } P_{HPC,k} < 0 \\ 0 \leq P_{HPC,k}^{P2H}, 0 \leq P_{HPC,k}^{B2H}, 0 \leq P_{HPC,k}^{V2H} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (17)$$

$$C_{HPC} \leq C_{HPC} \leq \bar{C}_{HPC} \quad \text{if } 0 < C_{HPC}, \quad (18)$$

$$0 \leq P_{HPC,k}^{cur}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (19)$$

で表される。(8)式から(13)式は図 4 の各母線(bus)での電力保存則を示し、(14)式は容量の定義式、(15)式から(17)式は図 4 の各 bus でのエネルギーフローの充放電または入出力の排他制約を示す。

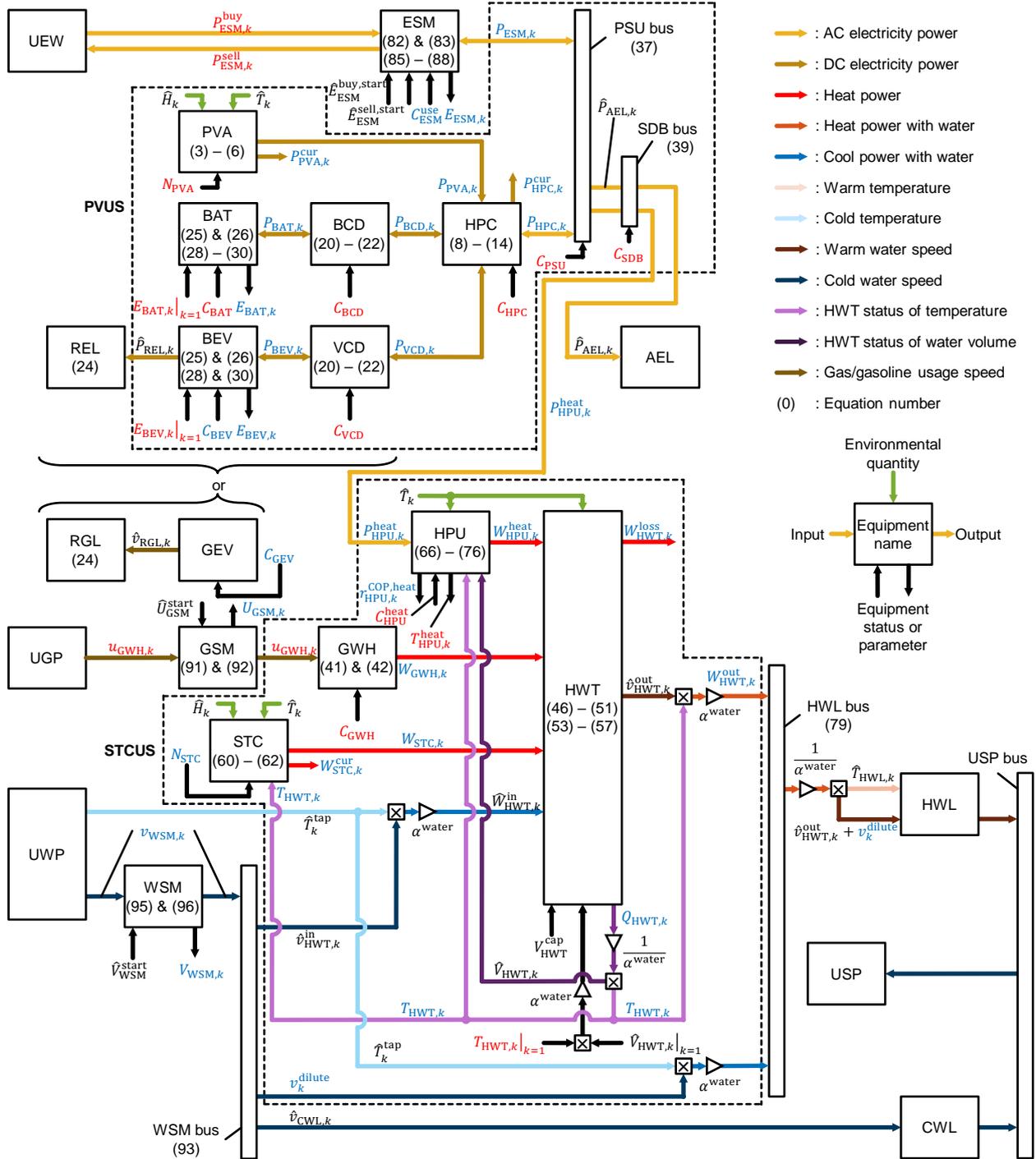


図3 需要側エネルギーシステム内のエネルギーフローを示すブロック線図

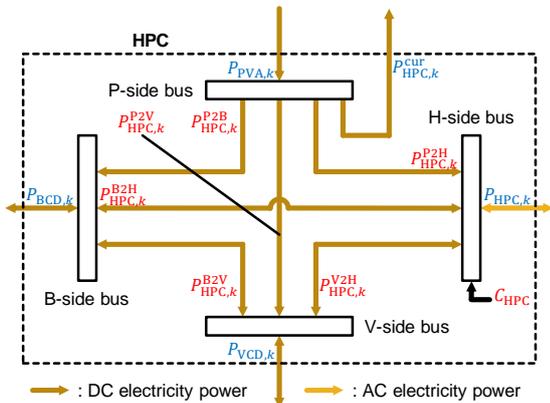


図4 ハイブリッドパワーコンディショナー内のエネルギーフローを示すブロック線図

(3) 蓄電池用充放電器(BCD)とバッテリー式電気自動車用充放電器(VCD)

BCD と VCD のモデルと制約は,

$$\eta_{e,k} \triangleq \begin{cases} \eta_e^{\text{in}} & \text{if } P_{e,k} < 0 \\ \frac{1}{\eta_e^{\text{out}}} & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$\forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (20)$$

$$P_{e',k} \triangleq \eta_{e,k} P_{e,k},$$

$$\forall (e, e') \in \{(\text{BCD}, \text{BAT}), (\text{VCD}, \text{BEV})\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (21)$$

$$C_e \triangleq \max_{k \in \mathcal{K}} |P_{e,k}|, \forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}, \quad (22)$$

$$C_e \leq C_e \leq \bar{C}_e \text{ if } 0 < C_e, \forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}, \quad (23)$$

で表される. ここで, (e, e') は順序対であり, (21) 式のよう

な順序対を用いた範囲の記述は文献⁸⁰⁾での書き方に準ずる.

- (4) バッテリー式電気自動車走行時電力負荷(REL)とガソリンエンジン車走行時ガソリン負荷(RGL)

BEV の予測走行需要電力 $\hat{P}_{REL,k}$ および GEV の予測走行需要ガソリン使用速度 $\hat{v}_{RGL,k}$ の定義式は,

$$\hat{X}_{e,k} \triangleq \hat{v}_k^{car} / \eta_e, \quad \forall (X, e) \in \{(P, REL), (v, RGL)\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (24)$$

で表される.

- (5) 蓄電池(BAT)とバッテリー式電気自動車(BEV)

$e' \in \{BAT, BEV\}$ の k の変換効率の切替関数⁷⁷⁾の値 $\eta_{e',k}$ は,

$$\eta_{e',k} \triangleq \begin{cases} \eta_{e'}^{in} & \text{if } P_{e',k} < 0 \\ \frac{1}{\eta_{e'}^{out}} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall e' \in \{BAT, BEV\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (25)$$

で表され, $e' \in \{BAT, BEV\}$ の予測走行需要電力を求めるための補助関数の値 $f_{e',k}$ は,

$$f_{e',k} \triangleq \begin{cases} 0 & \text{if } e' = BAT \text{ or } (e' = BEV \text{ and } C_{BEV} = 0) \\ \hat{P}_{REL,k} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall e' \in \{BAT, BEV\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (26)$$

で表され, 連続時間システムの $e' \in \{BAT, BEV\}$ の蓄電量 $E_{e',t}$ の状態方程式は,

$$\dot{E}_{e',t} \triangleq -\alpha_{e'} E_{e',t} - \eta_{e',k} P_{e',t} - f_{e',t}, \quad \forall e' \in \{BAT, BEV\}, \forall t \in \mathcal{T}, \quad (27)$$

で表される. 前進差分法を用いると, 離散化された蓄電量

$E_{e',k}$ の差分方程式は,

$$E_{e',k+1} \triangleq (1 - \alpha_{e'} \Delta k) E_{e',k} - \eta_{e',k} P_{e',k} \Delta k - f_{e',k} \Delta k, \quad \forall e' \in \{BAT, BEV\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (28)$$

で表される. (25)式, (26)式, (28)式に加えて $e' \in \{BAT, BEV\}$ のモデルと制約は,

$$C_{BAT} \triangleq \max_{k \in \mathcal{K}'} (E_{BAT,k} / r_{BAT,k}^{SOC}), \quad (29)$$

$$r_{e',k}^{SOC} \triangleq \begin{cases} 0 & \text{if } C_{e'} = 0 \\ E_{e',k} / C_{e'} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall e' \in \{BAT, BEV\}, \forall k \in \mathcal{K}', \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} C_{BEV} \\ C_{GEV} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ C_{GEV}^{RM} \end{bmatrix} & \text{if } C_{BEV} = 0 \\ \begin{bmatrix} C_{BEV}^{RM} \\ 0 \end{bmatrix} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (31)$$

$$r_{e',k}^{SOC} C_{e'} \leq E_{e',k} \leq \bar{r}_{e',k}^{SOC} C_{e'}, \quad \forall e' \in \{BAT, BEV\}, \forall k \in \mathcal{K}', \quad (32)$$

$$r_{BEV}^{SOC, sug} C_{BEV} \leq E_{BEV,k} \quad \text{if } \hat{b}_{REL,k-1} = 1, \quad \forall k \in \mathcal{K}', \quad (33)$$

and $\hat{b}_{REL,k} = 0$

$$P_{BEV,k} = 0 \quad \text{if } \hat{b}_{REL,k} = 0, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (34)$$

$$E_{e',k} \Big|_{k=|\mathcal{K}|+1} = E_{e',k} \Big|_{k=1}, \quad \forall e' \in \{BAT, BEV\}, \quad (35)$$

$$\underline{C}_{BAT} \leq C_{BAT} \leq \bar{C}_{BAT} \quad \text{if } 0 < C_{BAT}, \quad (36)$$

で表される. (31)式は BEV と GEV のどちらを導入するかの技術選択を考慮する式を示し, (33)式は DES からの BEV の出発時における利用者の希望下界蓄電量の充足制約⁵⁴⁾を示し, (34)式は BEV の VCD との非接続時における充放電の不可制約を示し, (35)式は計画期間より後 $(|\mathcal{K}| + 1 < k)$ の $e' \in \{BAT, BEV\}$ の持続可能な運用に配慮するための蓄電量 $E_{e',k}$ の開始値と終了値の一致制約を示す.

- (6) 電力切替ユニット(PSU)

PSU のモデルと制約は,

$$C_{PSU} \triangleq \begin{cases} \max[C_{HPC}, \max_{k \in \mathcal{K}} (\hat{P}_{AEL,k} + P_{HPU,k}^{heat}), C_{ESM}] & \text{if } 0 < C_{HPC} \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (37)$$

$$C_{PSU} \leq \bar{C}_{PSU} \quad \text{if } 0 < C_{HPC}, \quad (38)$$

で表される. PSU は平常時連携運転と停電時自立運転の切替を行うための設備である⁷³⁾. 本モデルでは, PVA, BAT, BEV のいずれかの導入時(=HPC 導入時)のみ PSU を導入するものと仮定する. また, 本モデルでは, PSU の容量とそれにかかるコストと CO₂排出量のみを考慮し, PSU の導入の有無によって他の機器の運用に変化は生じないものと仮定する.

- (7) スマート分電盤(SDB)

SDB のモデルと制約は,

$$C_{SDB} \triangleq \begin{cases} \max_{k \in \mathcal{K}} (\hat{P}_{AEL,k} + P_{HPU,k}^{heat}) & \text{if } 0 < C_{HPU}^{heat} \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (39)$$

$$0 \leq C_{SDB} \leq \bar{C}_{SDB} \quad \text{if } 0 < C_{HPU}^{heat}, \quad (40)$$

で表される. SDB は負荷機器の制御を行うために負荷機器と通信が可能な分電盤である⁷³⁾. 本モデルでは, 制御可能負荷機器の導入時(=HPU 導入時)のみ SDB を導入するものと仮定する. また, 本モデルでは, SDB の容量とそれにかかるコストと CO₂排出量のみを考慮し, SDB の導入の有無によって他の機器の運用に変化は生じないものと仮定する.

- (8) ガス給湯機(GWH)

GWH のモデルと制約は,

$$W_{GWH,k} \triangleq \eta_{GWH} q^{gas} u_{GWH,k}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (41)$$

$$C_{GWH} \triangleq \max_{k \in \mathcal{K}} W_{GWH,k}, \quad (42)$$

$$0 \leq u_{GWH,k}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (43)$$

$$\underline{C}_{GWH} \leq C_{GWH} \leq \bar{C}_{GWH} \quad \text{if } 0 < C_{GWH}, \quad (44)$$

で表される.

- (9) 貯湯槽(HWT)

連続時間システムの HWT から HWL への予測温水出水速度 $\hat{v}_{HWT,t}^{out}$, 上水道から HWT への予測冷水入水速度 $\hat{v}_{HWT,t}^{in}$, 予測上水道水温 \hat{T}_t^{tap} は, それぞれ離散時間値 $\hat{v}_{HWT,k}^{out}$, $\hat{v}_{HWT,k}^{in}$, \hat{T}_k^{tap} の零次ホールドで表され, これらは既知であると仮定する. このとき, 連続時間システムの HWT の予測貯湯量 $\hat{V}_{HWT,t}$ の状態方程式は,

$$\dot{\hat{V}}_{HWT,t} \triangleq -\hat{v}_{HWT,t}^{out} + \hat{v}_{HWT,t}^{in}, \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad (45)$$

で表される. 前進差分法を用いると, 離散化された予測貯湯量 $\hat{V}_{HWT,k}$ の差分方程式は,

$$\hat{V}_{HWT,k+1} \triangleq \hat{V}_{HWT,k} - \hat{v}_{HWT,k}^{out} \Delta k + \hat{v}_{HWT,k}^{in} \Delta k, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (46)$$

で表される. ここで, HWT の予測貯湯量の連続時間値 $\hat{V}_{HWT,t}$ は離散時間値 $\hat{V}_{HWT,k}$ の一次ホールドとなる. また, 水温体積積[°C · L]から熱量[kWh]への変換係数 α^{water} は

$$\alpha^{water} \triangleq c^{water} / n^{sph}, \quad (47)$$

で表され, HWT の蓄熱量 $Q_{HWT,k}$, HWT から HWL への出

力熱力 $W_{HWT,k}^{out}$, 上水道から HWT への予測入力熱力 $\hat{W}_{HWT,k}^{in}$ はそれぞれ,

$$Q_{HWT,k} \triangleq \alpha^{water} T_{HWT,k} \hat{V}_{HWT,k}, \quad \forall k \in \mathcal{K}', \quad (48)$$

$$W_{HWT,k}^{out} \triangleq \alpha^{water} T_{HWT,k} \hat{V}_{HWT,k}^{out}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (49)$$

$$\hat{W}_{HWT,k}^{in} \triangleq \alpha^{water} \hat{T}_k^{tap} \hat{V}_{HWT,k}^{in}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (50)$$

で表され, HWT の損失熱力 $W_{HWT,k}^{loss}$ は, Wang ら⁸¹⁾のモデルとして,

$$W_{HWT,k}^{loss} \triangleq \beta_{HWT} A_{HWT} (T_{HWT,k} - \hat{T}_k), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (51)$$

で表される. ここで, 蓄熱量 $Q_{HWT,k}$ は貯湯温 $T_{HWT,k} \triangleq 0^\circ\text{C}$ を基準(0 kWh)とした際の保有熱量として表される.

連続時間システムの HWT の蓄熱量 $Q_{HWT,t}$ の状態方程式は, 千住ら²³⁾のモデルを参考にし,

$$\dot{Q}_{HWT,t} \triangleq -W_{HWT,t}^{loss} + W_{GWH,t} + W_{STC,t} + W_{HPU,t}^{heat} - W_{HWT,t}^{out} + \hat{W}_{HWT,t}^{in}, \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad (52)$$

で表される. 前進差分法を用いると, 離散化された蓄熱量 $Q_{HWT,k}$ の差分方程式は,

$$Q_{HWT,k+1} \triangleq Q_{HWT,k} - W_{HWT,k}^{loss} \Delta k + W_{GWH,k} \Delta k + W_{STC,k} \Delta k + W_{HPU,k}^{heat} \Delta k - W_{HWT,k}^{out} \Delta k + \hat{W}_{HWT,k}^{in} \Delta k, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (53)$$

で表される. なお, HWT の貯湯温 $T_{HWT,k}$ の差分方程式は (41)式, (48)式, (49)式, (51)式, (53)式, および後述の (66)式から,

$$\alpha^{water} T_{HWT,k+1} \hat{V}_{HWT,k+1} \triangleq -\beta_{HWT} A_{HWT} (T_{HWT,k} - \hat{T}_k) \Delta k + \eta_{GWH} q^{gas} u_{GWH,k} \Delta k + W_{STC,k} \Delta k + \alpha^{water} T_{HPU,k+1}^{heat} \hat{V}_{HWT,k+1}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (54)$$

と導出され, 制御量 $T_{HWT,k+1}$ は操作量 $T_{HWT,k}|_{k=1}, u_{GWH,k}, W_{STC,k}, T_{HPU,k+1}^{heat}$ から求められる. (46)式から (51)式, (53)式,

(54)式に加え, HWT のモデルと制約は,

$$C_{HWT} \triangleq \alpha^{water} T_{waterBoil} V_{HWT}^{cap}, \quad (55)$$

$$r_{HWT,k}^{SOH} \triangleq Q_{HWT,k} / C_{HWT}, \quad \forall k \in \mathcal{K}', \quad (56)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{T}_{HWT,k}^{SOH} \\ \underline{T}_{HWT,k}^{SOH} \\ \bar{T}_{HWT,k}^{SOH} \end{bmatrix} \triangleq \alpha^{water} \begin{bmatrix} \max(\hat{T}_k, \underline{T}_{HWT,k}) V_{HWT,k} / C_{HWT} \\ \bar{T}_{HWT,k} V_{HWT,k} / C_{HWT} \end{bmatrix}, \quad \forall k \in \mathcal{K}', \quad (57)$$

$$T_{HWT,k}|_{k=|\mathcal{K}|+1} = T_{HWT,k}|_{k=1}, \quad (58)$$

$$\max(\hat{T}_k, \underline{T}_{HWT,k}) \leq T_{HWT,k} \leq \bar{T}_{HWT,k}, \quad \forall k \in \mathcal{K}', \quad (59)$$

で表される. (56)式は電気の蓄エネルギー率(SOC)に対応する熱の蓄エネルギー率(SOH)の定義式を示し, (58)式は計画期間より後 $(|\mathcal{K}| + 1 < k)$ の HWT の持続可能な運用に配慮するための貯湯温 $T_{HWT,k}$ の開始値と終了値の一致制約を示す.

本モデルでは, 蓄熱量 $Q_{HWT,t}$ の変化の際はすぐに熱的平衡に達する(温度変化を示す時定数の値は Δk (e.g., 0.5 [hour] or 1 [hour])に比べて極めて小さい)ものと仮定する. ゆえに, 貯湯槽内は温水層と冷水槽層に分かれておらず, 同一温度の単層のみと仮定している. また, 貯湯温 $T_{HWT,t}$ は $T_{HWT,k}$ の零次ホールド(階段関数), 予測貯湯量 $\hat{V}_{HWT,t}$ は $\hat{V}_{HWT,k}$ の一次ホールド(折れ線関数)と仮定するため, (48)式, (56)式としてこれらの積で表される蓄熱量 $Q_{HWT,t}$ と蓄熱率 $r_{HWT,k}^{SOH}$ は一部で不連続性を持つ折れ線関数となる. これらの仮定は数理最適化問題の定式化を想定したモデル化によるものであ

るが, 実プラントにおけるダイナミクスとの誤差が生じる要因となる. 本仮定を基にした本モデルの妥当性検証は今後の課題とする.

(10) 太陽熱集熱器(STC)

STC のモデルと制約は,

$$f_{STC,k}^{gen} \triangleq [\alpha_{STC} \hat{H}_k - \beta_{STC} (T_{HWT,k} - \hat{T}_k)] F_{STC} a_{STC}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (60)$$

$$W_{STC,k}^{gen} \triangleq \begin{cases} 0 & \text{if } f_{STC,k}^{gen} < 0 \\ f_{STC,k}^{gen} & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (61)$$

$$W_{STC,k}^{cur} \triangleq W_{STC,k}^{gen} N_{STC} - W_{STC,k}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (62)$$

$$0 \leq W_{STC,k}, \quad 0 \leq W_{STC,k}^{cur}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (63)$$

$$0 \leq N_{STC}, \quad N_{STC} \in \mathbb{Z}, \quad (64)$$

$$a_{PVA} N_{PVA} + a_{STC} N_{STC} \leq A^{roof}, \quad (65)$$

で表される. 本モデルでは, 強制循環型の間接集熱方式⁸²⁾の屋根設置 STC の使用を想定し, STC-HWT 間の熱媒循環用ポンプ等の消費電力は考慮しない. なお, 熱媒循環用ポンプの起動停止は(61)式で示され, これは図2のSTCの冷媒循環用弁の開閉を模擬している. この開閉は, STCによる集熱が不十分な際に, 開弁によって HWT の温度が減少することを防止するためのものである. (60)式は Duffie ら⁸³⁾のモデルを示し, STC の温度は HWT の貯湯温 $T_{HWT,k}$ に

等しいものと仮定する. (61)式は(60)式に応じた STC の稼働状態を考慮する千住ら²³⁾のモデルを示し, (62)式は STC の制御により出力しなかった熱力を考慮する式を示す. (65)式は PVA と STC の合計設置面積を設置可能な屋根面積 A^{roof} 以下とする制約を示す.

(11) 空気熱ヒートポンプユニット(HPU)

HPU のモデルと制約は,

$$\alpha^{water} T_{HPU,k+1}^{heat} \hat{V}_{HWT,k+1} \triangleq \alpha^{water} T_{HWT,k} \hat{V}_{HWT,k} + W_{HPU,k}^{heat} \Delta k - W_{HWT,k}^{out} \Delta k + \hat{W}_{HWT,k}^{in} \Delta k, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (66)$$

$$T_{HPU,k}^{heat} |_{k=1} \triangleq T_{HPU,k}^{heat} |_{k=|\mathcal{K}|+1}, \quad (67)$$

$$T_{HPU,k+1}^{heat,on} \triangleq \begin{cases} T_{HPU,k+1}^{heat} & \text{if } 0 < P_{HPU,k}^{heat} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (68)$$

$$T_{HPU,k}^{heat,on} |_{k=1} \triangleq T_{HPU,k}^{heat,on} |_{k=|\mathcal{K}|+1}, \quad (69)$$

$$\hat{\eta}_{HPU,k} \triangleq \begin{cases} \eta_{HPU} & \text{if } \hat{T}_k \leq T^{DTH} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (70)$$

$$r_{HPU,k}^{COP,heat} \triangleq \hat{\eta}_{HPU,k} (\alpha_{HPU}^{heat} + \beta_{HPU}^{heat} \hat{T}_k - \gamma_{HPU}^{heat} T_{HWT,k} - \delta_{HPU}^{heat} T_{HPU,k+1}^{heat}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (71)$$

$$r_{HPU,k}^{COP,heat,on} \triangleq \begin{cases} r_{HPU,k}^{COP,heat} & \text{if } 0 < P_{HPU,k}^{heat} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (72)$$

$$P_{HPU,k}^{heat} \triangleq W_{HPU,k}^{heat} / r_{HPU,k}^{COP,heat}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (73)$$

$$E_{HPU}^{heat} \triangleq \sum_{k \in \mathcal{K}} (P_{HPU,k}^{heat} \Delta k), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (74)$$

$$Q_{HPU}^{heat} \triangleq \sum_{k \in \mathcal{K}} (W_{HPU,k}^{heat} \Delta k), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (75)$$

$$C_{HPU}^{heat} \triangleq \max_{k \in \mathcal{K}} W_{HPU,k}^{heat}, \quad (76)$$

$$C_{HPU}^{heat} \leq C_{HPU}^{heat} \leq \bar{C}_{HPU}^{heat} \quad \text{if } 0 < C_{HPU}^{heat}, \quad (77)$$

$$0 \leq P_{HPU,k}^{heat}, \quad 0 < r_{HPU,k}^{COP,heat}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (78)$$

で表される. (66)式は HPU の沸き上げ目標温度 $T_{HPU,k}^{heat}$ による蓄熱量変化に関する差分方程式を示す. なお, 本モデルでは HPU の沸き上げ目標温度 $T_{HPU,k}^{heat}$ を操作量として扱うため, (66)式を HPU の加熱における出力熱力 $W_{HPU,k}^{heat}$ の定義式

として扱う。(68)式、(69)式は制御量となる HPU 稼働時のみを抽出した HPU の沸き上げ目標温度 $T_{\text{HPU},k+1}^{\text{heat,on}}$ の定義式を示し、(70)式から(72)式は長野ら⁴²⁾の除霜運転による効率低下の考慮を含む COP の線形回帰式を示し、(73)式は HPU の加熱における入力電力 $P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}$ の定義式を示す。なお、HPU の COP は(71)式に示すように HWT の貯湯温 $T_{\text{HWT},k}$ 等から算出される。**図 2**および(54)式から分かるように、本モデルでは HPU、STC、GWH で共通の HWT を利用する。これは本モデルでは、(54)式、(71)式、(73)式より、STC や GWH などの運用を考慮して HPU の COP のダイナミクスを考慮できるようにモデル化を行っていることを意味している。

(12) 給湯負荷(HWL)

HWT から HWL への温水出水温度となる HWT の貯湯温 $T_{\text{HWT},k}$ は時として、GWH、STC、HPU の加熱により、HWL の予測需要湯温 $\hat{T}_{\text{HWL},k}$ を超えることがある。この場合、上水道からの冷水入水により、温度調整を行う必要がある。

これを考慮した HWL のモデルと制約は、

$$\alpha^{\text{water}} \hat{T}_{\text{HWL},k} (\hat{v}_{\text{HWT},k}^{\text{out}} + v_{\text{HWL},k}^{\text{dilute}}) \triangleq W_{\text{HWT},k}^{\text{out}} + \alpha^{\text{water}} \hat{T}_k^{\text{tap}} v_{\text{HWL},k}^{\text{dilute}}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (79)$$

$$\hat{v}_{\text{HWL},k} \leq \hat{v}_{\text{HWT},k}^{\text{out}} + v_{\text{HWL},k}^{\text{dilute}}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (80)$$

$$0 \leq v_{\text{HWL},k}^{\text{dilute}}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (81)$$

で表される。(79)式は熱力保存則を示し、出水される温水の予測需要湯温 $\hat{T}_{\text{HWL},k}$ への調整制約と上水道からの HWL の湯温調整用冷水入水速度 $v_{\text{HWL},k}^{\text{dilute}}$ の定義式を兼ねる。(80)式は HWL の予測需要湯量使用速度 $\hat{v}_{\text{HWL},k}$ の充足制約を示す。また、**図 2** の HWL の冷水入水速度調整弁の開閉度合は、本モデルでは $v_{\text{HWL},k}^{\text{dilute}}$ の値として模擬している。

(13) 電力スマートメータ(ESM)

ESM の売買電力 $P_{\text{ESM},k}$ は、

$$P_{\text{ESM},k} \triangleq \hat{P}_{\text{AEL},k} + P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}} - P_{\text{HPC},k}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (82)$$

で表され、買電電力 $P_{\text{ESM},k}^{\text{buy}}$ と売電電力 $P_{\text{ESM},k}^{\text{sell}}$ は

$$\begin{bmatrix} P_{\text{ESM},k}^{\text{buy}} \\ P_{\text{ESM},k}^{\text{sell}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ -P_{\text{ESM},k} \end{bmatrix} & \text{if } P_{\text{ESM},k} < 0 \\ \begin{bmatrix} P_{\text{ESM},k} \\ 0 \end{bmatrix} & \text{otherwise} \end{cases}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (83)$$

で表される。

連続時間システムの ESM の t 時点での総買電量 $E_{\text{ESM},t}^{\text{buy}}$ と総売電量 $E_{\text{ESM},t}^{\text{sell}}$ の状態方程式は、

$$\begin{bmatrix} E_{\text{ESM},t}^{\text{buy}} \\ E_{\text{ESM},t}^{\text{sell}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} P_{\text{ESM},t}^{\text{buy}} \\ P_{\text{ESM},t}^{\text{sell}} \end{bmatrix}, \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad (84)$$

で表される。前進差分法を用いると、離散化された総買電量 $E_{\text{ESM},k}^{\text{buy}}$ と総売電量 $E_{\text{ESM},k}^{\text{sell}}$ の差分方程式は、

$$\begin{bmatrix} E_{\text{ESM},k+1}^{\text{buy}} \\ E_{\text{ESM},k+1}^{\text{sell}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} E_{\text{ESM},k}^{\text{buy}} \\ E_{\text{ESM},k}^{\text{sell}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{\text{ESM},k}^{\text{buy}} \\ P_{\text{ESM},k}^{\text{sell}} \end{bmatrix} \Delta k, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (85)$$

で表される。(82)式、(83)式、(85)式に加え、ESM のモデルと制約は、

$$\begin{bmatrix} E_{\text{ESM},k}^{\text{buy}} \\ E_{\text{ESM},k}^{\text{sell}} \end{bmatrix} \Big|_{k=1} \triangleq \begin{bmatrix} \hat{E}_{\text{ESM}}^{\text{buy,start}} \\ \hat{E}_{\text{ESM}}^{\text{sell,start}} \end{bmatrix}, \quad (86)$$

$$E_{\text{ESM},k} \triangleq E_{\text{ESM},k}^{\text{buy}} - E_{\text{ESM},k}^{\text{sell}}, \quad \forall k \in \mathcal{K}', \quad (87)$$

$$C_{\text{ESM}}^{\text{use}} \triangleq \max_{k \in \mathcal{K}} |P_{\text{ESM},k}|, \quad (88)$$

$$C_{\text{ESM}}^{\text{use}} \leq \bar{C}_{\text{ESM}}, \quad (89)$$

で表される。

(14) 都市ガススマートメータ(GSM)

連続時間システムの GSM の t 時点での総使用ガス量 $U_{\text{GSM},t}$ の状態方程式は、

$$\dot{U}_{\text{GSM},t} \triangleq u_{\text{GWH},t}, \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad (90)$$

で表される。前進差分法を用いると、離散化された総使用ガス量 $U_{\text{GSM},k}$ の差分方程式は、

$$U_{\text{GSM},k+1} \triangleq U_{\text{GSM},k} + u_{\text{GWH},k} \Delta k, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (91)$$

で表される。(91)式に加え、GSM のモデルは、

$$U_{\text{GSM},k} \Big|_{k=1} \triangleq \hat{U}_{\text{GSM}}^{\text{start}}, \quad (92)$$

で表される。

(15) 上水道スマートメータ(WSM)

WSM の冷水入水速度 $v_{\text{WSM},k}$ は、

$$v_{\text{WSM},k} \triangleq \hat{v}_{\text{CWL},k} + \hat{v}_{\text{HWT},k}^{\text{in}} + v_{\text{HWL},k}^{\text{dilute}}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (93)$$

で表され、連続時間システムの WSM の t 時点での総給水上水道量 $V_{\text{WSM},t}$ の状態方程式は、

$$\dot{V}_{\text{WSM},t} \triangleq v_{\text{WSM},t}, \quad \forall t \in \mathcal{T}, \quad (94)$$

で表される。前進差分法を用いると、離散化された総給水上水道量 $V_{\text{WSM},k}$ の差分方程式は、

$$V_{\text{WSM},k+1} \triangleq V_{\text{WSM},k} + v_{\text{WSM},k} \Delta k, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (95)$$

で表される。(93)式、(95)式に加え、WSM のモデルと制約は、

$$V_{\text{WSM},k} \Big|_{k=1} \triangleq \hat{V}_{\text{WSM}}^{\text{start}}, \quad (96)$$

$$v_{\text{WSM},k} \leq \bar{v}_{\text{WSM},k}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (97)$$

で表される。本モデルでは、総給水上水道量と総排水下水道量は等しいものと仮定し、水の需要と供給は一致させた。

(16) 電気料金および電気 CO₂ 排出量の計算機(ECC)

本モデルでは、北陸電力の買電料金メニュー「従量電灯 B」⁸⁴⁾と売電料金メニュー「かんたん固定単価プラン」⁸⁵⁾を想定する。なお、本モデルでは簡略化のため、各メニューにおいて特殊な条件時のみ適応される料金(最低料金など)は考慮しない。また、本稿では、売買電の識別を容易にするために燃料費調整額を除く電力量料金を買電料金、買取料金を売電料金と呼ぶ。

このとき、計画期間 \mathcal{T} あたりの日割電気基本料金 $y^{\text{ele,bas,PR}}$ は ESM の最大利用容量 $C_{\text{ESM}}^{\text{use}}$ を引数とする区分零次関数から計算される。この関数を**図 5**に示す。ESM の契約電力 C_{ESM} (使用電圧を 100 V、力率を 100%と仮定した際に契約アンペアから計算される電力)も**図 5**と同様な区分零次関数となり、両者は、

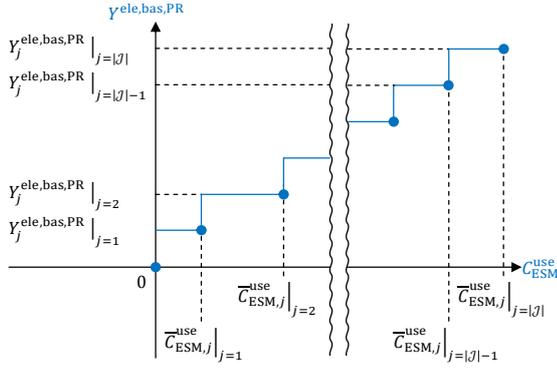


図5 日割電気基本料金の計算用の区分零次関数

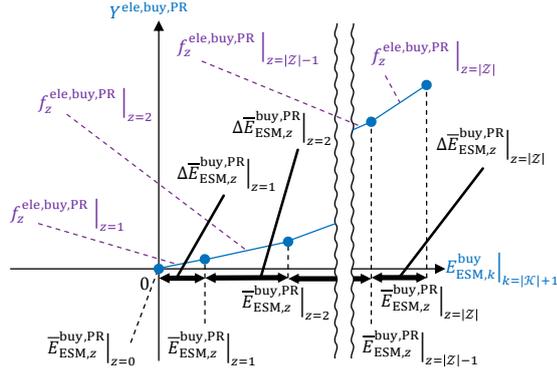


図6 日割買電料金の計算用の区分一次関数

$$\begin{bmatrix} C_{ESM} \\ y_{ele,bas,PR} \end{bmatrix} \triangleq \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{if } C_{ESM}^{use} = 0 \\ \begin{bmatrix} \bar{C}_{ESM,j}^{use} \\ y_j^{ele,bas,PR} \end{bmatrix} & \text{if } 0 < C_{ESM}^{use} \leq \bar{C}_{ESM,j}^{use} \\ & \text{and } j = 1 \\ \begin{bmatrix} \bar{C}_{ESM,j}^{use} \\ y_j^{ele,bas,PR} \end{bmatrix} & \text{if } \bar{C}_{ESM,j-1}^{use} < C_{ESM}^{use} \leq \bar{C}_{ESM,j}^{use} \\ & \text{and } j \neq 1, \end{cases} \quad \forall j \in J, \quad (98)$$

で表される。

また、計画期間 T あたりの日割買電料金はESMの $|J|+1$ 時点での総買電量 $E_{ESM,k}^{buy,PR}|_{k=|J|+1}$ を引数とする区分一次関数から計算される。この関数を図6に示す。

$$\begin{aligned} \text{日割買電料金は、} \\ \bar{E}_{ESM,z}^{buy,PR} \triangleq \bar{E}_{ESM,z}^{buy,PR} - \bar{E}_{ESM,z-1}^{buy,PR}, \quad \forall z \in Z, \quad (99) \\ f_z^{ele,buy,PR} \triangleq \sum_{z'=1}^{z-1} (y_{z'}^{ele,buy,PR} \Delta \bar{E}_{ESM,z'}^{buy,PR}) \\ + y_z^{ele,buy,PR} \left(E_{ESM,k}^{buy,PR}|_{k=|J|+1} - \bar{E}_{ESM,z-1}^{buy,PR} \right), \quad \forall z \in Z, \quad (100) \end{aligned}$$

$$y_z^{ele,buy,PR} \triangleq \begin{cases} 0 & \text{if } E_{ESM,k}^{buy,PR}|_{k=|J|+1} = 0 \\ f_z^{ele,buy,PR} & \text{if } 0 < E_{ESM,k}^{buy,PR}|_{k=|J|+1} \leq \bar{E}_{ESM,z}^{buy,PR} \\ & \text{and } z = 1 \\ f_z^{ele,buy,PR} & \text{if } \bar{E}_{ESM,z-1}^{buy,PR} < E_{ESM,k}^{buy,PR}|_{k=|J|+1} \leq \bar{E}_{ESM,z}^{buy,PR} \\ & \text{and } z \neq 1, \end{cases} \quad \forall z \in Z, \quad (101)$$

で表される。(100)式は $z=1$ のときに右辺の第1項が空和となり、その項の値は0とする。また、 $\bar{E}_{ESM,z}^{buy,PR}|_{z=0} = 0$ とす

る。(98)式から(101)式に加え、ECCのモデルは、

$$\begin{bmatrix} y_{ele,adj,PR} \\ y_{ele,sur,PR} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} y_{ele,adj} \\ y_{ele,sur} \end{bmatrix} E_{ESM,k}^{buy,PR}|_{k=|J|+1}, \quad (102)$$

$$y_{ele,sell,PR} \triangleq y_{ele,sell} E_{ESM,k}^{sell,PR}|_{k=|J|+1}, \quad (103)$$

$$y_{ele,use,PR} \triangleq y_{ele,buy,PR} + y_{ele,adj,PR}, \quad (104)$$

$$y_{ele,PR} \triangleq y_{ele,bas,PR} + y_{ele,use,PR} + y_{ele,sur,PR} - y_{ele,sell,PR}, \quad (105)$$

$$\begin{bmatrix} G_{ele,buy,PR} \\ G_{ele,sell,PR} \end{bmatrix} \triangleq g^{ele} \begin{bmatrix} E_{ESM,k}^{buy,PR} \\ E_{ESM,k}^{sell,PR} \end{bmatrix}|_{k=|J|+1}, \quad (106)$$

$$G_{ele,PR} \triangleq G_{ele,buy,PR} - G_{ele,sell,PR}, \quad (107)$$

で表される。本モデルでは、(106)式、(107)式に示すように、売電によって買電と同値の電気CO₂排出係数 g^{ele} で計算されるCO₂排出量の削減効果があると仮定する。

(17) ガス料金およびガスCO₂排出量の計算機(GCC)

本モデルでは、福井都市ガスのガス料金メニュー「一般料金」⁸⁶⁾を想定する。また、本稿では、各料金の名称を電気料金と揃えるために基準単位料金を買ガス料金単価、買ガス料金単価と総使用ガス量の積を買ガス料金、原料費調整による調整額を原料費調整単価、燃料費調整単価と総使用ガス量の積を原料費調整額と呼ぶ。

このとき、日割ガス基本料金 $y_{gas,bas,PR}$ と買ガス料金単価 $y_{gas,buy}$ はGSMの $|J|+1$ 時点での総使用ガス量 $U_{GSM,k}|_{k=|J|+1}$ を引数とする図5と同形な区分零次関数から計算され、両者は、

$$\begin{bmatrix} y_{gas,bas,PR} \\ y_{gas,buy} \end{bmatrix} \triangleq \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{if } U_{GSM,k}|_{k=|J|+1} = 0 \\ \begin{bmatrix} y_s^{gas,bas,PR} \\ y_s^{gas,buy} \end{bmatrix} & \text{if } 0 < U_{GSM,k}|_{k=|J|+1} \leq \bar{U}_{GSM,s}^{PR} \\ & \text{and } s = 1 \\ \begin{bmatrix} y_s^{gas,bas,PR} \\ y_s^{gas,buy} \end{bmatrix} & \text{if } \bar{U}_{GSM,s-1}^{PR} < U_{GSM,k}|_{k=|J|+1} \leq \bar{U}_{GSM,s}^{PR} \\ & \text{and } s \neq 1, \end{cases} \quad \forall s \in S, \quad (108)$$

で表される。(108)式に加え、GCCのモデルは、

$$y_{gas,buy,PR} \triangleq y_{gas,buy} U_{GSM,k}|_{k=|J|+1}, \quad (109)$$

$$y_{gas,adj,PR} \triangleq y_{gas,adj} U_{GSM,k}|_{k=|J|+1}, \quad (110)$$

$$y_{gas,use,PR} \triangleq y_{gas,buy,PR} + y_{gas,adj,PR}, \quad (111)$$

$$y_{gas,PR} \triangleq y_{gas,bas,PR} + y_{gas,use,PR}, \quad (112)$$

$$G_{gas,PR} \triangleq g^{gas} U_{GSM,k}|_{k=|J|+1}, \quad (113)$$

で表される。

(18) 水道料金および水道CO₂排出量の計算機(WCC)

本モデルでは、福井市上下水道局の上水道料金メニュー「一般水道料金」⁸⁷⁾と下水道料金メニュー「一般汚水下水道使用料」⁸⁸⁾を想定する。

このとき、計画期間 T あたりの日割上水道従量料金 $y_{water,use,PR}$ と日割下水道従量料金 $y_{sewage,use,PR}$ はWSMの $|J|+1$ 時点での総給水水道量 $V_{WSM,k}|_{k=|J|+1}$ を引数とする図6と同形な区分一次関数から計算され、両者は、

$$\Delta \bar{V}_{WSM,l}^{PR} \triangleq \bar{V}_{WSM,l}^{PR} - \bar{V}_{WSM,l-1}^{PR}, \quad \forall l \in L, \quad (114)$$

$$f_l^{\text{water,use,PR}} \triangleq \sum_{l'=1}^{l-1} (y_{l'}^{\text{water,use}} \Delta \bar{V}_{\text{WSM},l'}^{\text{PR}}) + y_l^{\text{water,use}} (V_{\text{WSM},k}|_{k=|J|+1} - \bar{V}_{\text{WSM},l-1}^{\text{PR}}), \quad \forall l \in \mathcal{L}, \quad (115)$$

$$y^{\text{water,use,PR}} \triangleq \begin{cases} 0 & \text{if } V_{\text{WSM},k}|_{k=|J|+1} = 0 \\ f_l^{\text{water,use,PR}} & \text{if } 0 < V_{\text{WSM},k}|_{k=|J|+1} \leq \bar{V}_{\text{WSM},l}^{\text{PR}} \\ & \text{and } l = 1, \\ f_l^{\text{water,use,PR}} & \text{if } \bar{V}_{\text{WSM},l-1}^{\text{PR}} < V_{\text{WSM},k}|_{k=|J|+1} \leq \bar{V}_{\text{WSM},l}^{\text{PR}} \\ & \text{and } l \neq 1, \end{cases} \quad \forall l \in \mathcal{L}, \quad (116)$$

$$\Delta \bar{V}_{\text{WSM},q}^{\text{PR}} \triangleq \bar{V}_{\text{WSM},q}^{\text{PR}} - \bar{V}_{\text{WSM},q-1}^{\text{PR}}, \quad \forall q \in \mathcal{Q}, \quad (117)$$

$$f_q^{\text{sewage,use,PR}} \triangleq \sum_{q'=1}^{q-1} (y_{q'}^{\text{sewage,use}} \Delta \bar{V}_{\text{WSM},q'}^{\text{PR}}) + y_q^{\text{sewage,use}} (V_{\text{WSM},k}|_{k=|J|+1} - \bar{V}_{\text{WSM},q-1}^{\text{PR}}), \quad \forall q \in \mathcal{Q}, \quad (118)$$

$$y^{\text{sewage,use,PR}} \triangleq \begin{cases} 0 & \text{if } V_{\text{WSM},k}|_{k=|J|+1} = 0 \\ f_q^{\text{sewage,use,PR}} & \text{if } 0 < V_{\text{WSM},k}|_{k=|J|+1} \leq \bar{V}_{\text{WSM},q}^{\text{PR}} \\ & \text{and } q = 1, \\ f_q^{\text{sewage,use,PR}} & \text{if } \bar{V}_{\text{WSM},q-1}^{\text{PR}} < V_{\text{WSM},k}|_{k=|J|+1} \leq \bar{V}_{\text{WSM},q}^{\text{PR}} \\ & \text{and } q \neq 1, \end{cases} \quad \forall q \in \mathcal{Q}, \quad (119)$$

で表される。(115)式は $l = 1$ のときに、(119)式は $q = 1$ のときに、それぞれ右辺の第1項が空和となり、その項の値はともに0とする。また、 $\bar{V}_{\text{WSM},l}^{\text{PR}}|_{l=0} = 0, \bar{V}_{\text{WSM},q}^{\text{PR}}|_{q=0} = 0$ とする。

(114)式から(119)式に加え、WCCのモデルは、

$$y^{\text{water,PR}} \triangleq y^{\text{water,bas,PR}} + y^{\text{water,use,PR}} + y^{\text{sewage,bas,PR}} + y^{\text{sewage,use,PR}}, \quad (120)$$

$$G^{\text{water,PR}} \triangleq g^{\text{water}} V_{\text{WSM},k}|_{k=|J|+1}, \quad (121)$$

で表される。

(19) ガソリン料金およびガソリン CO₂ 排出量の計算機 (OCC)

OCC のモデルは、

$$\begin{bmatrix} y^{\text{oil}} \\ G^{\text{oil,buy}} \\ G^{\text{oil,run}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{if } C_{\text{GEV}} = 0 \\ \begin{bmatrix} y^{\text{oil}} \\ g^{\text{oil,buy}} \\ g^{\text{oil,run}} \end{bmatrix} \sum_{k \in \mathcal{K}} (\hat{v}_{\text{RGL},k} \Delta k) & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (122)$$

$$G^{\text{oil}} \triangleq G^{\text{oil,buy}} + G^{\text{oil,run}}, \quad (123)$$

で表される。

(20) 設備減価償却費および設備減価償却 CO₂ 排出量の計算機(DCC)

DCC のモデルは、

$$\begin{bmatrix} y_e^{\text{DC}} & g_e^{\text{DC}} \\ y_{e'}^{\text{ini,DC}} & g_{e'}^{\text{ini,DC}} \\ y_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,gas}} & g_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,gas}} \\ y_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,water}} & g_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,water}} \\ y_{\text{GEV}}^{\text{ini,DC}} & g_{\text{GEV}}^{\text{ini,DC}} \end{bmatrix}$$

$$\triangleq \frac{N_{\text{day}}}{n_{\text{dpy}}} \begin{bmatrix} \frac{y_e}{N_e^{\text{life}}} & \frac{g_e}{N_e^{\text{life}}} \\ \frac{y_z^{\text{ele,buy}}|_{z=1}}{N_{e'}^{\text{life}}} & \frac{g_e^{\text{ele}}}{N_{e'}^{\text{life}}} \\ \frac{y_s^{\text{gas,use}}|_{s=1}}{N_e^{\text{life}}|_{e=\text{HWT}}} & \frac{g_e^{\text{gas}}}{N_e^{\text{life}}|_{e=\text{HWT}}} \\ \frac{y_l^{\text{water,use}}|_{l=1}}{N_e^{\text{life}}|_{e=\text{HWT}}} & \frac{g_e^{\text{water}}}{N_e^{\text{life}}|_{e=\text{HWT}}} \\ \frac{y_{e'}^{\text{oil}}}{N_{e'}^{\text{life}}|_{e=\text{GEV}}} & \frac{g_{e'}^{\text{oil,buy}}}{N_{e'}^{\text{life}}|_{e=\text{GEV}}} \end{bmatrix}, \quad \forall e \in \mathcal{E}^{\text{inv}}, \forall e' \in \{\text{BAT}, \text{BEV}\}, \quad (124)$$

$$\begin{bmatrix} Y_e^{\text{DC}} \\ G_e^{\text{DC}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{cases} \begin{bmatrix} y_e^{\text{DC}} (1 + r_e^{\text{cost,total}}) \\ g_e^{\text{DC}} (1 + r_e^{\text{CO}_2, \text{total}}) \end{bmatrix} N_e & \text{if } e = \text{PVA or STC} \\ \begin{bmatrix} y_e^{\text{DC}} (1 + r_e^{\text{cost,total}}) \\ g_e^{\text{DC}} (1 + r_e^{\text{CO}_2, \text{total}}) \end{bmatrix} C_e^{\text{heat HPU}} & \text{if } e = \text{HPU} \\ \begin{bmatrix} y_e^{\text{DC}} (1 + r_e^{\text{cost,total}}) \\ g_e^{\text{DC}} (1 + r_e^{\text{CO}_2, \text{total}}) \end{bmatrix} C_e & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall e \in \mathcal{E}^{\text{inv}} \setminus \{\text{HWT}\}, \quad (125)$$

$$\begin{bmatrix} Y_e^{\text{DC}} \\ G_e^{\text{DC}} \end{bmatrix} \Big|_{e=\text{HWT}} \triangleq \begin{bmatrix} y_e^{\text{DC}} (1 + r_e^{\text{cost,total}}) \\ g_e^{\text{DC}} (1 + r_e^{\text{CO}_2, \text{total}}) \end{bmatrix} \Big|_{e=\text{HWT}} V_{\text{HWT}}^{\text{cap}}, \quad (126)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{e'}^{\text{ini,DC}} \\ G_{e'}^{\text{ini,DC}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} y_{e'}^{\text{ini,DC}} \\ g_{e'}^{\text{ini,DC}} \end{bmatrix} \frac{E_{e',k}|_{k=1}}{\eta_{\text{HPC}}^{\text{in}} \eta_{e'}^{\text{in}}}, \quad \forall (e, e') \in \{(\text{BCD}, \text{BAT}), (\text{VCD}, \text{BEV})\}, \quad (127)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC}} \\ G_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} y_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,gas}} \\ g_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,gas}} \end{bmatrix} \frac{(Q_{\text{HWT},k} - \alpha_{\text{water}} \hat{r}_k^{\text{tap}} \hat{v}_{\text{HWT},k})|_{k=1}}{\eta_{\text{GWH}} q^{\text{gas}}} + \begin{bmatrix} y_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,water}} \\ g_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,water}} \end{bmatrix} \hat{V}_{\text{HWT},k}|_{k=1}, \quad (128)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{\text{GEV}}^{\text{ini,DC}} \\ G_{\text{GEV}}^{\text{ini,DC}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} y_{\text{GEV}}^{\text{ini,DC}} \\ g_{\text{GEV}}^{\text{ini,DC}} \end{bmatrix} C_{\text{GEV}}, \quad (129)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{\text{ini,DC}} \\ G_{\text{ini,DC}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \sum_{e \in \mathcal{E}^{\text{inv}}} Y_e^{\text{DC}} \\ + \sum_{e \in \{\text{BAT}, \text{BEV}, \text{HWT}, \text{GEV}\}} Y_e^{\text{ini,DC}} \\ \sum_{e \in \mathcal{E}^{\text{inv}}} G_e^{\text{DC}} \\ + \sum_{e \in \{\text{BAT}, \text{BEV}, \text{HWT}, \text{GEV}\}} G_e^{\text{ini,DC}} \end{bmatrix}, \quad (130)$$

で表される。

(21) 総コストおよび総 CO₂ 排出量の計算機(TCC)

計画期間 T あたりの総コストと総 CO₂ 排出量は、

$$\begin{bmatrix} Y^{\text{total,PR}} \\ G^{\text{total,PR}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} y^{\text{ele,PR}} + y^{\text{gas,PR}} + y^{\text{water,PR}} + y^{\text{oil}} + y^{\text{ini,DC}} \\ g^{\text{ele,PR}} + g^{\text{gas,PR}} + g^{\text{water,PR}} + g^{\text{oil}} + g^{\text{ini,DC}} \end{bmatrix}, \quad (131)$$

で表される。

3.6 システム全体のプラントモデルと制約

前節の機器ごとのモデルをまとめたシステム全体のプラントモデル(SPM-TSCPOS-DES)は、

SPM-TSCPOS-DES:

- (3)-(6), (8)-(14), (20)-(22), (24)-(26), (28)-(30), (37), (39), (41), (42), (46)-(51), (53)-(57), (60)-(62), (66)-(76), (79), (82), (83), (85)-(88), (91)-(93), (95), (96), (98)-(131),

で表される。ここで、SPM-TSCPOS-DES に制約を陽に含む場合、すべての制約は、

Constraints-on-SPM-TSCPOS-DES:

(7), (15)-(19), (23), (31)-(36), (38), (40), (43), (44), (58), (59), (63)-(65), (77), (78), (80), (81), (89), (97),

で表される。

また、本モデルでは、HPWHのダイナミクスとして、貯湯量のダイナミクスは(46)式、蓄熱量のダイナミクスは(53)式、貯湯温のダイナミクスは(54)式、沸き上げ目標温度のダイナミクスは(66)式、COPのダイナミクスは(71)式としてそれぞれ差分方程式として考慮され、入力電力と出力熱力のダイナミクスは上記の差分方程式と合わせて(73)式で考慮されている。

さらに、本モデルでは、HPWHは電気・熱・水の連携地点として働き、電気(PVUS)との連携は(73)式や(82)式など、熱(STCUS)との連携は(53)式や(73)式など、水との連携は(53)式や(79)式などで考慮されている。

4. プラントモデルを基にした最適化問題の定式化

本章では、上述した SPM-TSCPOS-DES と制約を元に、JOP-TSCPOS-DES の定式化を行う。定式化の際には、SPM-TSCPOS-DES における変数から決定変数、補助変数、定数の選定が必要である。本稿では、最適化問題としての定式化に変数を使用する際、決定変数と補助変数の総称を単に最適化変数と呼び、パラメータと外生変数の総称を単に定数と呼ぶ。これらの選定により、SPM-TSCPOS-DES や制約が非線形となる場合は線形化を行う。また、求解にソルバーを用いるために式変形が必要な際も適宜、変形を行う。

4.1 添字と集合の定義

本稿では複数枚の STC の導入を検討する。i 枚目の STC を示す添字変数を STC 機器番号*i*と呼び、*i*の有限集合を $J \triangleq \{1, 2, \dots\}$ 、 J の元の個数を $|J|$ とする。

HPU の入出力稼働可能範囲を有限個の離散稼働段階に分け、その m 番目の稼働段階を示す添字変数を稼働段階番号 m と呼び、 m の有限集合を $\mathcal{M} \triangleq \{1, 2, \dots\}$ 、 \mathcal{M} の元の個数を $|\mathcal{M}|$ とする。

4.2 変数の定義

- $f_{\text{HPC},k}^{\text{out}}$ HPC の k の PSU への放電電力を
求めるための補助関数の値[kW]
- $f_{\text{HPC},k}^{\text{in}}$ HPC の k の PSU からの充電電力を
求めるための補助関数の値[kW]
- $P_{\text{HPC},k}^{\text{out}}$ HPC の k の PSU への放電電力[kW]
- $P_{\text{HPC},k}^{\text{in}}$ HPC の k の PSU からの充電電力[kW]
- $b_{\text{HPC},k}$ HPC の k の PSU への充放電状態[-]
(0 は PSU への放電, 1 は PSU からの充電)
(ただし, $P_{\text{HPC},k}^{\text{out}} = P_{\text{HPC},k}^{\text{in}} = 0$ のときは,
0 と 1 の両方を取り得る)
- $b_{e,k}$ e の k の HPC への充放電状態[-]

(0 は HPC への放電, 1 は HPC からの充電)
(ただし, $P_{e,k}^{\text{out}} = P_{e,k}^{\text{in}} = 0$ のときは,
0 と 1 の両方を取り得る) $\forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}$

- b_{HPC} HPC の導入状態(0 は非導入, 1 は導入)[-]
- $P_{e,k}^{\text{out}}$ e の k の HPC への放電電力[kW]
 $\forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}$
- $P_{e,k}^{\text{in}}$ e の k の HPC からの充電電力[kW]
 $\forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}$
- $P_{e',k}^{\text{out}}$ e' の k の e への放電電力[kW]
 $\forall (e', e) \in \{\text{BAT}, \text{BCD}\}, \{\text{BEV}, \text{VCD}\}$
- $P_{e',k}^{\text{in}}$ e' の k の e からの充電電力[kW]
 $\forall (e', e) \in \{\text{BAT}, \text{BCD}\}, \{\text{BEV}, \text{VCD}\}$
- b_e e の導入状態(0 は非導入, 1 は導入)[-]
 $\forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}, \text{BAT}, \text{BEV}, \text{GWH}, \text{HPU}, \text{GEV}\}$
- $P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}$ HPU の m の加熱における入力電力[kW]
- M Big M^{26} [kW/item or kW]
- ε small ε^{89} [kW/item or - or kW or m^3]
- $b_{\text{STC},k}$ STC の k の稼働状態(0: 停止, 1: 稼働)[-]
- $w_{\text{STC},k,i}$ 1 枚あたりの STC の k, i の出力熱力[kW/item]
- $w_{\text{STC},k,i}^{\text{cur}}$ 1 枚あたりの STC の k, i の
出力における抑制熱力[kW/item]
- $b_{\text{STC},i}$ STC の i の導入状態(0: 非導入, 1: 導入)[-]
- ζ 単位換算用の大きさ 1 の係数[item]
- $P_{\text{HPU},k,m}^{\text{heat}}$ HPU の k, m の加熱における入力電力[kW]
- $W_{\text{HPU},k,m}^{\text{heat}}$ HPU の k, m の加熱における出力熱力[kW]
- $b_{\text{HPU},k,m}^{\text{heat}}$ HPU の k, m の加熱における稼働状態[-]
(0: 非稼働, 1: 稼働)
- $b_{\text{ESM},k}$ ESM の k の売買電状態(0: 売電, 1: 買電)[-]
- $b_{\text{ESM},j}$ ESM の j の料金区分判定[-]
(0 は判定されなかった場合, 1 は判定された場合)
- $b_{\text{ESM},z}$ ESM の z の料金区分判定[-]
(0 は判定されなかった場合, 1 は判定された場合)
- $b_{\text{GSM},s}$ GSM の s の料金区分判定[-]
(0 は判定されなかった場合, 1 は判定された場合)
- $b_{\text{WSM},l}$ WSM の l の料金区分判定[-]
(0 は判定されなかった場合, 1 は判定された場合)
- $b_{\text{WSM},q}$ WSM の q の料金区分判定[-]
(0 は判定されなかった場合, 1 は判定された場合)
- N_e^{RM} e の既製品セット枚数[item] $\forall e \in \{\text{PVA}, \text{STC}\}$
- $C_{\text{HPU}}^{\text{heat, RM}}$ HPU の既製品容量[kW]
また、ホールダを利用して離散時間値 X_k を連続時間値 X_t にホールダする際には、 X_t は対応する X_k の零次ホールダで表せられるものとする。

4.3 最適化問題の定式化のためのモデルの線形化と変形

- (1) 太陽光発電アレイ(PVA)
- (3) 式, (4) 式を最適化問題の定式化前に計算し, \mathcal{K} を既

知, $c_{PVA}, \hat{p}_{PVA,k}, \hat{p}_{PVA,k}^{cur}$ を定数, N_{PVA} を決定変数と定義すると, (5)式, (6)式より, $C_{PVA}, P_{PVA,k}, P_{PVA,k}^{cur}$ は補助変数となる. これらに加え, (7)式を制約, (5)式, (6)式を補助変数の定義式と定義する. この場合, モデルは線形である.

(2) ハイブリッドパワーコンディショナー(HPC)

$\eta_{HPC}^{in}, \eta_{HPC}^{out}, \underline{C}_{HPC}, \bar{C}_{HPC}$ を定数, $P_{HPC,k}^{P2H}, P_{HPC,k}^{P2B}, P_{HPC,k}^{P2V}, P_{HPC,k}^{B2H}, P_{HPC,k}^{B2V}, P_{HPC,k}^{V2H}$ を決定変数と定義すると, $P_{PVA,k}$ は補助変数であるため, (8)式から(14)式より, $P_{HPC,k}^{cur}, P_{BCD,k}, P_{VCD,k}, f_{HPC,k}, \eta_{HPC,k}, P_{HPC,k}, C_{HPC}$ は補助変数となる.

このとき, (12)式は if 条件式の中に最適化変数 $f_{HPC,k}$ が含まれるため, 求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する. また, (13)式の右辺は最適化変数同士の乗算 $\eta_{HPC,k} f_{HPC,k}$ があるため, 非線形となる. 本定式化では, 自由変数 $f_{HPC,k}, P_{HPC,k}$ を非負変数へ分解し⁹⁰, Big M²⁶)とインジケータ変数²⁷)を用いることで, (12)式, (13)式を,

$$f_{HPC,k} \triangleq f_{HPC,k}^{out} - f_{HPC,k}^{in}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (132)$$

$$P_{HPC,k}^{out} \triangleq \eta_{HPC}^{out} f_{HPC,k}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (133)$$

$$P_{HPC,k}^{in} \triangleq \frac{1}{\eta_{HPC}^{in}} f_{HPC,k}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (134)$$

$$P_{HPC,k} \triangleq P_{HPC,k}^{out} - P_{HPC,k}^{in}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (135)$$

$$\begin{bmatrix} P_{HPC,k}^{out} \\ P_{HPC,k}^{in} \end{bmatrix} \leq \bar{C}_{HPC} \begin{bmatrix} 1 - b_{HPC,k} \\ b_{HPC,k} \end{bmatrix}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (136)$$

$$0 \leq f_{HPC,k}^{out}, 0 \leq f_{HPC,k}^{in}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (137)$$

$$b_{HPC,k} \in \{0,1\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (138)$$

と置き換えて線形化を行う. ここで, $f_{HPC,k}^{out}, f_{HPC,k}^{in}, P_{HPC,k}^{out}, P_{HPC,k}^{in}$ は分解された非負変数, \bar{C}_{HPC} は Big M, $b_{HPC,k}$ はインジケータ変数であり, $f_{HPC,k}^{out}, f_{HPC,k}^{in}, b_{HPC,k}$ は決定変数, $P_{HPC,k}^{out}, P_{HPC,k}^{in}$ は補助変数である. なお, (12)式で定義される $\eta_{HPC,k}$ は(133)式の η_{HPC}^{out} と(134)式の $1/\eta_{HPC}^{in}$ で代用されるため, (12)式は最適化問題へ含めないものとする. $\eta_{HPC,k}$ の導出は最適化問題の求解後に求解結果を(12)式に代入して求める.

また, (14)式は max 関数の引数に最適化変数 $P_{HPC,k}$ の絶対値が含まれるため非線形となる. 本定式化では, 絶対値の最大値最小化問題を線形化する定式化^{91, 92})を行うことで, HPC の設備容量最適化問題(OP-CP-HPC)として, (14)式を,

OP-CP-HPC:

$$\text{minimize } C_{HPC}, \quad (139)$$

$$\text{subject to } P_{HPC,k}^{out} + P_{HPC,k}^{in} \leq C_{HPC}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (140)$$

と置き換えて線形化を行う. ここで, C_{HPC} は上記の定式化により補助変数から決定変数に変更されている. OP-CP-HPC を親問題 JOP-TSCPOS-DES の子問題として同時に求解することで, 同時最適化問題(JOP)とする.

さらに, (15)式から(17)式は if 条件式の中に最適化変数 $P_{BCD,k}, P_{VCD,k}, P_{HPC,k}$ が含まれるため, 求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する. 本定式化では, Big M²⁶)とインジケータ変数²⁷)を用いることで, (15)式

から(17)式を,

$$-\bar{C}_{BCD} b_{BCD,k} \leq P_{HPC,k}^{B2H} \leq \bar{C}_{BCD} (1 - b_{BCD,k}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (141)$$

$$0 \leq P_{HPC,k}^{P2B} \leq \bar{C}_{BCD} b_{BCD,k}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (142)$$

$$-\bar{C}_{BCD} b_{BCD,k} \leq P_{HPC,k}^{B2V} \leq \bar{C}_{BCD} (1 - b_{BCD,k}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (143)$$

$$-\bar{C}_{VCD} b_{VCD,k} \leq P_{HPC,k}^{V2H} \leq \bar{C}_{VCD} (1 - b_{VCD,k}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (144)$$

$$0 \leq P_{HPC,k}^{P2V} \leq \bar{C}_{VCD} b_{VCD,k}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (145)$$

$$-\bar{C}_{VCD} (1 - b_{VCD,k}) \leq P_{HPC,k}^{B2V} \leq \bar{C}_{VCD} b_{VCD,k}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (146)$$

$$0 \leq P_{HPC,k}^{P2H} \leq \bar{C}_{HPC} (1 - b_{HPC,k}), \forall k \in \mathcal{K}, \quad (147)$$

$$-\bar{C}_{HPC} b_{HPC,k} \leq P_{HPC,k}^{B2H} \leq \bar{C}_{HPC} (1 - b_{HPC,k}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (148)$$

$$-\bar{C}_{HPC} b_{HPC,k} \leq P_{HPC,k}^{V2H} \leq \bar{C}_{HPC} (1 - b_{HPC,k}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (149)$$

$$b_{e,k} \in \{0,1\}, \forall e \in \{BCD, VCD\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (150)$$

と置き換える. ここで, $\bar{C}_{BCD}, \bar{C}_{VCD}, \bar{C}_{HPC}$ は Big M かつ定数, $b_{BCD,k}, b_{VCD,k}, b_{HPC,k}$ はインジケータ変数かつ決定変数である.

同様に, (18)式は if 条件式の中に最適化変数 C_{HPC} が含まれるため, 求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する. 本定式化では, インジケータ変数²⁷)を用いることで, (18)式を,

$$\underline{C}_{HPC} b_{HPC} \leq C_{HPC} \leq \bar{C}_{HPC} b_{HPC}, \quad (151)$$

$$b_{HPC} \in \{0,1\}, \quad (152)$$

と置き換える. ここで, b_{HPC} はインジケータ変数かつ決定変数である.

以上をまとめると, $\eta_{HPC}^{in}, \eta_{HPC}^{out}, \underline{C}_{HPC}, \bar{C}_{HPC}, \bar{C}_{BCD}, \bar{C}_{VCD}$ を定数, $P_{HPC,k}^{P2H}, P_{HPC,k}^{P2B}, P_{HPC,k}^{P2V}, P_{HPC,k}^{B2H}, P_{HPC,k}^{B2V}, P_{HPC,k}^{V2H}, f_{HPC,k}^{out}, f_{HPC,k}^{in}, b_{HPC,k}, C_{HPC}, b_{BCD,k}, b_{VCD,k}, b_{HPC}$ を決定変数, $P_{HPC,k}^{cur}, P_{BCD,k}, P_{VCD,k}, f_{HPC,k}, P_{HPC,k}, P_{HPC,k}^{out}, P_{HPC,k}^{in}$ を補助変数, (139)式を目的関数の一部, (19)式, (136)式から(138)式, (140)式から(152)式を制約, (8)式から(11)式, (132)式から(135)式を補助変数の定義式と定義する. なお, $\eta_{HPC,k}$ は最適化後に(12)式より求めるものとする.

(3) 蓄電池用充放電器(BCD)とバッテリー式電気自動車用充放電器(VCD)

$\eta_e^{in}, \eta_e^{out}, \underline{C}_e$, $\forall e \in \{BCD, VCD\}$ を定数と定義すると, $P_{e,k}$, $\forall e \in \{BCD, VCD\}$ は補助変数であるため, (20)式から(22)式より, $\eta_{e,k}, \forall e \in \{BCD, VCD\}, P_{e',k}, \forall e' \in \{BAT, BEV\}, C_e, \forall e \in \{BCD, VCD\}$ も補助変数となる.

このとき, (20)式は if 条件式の中に最適化変数 $P_{e,k}$ が含まれるため, 求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する. また, (21)式の右辺は最適化変数同士の乗算 $\eta_{e,k} P_{e,k}$ があるため, 非線形となる. 本定式化では, 自由変数 $P_{e,k}, P_{e',k}$ を非負変数へ分解し⁹⁰, Big M²⁶)とインジケータ変数²⁷)を用いることで, (20)式と(21)式を,

$$P_{e,k} \triangleq P_{e,k}^{out} - P_{e,k}^{in}, \forall e \in \{BCD, VCD\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (153)$$

$$P_{e',k}^{\text{out}} \triangleq \frac{1}{\eta_{e'}^{\text{out}}} P_{e,k}^{\text{out}}, \quad \forall (e, e') \in \{(\text{BCD}, \text{BAT}), (\text{VCD}, \text{BEV})\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (154)$$

$$P_{e',k}^{\text{in}} \triangleq \eta_{e'}^{\text{in}} P_{e,k}^{\text{in}}, \quad \forall (e, e') \in \{(\text{BCD}, \text{BAT}), (\text{VCD}, \text{BEV})\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (155)$$

$$P_{e',k} \triangleq P_{e',k}^{\text{out}} - P_{e',k}^{\text{in}}, \quad \forall e' \in \{\text{BAT}, \text{BEV}\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (156)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} P_{e,k}^{\text{out}} \\ P_{e,k}^{\text{in}} \end{bmatrix} \leq \bar{C}_e \begin{bmatrix} 1 - b_{e,k} \\ b_{e,k} \end{bmatrix}, \quad \forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (157)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 $P_{e,k}^{\text{out}}, P_{e,k}^{\text{in}}, P_{e',k}^{\text{out}}$ は分解された非負変数、 \bar{C}_e は Big M、 $b_{e,k}$ はインジケータ変数であり、 $P_{e,k}^{\text{out}}, P_{e,k}^{\text{in}}$ は決定変数、 $P_{e',k}^{\text{out}}, P_{e',k}^{\text{in}}$ は補助変数である。なお、(20)式で定義される $\eta_{e,k}$ は(154)式の $1/\eta_{e'}^{\text{out}}$ と(155)式の $\eta_{e'}^{\text{in}}$ で代用されるため、(20)式は最適化問題へ含めないものとする。 $\eta_{e,k}$ の導出は最適化問題の求解後に求解結果を(20)式に代入して求める。

また、(22)式は \max 関数の引数に最適化変数 $P_{e,k}$ の絶対値が含まれるため非線形となる。本定式化では、絶対値の最大値最小化問題を線形化する定式化^{91), 92)}を行うことで、BCD と VCD の設備容量最適化問題(OP-CP- e , $\forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}$)として、(22)式を、

$$\text{OP-CP-}e, \forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}: \quad \text{minimize } C_e, \quad (158)$$

$$\text{subject to } P_{e,k}^{\text{out}} + P_{e,k}^{\text{in}} \leq C_e, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (159)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 C_e は上記の定式化により補助変数から決定変数に変更されている。OP-CP- e , $\forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}$ を親問題 JOP-TSCPOS-DES の子問題として同時に求解することで、同時最適化問題(JOP)とする。

さらに、(23)式は if 条件式の中に最適化変数 C_e が含まれるため、求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。本定式化では、インジケータ変数²⁷⁾を用いることで、(23)式を、

$$\underline{C}_e b_e \leq C_e \leq \bar{C}_e b_e, \quad \forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}, \quad (160)$$

$$b_e \in \{0,1\}, \quad \forall e \in \{\text{BCD}, \text{VCD}\}, \quad (161)$$

と置き換える。ここで、 b_e はインジケータ変数かつ決定変数である。

以上をまとめると、 $\eta_{e'}^{\text{in}}, \eta_{e'}^{\text{out}}, \underline{C}_e$ を定数、 $P_{e,k}^{\text{out}}, P_{e,k}^{\text{in}}, C_e, b_e$ を決定変数、 $P_{e',k}, P_{e',k}^{\text{out}}, P_{e',k}^{\text{in}}$ を補助変数、(158)式を目的関数の一部、(157)式、(159)式から(161)式を制約、(153)式から(156)式を補助変数の定義式と定義する。なお、 $\eta_{e,k}$ は最適化後に(20)式より求めるものとする。

(4) バッテリー式電気自動車走行時電力負荷(REL)とガソリンエンジン車走行時ガソリン負荷(RGL)

(24)式を最適化問題の定式化前に計算し、 $\hat{P}_{\text{REL},k}, \hat{v}_{\text{RGL},k}$ を定数と定義する。

(5) 蓄電池(BAT)とバッテリー式電気自動車(BEV)

\mathcal{K}' を既知、 $\eta_{e'}^{\text{in}}, \eta_{e'}^{\text{out}}, \alpha_{e'}, r_{e',k}^{\text{SOC}}, r_{e',k}^{\text{SOC}}, \forall e' \in \{\text{BAT}, \text{BEV}\}, \Delta k, C_{\text{GEV}}^{\text{RM}}, C_{\text{BEV}}^{\text{RM}}, I_{\text{BEV}}^{\text{SOC,sug}}, \hat{b}_{\text{REL},k}, \underline{C}_{\text{BAT}}, \bar{C}_{\text{BAT}}$ を定数、 $E_{e',k}|_{k=1}$ を決定変数、 $C_{\text{BEV}}, C_{\text{GEV}}$ を後述の通り補助変数と定義すると、

$\hat{P}_{\text{REL},k}$ は定数、 $P_{e',k}$ は補助変数であるため、(25)式、(26)式、(28)式から(30)式より、 $\eta_{e',k}, f_{e',k}, \{E_{e',k}\}_{k \in \mathcal{K}' \setminus \{1\}}, C_{\text{BAT}}, r_{e',k}^{\text{SOC}}$ も補助変数となる。

このとき、(25)式は if 条件式の中に最適化変数 $P_{e',k}$ が含まれるため、求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。また、(28)式の右辺は最適化変数同士の乗算 $\eta_{e',k} P_{e',k}$ があるため、非線形となる。本定式化では、(153)式から(157)式にかけての定式化で使用した非負変数を用いることで、(25)式と(28)式を、

$$E_{e',k+1} \triangleq (1 - \alpha_{e'} \Delta k) E_{e',k} - \frac{1}{\eta_{e'}^{\text{out}}} P_{e',k}^{\text{out}} \Delta k + \eta_{e'}^{\text{in}} P_{e',k}^{\text{in}} \Delta k - f_{e',k} \Delta k, \quad \forall e' \in \{\text{BAT}, \text{BEV}\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (162)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 $P_{e',k}^{\text{out}}, P_{e',k}^{\text{in}}$ は分解された非負変数である。なお、(25)式で定義される $\eta_{e',k}$ は(162)式の $1/\eta_{e'}^{\text{out}}$ と $\eta_{e'}^{\text{in}}$ で代用されるため、(25)式は最適化問題へ含めないものとする。 $\eta_{e',k}$ の導出は最適化問題の求解後に求解結果を(25)式に代入して求める。

また、(26)式と(31)式は if 条件式の中に最適化変数 C_{BEV} が含まれるため、求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。本定式化では、インジケータ変数²⁷⁾を用いることで、(26)式と(31)式を、

$$f_{e',k} \triangleq \begin{cases} 0 & \text{if } e' = \text{BAT} \\ \hat{P}_{\text{REL},k} b_{\text{BEV}} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall e' \in \{\text{BAT}, \text{BEV}\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (163)$$

$$C_e \triangleq C_e^{\text{RM}} b_e, \quad \forall e \in \{\text{BEV}, \text{GEV}\}, \quad (164)$$

$$b_{\text{GEV}} \triangleq 1 - b_{\text{BEV}}, \quad (165)$$

$$b_{\text{BEV}} \in \{0,1\}, \quad (166)$$

$$b_{\text{GEV}} \in \{0,1\}, \quad (167)$$

と置き換える。ここで、 b_{BEV} はインジケータ変数かつ決定変数、 b_{GEV} はインジケータ変数かつ補助変数である。なお、前述で触れた $C_{\text{BEV}}, C_{\text{GEV}}$ は(164)式から補助変数となること分かる。

また、(29)式は \max 関数の引数に最適化変数 $E_{\text{BAT},k}$ が含まれるため非線形となる。本定式化では、最大値最小化問題を線形化する定式化⁹¹⁾を行うことで、BAT の設備容量最適化問題(OP-CP-BAT)として、(29)式を、

$$\text{OP-CP-BAT:} \quad \text{minimize } C_{\text{BAT}}, \quad (168)$$

$$\text{subject to } E_{\text{BAT},k} \leq \bar{r}_{\text{BAT},k}^{\text{SOC}} C_{\text{BAT}}, \quad \forall k \in \mathcal{K}', \quad (169)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 C_{BAT} は上記の定式化により補助変数から決定変数に変更されている。OP-CP-BAT を親問題 JOP-TSCPOS-DES の子問題として同時に求解することで、同時最適化問題(JOP)とする。なお、(169)式は(32)式に含まれるため、(32)式を制約と定義する場合、(169)式は最適化問題へ含める必要はない。

さらに、(30)式は if 条件式の中に最適化変数 C_e が含まれるため、通常は求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。また、if 条件下での定義式に最適化変数同士の除算 $E_{e',k}/C_{e'}$ があるため非線形となる。なお、

本定式化では、 $r_{e',k}^{\text{SOC}}$ は他の定義式や制約に影響しないため、最適化問題へ含めず、(30)式の変形と線形化は行わない。 $r_{e',k}^{\text{SOC}}$ の導出は最適化問題の求解後に求解結果を(30)式に代入して求める。

他に、(33)式と(34)式はif条件式を含むものの、 $\hat{b}_{\text{REL},k}$ を定数と定義したため、その条件式の引数として最適化変数は含まれない。ゆえに、最適化問題の定式化前にif条件の判別が行え、かつ、各if条件下での定義式は線形であるため、ソルバーへの適応に問題はなく、(33)式と(34)式を変形する必要はない。

これらに加えて、(36)式はif条件式の中に最適化変数 C_{BAT} が含まれるため、求解にソルバーを用いるためにif条件式を含まない形に変形する。本定式化では、インジケータ変数 $27)$ を用いることで、(36)式を、

$$\underline{C}_{\text{BAT}} b_{\text{BAT}} \leq C_{\text{BAT}} \leq \bar{C}_{\text{BAT}} b_{\text{BAT}}, \quad (170)$$

$$b_{\text{BAT}} \in \{0,1\}, \quad (171)$$

と置き換える。ここで、 b_{BAT} はインジケータ変数かつ決定変数である。

以上をまとめると、 \mathcal{K}' を既知、 $\eta_{e'}^{\text{in}}, \eta_{e'}^{\text{out}}, \alpha_{e'}, r_{e',k}^{\text{SOC}}, \bar{r}_{e',k}^{\text{SOC}}, \Delta k, C_{\text{GEV}}^{\text{RM}}, C_{\text{BEV}}^{\text{RM}}, L_{\text{BEV}}^{\text{SOC,sug}}, \hat{b}_{\text{REL},k}, \underline{C}_{\text{BAT}}, \bar{C}_{\text{BAT}}$ を定数、 $E_{e',k}|_{k=1}, b_{\text{BEV}}, C_{\text{BAT}}, b_{\text{BAT}}$ を決定変数、 $C_{\text{BEV}}, C_{\text{GEV}}, f_{e',k}, \{E_{e',k}\}_{k \in \mathcal{K}' \setminus \{1\}}, b_{\text{GEV}}$ を補助変数、(168)式を目的関数の一部、(32)式から(35)式、(166)、(167)式、(170)式、(171)式を制約、(162)式から(165)式を補助変数の定義式と定義する。なお、 $\eta_{e',k}, r_{e',k}^{\text{SOC}}$ は最適化後にそれぞれ(25)式、(30)式より求めるものとする。

(6) 電力切替ユニット(PSU)

$\hat{P}_{\text{AEL},k}, \bar{C}_{\text{PSU}}$ を定数、 $P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}, C_{\text{ESM}}$ を後述の通り補助変数と定義すると、 C_{HPC} は決定変数であるため、(37)式より、 C_{PSU} は補助変数となる。

このとき、(37)式はif条件式の中に最適化変数 C_{HPC} が含まれるため、求解にソルバーを用いるためにif条件式を含まない形に変形する。また、if条件下での定義式にmax関数が含まれ、max関数の引数に最適化変数 $C_{\text{HPC}}, P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}, C_{\text{ESM}}$ が含まれるため非線形となる。本定式化では、最大値最小化問題を線形化する定式化⁹¹⁾を行い、Big M²⁶⁾とインジケータ変数 $27)$ を組み合わせることで、PSUの設備容量最適化問題(OP-CP-PSU)として、(37)式を、

OP-CP-PSU:

$$\text{minimize } C_{\text{PSU}}, \quad (172)$$

$$\text{subject to } C_{\text{HPC}} \leq C_{\text{PSU}}, \quad (173)$$

$$\hat{P}_{\text{AEL},k} + P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}} \leq C_{\text{PSU}} + \left(\max_{k \in \mathcal{K}} \hat{P}_{\text{AEL},k} + \max_{m \in \mathcal{M}} P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}} \right) (1 - b_{\text{HPC}}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (174)$$

$$C_{\text{ESM}} \leq C_{\text{PSU}} + \max_{j \in \mathcal{J}} \bar{C}_{\text{ESM},j}^{\text{use}} (1 - b_{\text{HPC}}), \quad (175)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 C_{PSU} は上記の定式化により補助変数から決定変数に変更されており、 \mathcal{M}, \mathcal{J} は既知、 $\max_{k \in \mathcal{K}} \hat{P}_{\text{AEL},k} + \max_{m \in \mathcal{M}} P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}, \max_{j \in \mathcal{J}} \bar{C}_{\text{ESM},j}^{\text{use}}$ はBig Mかつ定数、 b_{HPC} はインジケータ変数である。なお、(37)式の内部 max

関数 $\max_{k \in \mathcal{K}} (\hat{P}_{\text{AEL},k} + P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}})$ は $\max_{k \in \mathcal{K}} \hat{P}_{\text{AEL},k} + \max_{m \in \mathcal{M}} P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}$ へ置き換えられている。このとき、各max関数の引数 $\hat{P}_{\text{AEL},k}, P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}$ は定数であるため、 $\max_{k \in \mathcal{K}} \hat{P}_{\text{AEL},k} + \max_{m \in \mathcal{M}} P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}$ の値を定式化前に算出し、定数と扱うことで、(174)式と(175)式を線形式として扱う。OP-CP-PSUを親問題JOP-TSCPOS-DESの子問題として同時に求解することで、同時最適化問題(JOP)とする。

また、(38)式はif条件式の中に最適化変数 C_{HPC} が含まれるため、求解にソルバーを用いるためにif条件式を含まない形に変形する。本定式化では、インジケータ変数 $27)$ を用いることで、(38)式を、

$$C_{\text{PSU}} \leq \bar{C}_{\text{PSU}} b_{\text{HPC}}, \quad (176)$$

と置き換える。ここで、 b_{HPC} はインジケータ変数である。

以上をまとめると、 $\hat{P}_{\text{AEL},k}, \bar{C}_{\text{PSU}}, \mathcal{M}, P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}, \mathcal{J}, \bar{C}_{\text{ESM},j}^{\text{use}}$ を定数、 C_{PSU} を決定変数、 $P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}, C_{\text{ESM}}$ を補助変数、(172)式を目的関数の一部、(173)式から(176)式を制約と定義する。

(7) スマート分電盤(SDB)

\bar{C}_{SDB} を定数、 $C_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$ を後述の通り決定変数と定義すると、 $\hat{P}_{\text{AEL},k}$ は定数、 $P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}$ は補助変数であるため、(39)式より、 C_{SDB} は補助変数となる。

このとき、(39)式はif条件式の中に最適化変数 $C_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$ が含まれるため、求解にソルバーを用いるためにif条件式を含まない形に変形する。また、if条件下での定義式にmax関数が含まれ、max関数の引数に最適化変数 $P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}$ が含まれるため非線形となる。本定式化では、最大値最小化問題を線形化する定式化⁹¹⁾を行い、Big M²⁶⁾とインジケータ変数 $27)$ を組み合わせることで、SDBの設備容量最適化問題(OP-CP-SDB)として、(39)式を、

OP-CP-SDB:

$$\text{minimize } C_{\text{SDB}}, \quad (177)$$

$$\text{subject to } \hat{P}_{\text{AEL},k} + P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}} \leq C_{\text{SDB}} + \left(\max_{k \in \mathcal{K}} \hat{P}_{\text{AEL},k} + \max_{m \in \mathcal{M}} P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}} \right) (1 - b_{\text{HPU}}), \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad (178)$$

$$b_{\text{HPU}} \in \{0,1\}, \quad (179)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 C_{SDB} は上記の定式化により補助変数から決定変数に変更されており、 $\max_{k \in \mathcal{K}} \hat{P}_{\text{AEL},k} + \max_{m \in \mathcal{M}} P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}$ はBig Mかつ定数、 b_{HPU} はインジケータ変数かつ決定変数である。なお、(39)式のmax関数 $\max_{k \in \mathcal{K}} (\hat{P}_{\text{AEL},k} + P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}})$ は $\max_{k \in \mathcal{K}} \hat{P}_{\text{AEL},k} + \max_{m \in \mathcal{M}} P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}$ へ置き換えられている。このとき、各max関数の引数 $\hat{P}_{\text{AEL},k}, P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}$ は定数であるため、 $\max_{k \in \mathcal{K}} \hat{P}_{\text{AEL},k} + \max_{m \in \mathcal{M}} P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}$ の値を定式化前に算出し、定数と扱うことで、(178)式を線形式として扱う。OP-CP-SDBを親問題JOP-TSCPOS-DESの子問題として同時に求解することで、同時最適化問題(JOP)とする。

また、(40)式はif条件式の中に最適化変数 $C_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$ が含まれるため、求解にソルバーを用いるためにif条件式を含まない形に変形する。本定式化では、インジケータ変数 $27)$ を用いることで、(40)式を、

$$0 \leq C_{SDB} \leq \bar{C}_{SDB} b_{HPU}, \quad (180)$$

と置き換える。ここで、 b_{HPU} はインジケータ変数ある。

以上をまとめると、 \bar{C}_{SDB} を定数、 $b_{HPU}, C_{HPU}^{heat}, C_{SDB}$ を決定変数、(177)式を目的関数の一部、(178)式から(180)式を制約と定義する。

(8) ガス給湯機(GWH)

$\eta_{GWH}, q^{gas}, \underline{C}_{GWH}, \bar{C}_{GWH}$ を定数、 $u_{GWH,k}$ を決定変数と定義すると、(41)式、(42)式より、 $W_{GWH,k}, C_{GWH}$ は補助変数となる。

このとき、(42)式は \max 関数の引数に最適化変数 $W_{GWH,k}$ が含まれるため非線形となる。本定式化では、最大値最小化問題を線形化する定式化⁹¹⁾を行うことで、GWHの設備容量最適化問題(OP-CP-GWH)として、(42)式を、

OP-CP-GWH:

$$\text{minimize } C_{GWH}, \quad (181)$$

$$\text{subject to } W_{GWH,k} \leq C_{GWH}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (182)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 C_{GWH} は上記の定式化により補助変数から決定変数に変更されている。OP-CP-GWHを親問題 JOP-TSCPOS-DESの子問題として同時に求解することで、同時最適化問題(JOP)とする。

また、(44)式は if 条件式の中に最適化変数 C_{GWH} が含まれるため、求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。本定式化では、インジケータ変数²⁷⁾を用いることで、(44)式を、

$$\underline{C}_{GWH} b_{GWH} \leq C_{GWH} \leq \bar{C}_{GWH} b_{GWH}, \quad (183)$$

$$b_{GWH} \in \{0,1\}, \quad (184)$$

と置き換える。ここで、 b_{GWH} はインジケータ変数かつ決定変数である。

以上をまとめると、 $\eta_{GWH}, q^{gas}, \underline{C}_{GWH}, \bar{C}_{GWH}$ を定数、 $u_{GWH,k}, C_{GWH}, b_{GWH}$ を決定変数、 $W_{GWH,k}$ を補助変数、(181)式を目的関数の一部、(43)式、(182)式から(184)式を制約、(41)式を補助変数の定義式と定義する。

(9) 貯湯槽(HWT)

(46)式、(47)式、(50)式、(55)式、(57)式を最適化問題の定式化前に計算し、 $\hat{V}_{HWT,k}, \alpha^{water}, \hat{v}_{HWT,k}^{out}, \hat{W}_{HWT,k}^{in}, \beta_{HWT}, A_{HWT}, \hat{T}_k, C_{HWT}, \hat{r}_{HWT,k}^{SOH}, \bar{r}_{HWT,k}^{SOH}, T_{HWT,k}, \bar{T}_{HWT,k}$ を定数、 $T_{HWT,k}|_{k=1}, T_{HPU,k+1}^{heat}$ を決定変数、 $W_{STC,k}, W_{HPU,k}^{heat}$ を後述の通り補助変数と定義する。(54)式より、 $\{T_{HWT,k}\}_{k \in \mathcal{K} \setminus \{1\}}$ は補助変数であるため、(48)式、(49)式、(51)式、(56)式より、 $Q_{HWT,k}, W_{HWT,k}^{out}, W_{HWT,k}^{loss}, r_{HWT,k}^{SOH}$ も補助変数となる。

このとき、(54)式の導出元となる(41)式、(48)式、(49)式、(51)式、(53)式および(66)式を最適化問題に含める場合、(54)式を陽に最適化問題に含める必要はない。

また、本定式化では、 $r_{HWT,k}^{SOH}$ は他の定義式や制約に影響しないため、最適化問題へ含めない。 $r_{HWT,k}^{SOH}$ の導出は最適化問題の求解後に求解結果を(56)式に代入して求める。

なお、(59)式において、 \max 関数 $\max(\hat{T}_k, T_{HWT,k})$ の引数

$\hat{T}_k, T_{HWT,k}$ は定数である。ゆえに、 $\max(\hat{T}_k, T_{HWT,k})$ の値を定式化前に算出し、定数と扱うことで、(59)式を線形式として扱う。

以上をまとめると、 $\hat{V}_{HWT,k}, \alpha^{water}, \hat{v}_{HWT,k}^{out}, \hat{W}_{HWT,k}^{in}, \beta_{HWT}, A_{HWT}, \hat{T}_k, C_{HWT}, \hat{r}_{HWT,k}^{SOH}, \bar{r}_{HWT,k}^{SOH}, T_{HWT,k}, \bar{T}_{HWT,k}$ を定数、 $T_{HWT,k}|_{k=1}, T_{HPU,k+1}^{heat}$ を決定変数、 $W_{STC,k}, W_{HPU,k}^{heat}, \{T_{HWT,k}\}_{k \in \mathcal{K} \setminus \{1\}}, Q_{HWT,k}, W_{HWT,k}^{out}, W_{HWT,k}^{loss}$ を補助変数、(58)式、(59)式を制約、(48)式、(49)式、(51)式、(53)式を補助変数の定義式と定義する。なお、 $r_{HWT,k}^{SOH}$ は最適化後に(56)式より求めるものとする。

(10) 太陽熱集熱器(STC)

$\alpha_{STC}, \hat{H}_k, \beta_{STC}, F_{STC}, a_{STC}, \alpha_{pVA}, A^{roof}$ を定数、 $N_{STC}, W_{STC,k}$ を後述の通り補助変数と定義すると、 $T_{HWT,k}$ は補助変数であるため、(60)式から(62)式より、 $f_{STC,k}^{gen}, w_{STC,k}^{gen}, W_{STC,k}^{cur}$ も補助変数となる。

このとき、(61)式は if 条件式の中に最適化変数 $f_{STC,k}^{gen}$ が含まれるため、求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。本定式化では、Big M²⁶⁾、small ε ⁸⁹⁾、インジケータ変数²⁷⁾を用いることで、(61)式を、

$$-M(1 - b_{STC,k}) \leq f_{STC,k}^{gen} \leq M b_{STC,k} - \varepsilon(1 - b_{STC,k}), \forall k \in \mathcal{K}, \quad (185)$$

$$0 \leq w_{STC,k}^{gen} \leq M b_{STC,k}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (186)$$

$$-M(1 - b_{STC,k}) \leq w_{STC,k}^{gen} - f_{STC,k}^{gen} \leq M(1 - b_{STC,k}), \forall k \in \mathcal{K}, \quad (187)$$

$$b_{STC,k} \in \{0,1\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (188)$$

と置き換える。ここで、 $w_{STC,k}^{gen}$ は上記の定式化により補助変数から決定変数に変更されており、 M はBig Mかつ定数、 ε はsmall ε かつ定数、 $b_{STC,k}$ はインジケータ変数かつ決定変数である。

また、(62)式の右辺は最適化変数同士の乗算 $w_{STC,k}^{gen} N_{STC}$ があるため、非線形となる。本定式化では、STC 1枚ごとに出力熱力 $w_{STC,k,i}$ 等の最適化変数を定め、 N_{STC} の最小化問題として定式化⁹¹⁾を行い、Big M²⁶⁾とインジケータ変数²⁷⁾を組み合わせることで、STCの設備容量最適化問題(OP-CP-STC)として、(62)式から(64)式を、

OP-CP-STC:

$$\text{minimize } N_{STC}, \quad (189)$$

$$\text{subject to } -M(1 - b_{STC,i}) \leq w_{STC,k,i} + w_{STC,k,i}^{cur} - w_{STC,k,i}^{gen} \leq M(1 - b_{STC,i}), \forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{J}, \quad (190)$$

$$w_{STC,k,i} + w_{STC,k,i}^{cur} \leq M b_{STC,i}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{J}, \quad (191)$$

$$0 \leq w_{STC,k,i}, 0 \leq w_{STC,k,i}^{cur}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{J}, \quad (192)$$

$$b_{STC,i} \in \{0,1\}, \forall i \in \mathcal{J}. \quad (193)$$

$$\text{where } \begin{bmatrix} W_{STC,k} \\ W_{STC,k}^{cur} \\ N_{STC} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \sum_{i \in \mathcal{J}} w_{STC,k,i} \\ \sum_{i \in \mathcal{J}} w_{STC,k,i}^{cur} \\ \sum_{i \in \mathcal{J}} b_{STC,i} \end{bmatrix} \zeta, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (194)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 \mathcal{J} は既知、 M はBig Mかつ定数、 $b_{STC,i}$ はインジケータ変数かつ決定変数、 $w_{STC,k,i}, w_{STC,k,i}^{cur}$ は決定変数、 ζ は単位換算用の大きさ1の係

数かつ定数($\zeta \triangleq 1$ [item])である。なお、前述で触れた $N_{STC}, W_{STC,k}$ は(194)式から補助変数となることが分かる。OP-CP-STC を親問題 JOP-TSCPOS-DES の子問題として同時に求解することで、同時最適化問題(JOP)とする。

以上をまとめると、 $\alpha_{STC}, \hat{H}_k, \beta_{STC}, F_{STC}, a_{STC}, a_{PVA}, A^{roof}M, \varepsilon, \zeta$ を定数、 $w_{STC,k}^{gen}, b_{STC,k}, w_{STC,k,i}, w_{STC,k,i}^{cur}, b_{STC,i}$ を決定変数、 $N_{STC}, W_{STC,k}, f_{STC,k}^{gen}, W_{STC,k}^{cur}$ を補助変数、(189)式を目的関数の一部、(65)式、(185)式から(188)式、(190)式から(193)式を制約、(60)式と(194)式を補助変数の定義式と定義する。

(11) 空気熱ヒートポンプユニット(HPU)

(70)式を最適化問題の定式化前に計算し、 $\hat{\eta}_{HPU,k}, \alpha_{HPU}^{heat}, \beta_{HPU}^{heat}, \gamma_{HPU}^{heat}, \delta_{HPU}^{heat}, \underline{C}_{HPU}^{heat}, \bar{C}_{HPU}^{heat}$ を定数と定義すると、 $\alpha^{water}, \hat{V}_{HWT,k}, \Delta k, \hat{W}_{HWT,k}^{in}$ は定数、 $\{T_{HPU,k}^{heat}\}_{k \in \mathcal{K} \setminus \{1\}}$ は決定変数、

$T_{HWT,k}, W_{HWT,k}^{out}$ は補助変数であるため、(66)式から(76)式より、 $W_{HPU,k}^{heat}, T_{HPU,k}^{heat} |_{k=1}, T_{HPU,k}^{heat,on}, r_{HPU,k}^{COP,heat}, r_{HPU,k}^{COP,heat,on}, p_{HPU,k}^{heat}, E_{HPU}^{heat}, Q_{HPU}^{heat}, C_{HPU}^{heat}$ も補助変数である。なお、前述で触れた $W_{HPU,k}^{heat}, p_{HPU,k}^{heat}$ はそれぞれ(66)式、(73)式より補助変数となることが分かる。

このとき、(68)式、(72)式は if 条件式の中に最適化変数 $p_{HPU,k}^{heat}$ が含まれるため、通常は求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。なお、本定式化では、 $T_{HPU,k+1}^{heat,on}, r_{HPU,k}^{COP,heat,on}$ は他の定義式や制約に影響しないため、最適化問題へ含めず、(68)式と(72)式の変形は行わない。同様に、(69)式、(74)式、(75)式も他の定義式や制約に影響しないため最適化問題へ含めない。これらの式に含まれる $T_{HPU,k}^{heat,on}, r_{HPU,k}^{COP,heat,on}, E_{HPU}^{heat}, Q_{HPU}^{heat}$ の導出は最適化問題の求解後に求解結果を(68)式、(69)式、(72)式、(74)式、(75)式に代入して求める。

また、(73)式の右辺は最適化変数同士の除算 $W_{HPU,k}^{heat}/r_{HPU,k}^{COP,heat}$ があるため、非線形となる。さらに、(78)式は単純不等号<が含まれるため、求解にソルバーを用いるために等号付不等号 \leq の形に変形する。本定式化では、 $p_{HPU,k}^{heat}$ の稼働可能範囲を有限個の離散稼働段階に分け、Big M²⁶⁾, small ε ⁸⁹⁾, インジケータ変数²⁷⁾を用いることで、(73)式と(78)式を、

$$\begin{bmatrix} p_{HPU,k}^{heat} \\ W_{HPU,k}^{heat} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \sum_{m \in \mathcal{M}} p_{HPU,k,m}^{heat} \\ \sum_{m \in \mathcal{M}} W_{HPU,k,m}^{heat} \end{bmatrix}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (195)$$

$$p_{HPU,k,m}^{heat} \triangleq p_{HPU,m}^{heat} b_{HPU,k,m}^{heat}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}, \quad (196)$$

$$-M(1 - b_{HPU,k,m}^{heat}) \leq W_{HPU,k,m}^{heat} - p_{HPU,m}^{heat} r_{HPU,k}^{COP,heat} \leq M(1 - b_{HPU,k,m}^{heat}), \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}, \quad (197)$$

$$0 \leq W_{HPU,k,m}^{heat} \leq M b_{HPU,k,m}^{heat}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}, \quad (198)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} b_{HPU,k,m}^{heat} \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (199)$$

$$\varepsilon \leq r_{HPU,k}^{COP,heat}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (200)$$

$$b_{HPU,k,m}^{heat} \in \{0,1\}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall m \in \mathcal{M}, \quad (201)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 $p_{HPU,m}^{heat}$ は離散稼働段階番号 m での $p_{HPU,k,m}^{heat}$ の値、 M は Big M、 ε は small ε 、 $b_{HPU,k,m}^{heat}$ はインジケータ変数かつ決定変数、 $W_{HPU,k,m}^{heat}$ は決定変数、 $p_{HPU,k,m}^{heat}$ は補助変数である。

また、(76)式は max 関数の引数に最適化変数 $W_{HPU,k}^{heat}$ が含まれるため非線形となる。本定式化では、最大値最小化問題を線形化する定式化⁹¹⁾を行うことで、HPU の設備容量最適化問題(OP-CP-HPU)として、(76)式を、

OP-CP-HPU:

$$\text{minimize } C_{HPU}^{heat}, \quad (202)$$

$$\text{subject to } W_{HPU,k}^{heat} \leq C_{HPU}^{heat}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (203)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 C_{HPU}^{heat} は上記の定式化により補助変数から決定変数に変更されている。OP-CP-HPU を親問題 JOP-TSCPOS-DES の子問題として同時に求解することで、同時最適化問題(JOP)とする。

さらに、(77)式は if 条件式の中に最適化変数 C_{HPU}^{heat} が含まれるため、求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。本定式化では、インジケータ変数²⁷⁾を用いることで、(77)式を、

$$\underline{C}_{HPU}^{heat} b_{HPU} \leq C_{HPU}^{heat} \leq \bar{C}_{HPU}^{heat} b_{HPU}, \quad (204)$$

と置き換える。ここで、 b_{HPU} はインジケータ変数である。

以上をまとめると、 $\hat{\eta}_{HPU,k}, \alpha_{HPU}^{heat}, \beta_{HPU}^{heat}, \gamma_{HPU}^{heat}, \delta_{HPU}^{heat}, \underline{C}_{HPU}^{heat}, \bar{C}_{HPU}^{heat}$ を定数、 $\{T_{HPU,k}^{heat}\}_{k \in \mathcal{K} \setminus \{1\}}, W_{HPU,k,m}^{heat}, b_{HPU,k,m}^{heat}, C_{HPU}^{heat}$ を決定変数、 $T_{HPU,k}^{heat} |_{k=1}, r_{HPU,k}^{COP,heat}, p_{HPU,k,m}^{heat}$ を補助変数、(202)式を目的関数の一部、(197)式から(201)式、(203)式、(204)式を制約、(66)式、(67)式、(71)式、(195)式、(196)式を補助変数の定義式と定義する。なお、 $T_{HPU,k}^{heat,on}, r_{HPU,k}^{COP,heat,on}, E_{HPU}^{heat}, Q_{HPU}^{heat}$ は最適化後にそれぞれ(68)式と(69)式、(72)式、(74)式、(75)式より求めるものとする。

(12) 給湯負荷(HWL)

$\hat{T}_k^{tap}, \hat{T}_{HWL,k}, \hat{v}_{HWL,k}$ を定数と定義すると、 $W_{HWT,k}^{out}$ は補助変数であるため、(79)式より $v_{HWL,k}^{dilute}$ も補助変数である。これに加えて、(80)式、(81)式を制約、(79)式を補助変数の定義式と定義する。

(13) 電力スマートメータ(ESM)

$\hat{E}_{ESM}^{buy,start}, \hat{E}_{ESM}^{sell,start}, \bar{C}_{ESM}$ を定数と定義すると、 $\hat{P}_{AEL,k}, \Delta k$ は定数、 $p_{HPU,k}^{heat}, p_{HPC,k}$ は補助変数であるため、(82)式、(83)式(85)式から(88)式より $p_{ESM,k}, p_{ESM,k}^{buy}, p_{ESM,k}^{sell}, E_{ESM,k}^{buy}, E_{ESM,k}^{sell}, E_{ESM,k}, C_{ESM}^{use}$ も補助変数である。

このとき、(83)式は if 条件式の中に最適化変数 $p_{ESM,k}$ が含まれるため、求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。本定式化では、Big M²⁶⁾とインジケータ変数²⁷⁾を用いることで、(83)式を、

$$p_{ESM,k} \triangleq p_{ESM,k}^{buy} - p_{ESM,k}^{sell}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (205)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} p_{ESM,k}^{buy} \\ p_{ESM,k}^{sell} \end{bmatrix} \leq \bar{C}_{ESM} \begin{bmatrix} b_{ESM,k} \\ 1 - b_{ESM,k} \end{bmatrix}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (206)$$

$$b_{ESM,k} \in \{0,1\}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (207)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 $p_{ESM,k}^{buy}, p_{ESM,k}^{sell}$ は上記の定式化により補助変数から決定変数に変更されており、 \bar{C}_{ESM} は Big M、 $b_{ESM,k}$ はインジケータ変数かつ決定変数である。なお、(89)式は(206)式に包含されるため、(206)式

を制約と定義する場合、(89)式は最適化問題へ含める必要はない。

また、(88)式は \max 関数の引数に最適化変数 $P_{ESM,k}$ の絶対値が含まれるため非線形となる。本定式化では、絶対値の最大値最小化問題を線形化する定式化^{91), 92)}を行うことで、ESM の利用容量最適化問題(OP-CP-ESM)として、(88)式を、

$$\text{OP-CP-ESM:} \\ \text{minimize } C_{ESM}^{\text{use}}, \quad (208)$$

$$\text{subject to } P_{ESM,k}^{\text{buy}} + P_{ESM,k}^{\text{sell}} \leq C_{ESM}^{\text{use}}, \forall k \in \mathcal{K}, \quad (209)$$

と置き換えて線形化を行う。OP-CP-ESM を親問題 JOP-TSCPOS-DES の子問題として同時に求解することで、同時最適化問題(JOP)とする。

以上をまとめると、 $\hat{E}_{ESM}^{\text{buy,start}}, \hat{E}_{ESM}^{\text{sell,start}}, \bar{C}_{ESM}$ を定数、 $P_{ESM,k}^{\text{buy}}, P_{ESM,k}^{\text{sell}}, b_{ESM,k}$ を決定変数、 $P_{ESM,k}, E_{ESM,k}^{\text{buy}}, E_{ESM,k}^{\text{sell}}, E_{ESM,k}, C_{ESM}^{\text{use}}$ を補助変数、(208)式を目的関数の一部、(206)式、(207)式、(209)式を制約、(82)式、(85)式から(87)式、(205)式を補助変数の定義式と定義する。

(14) 都市ガススマートメータ(GSM)

$\hat{U}_{GSM}^{\text{start}}$ を定数と定義すると、 Δk は定数、 $u_{GWH,k}$ は決定変数であるため、(91)式、(92)式より $U_{GSM,k}$ は補助変数であり、(91)式、(92)式を補助変数の定義式と定義する。

(15) 上水道スマートメータ(WSM)

$\hat{v}_{CWL,k}, \hat{v}_{HWT,k}^{\text{in}}, \hat{v}_{WSM}^{\text{start}}, \bar{v}_{WSM,k}$ を定数と定義すると、 Δk は定数、 $v_{HWL,k}^{\text{dilute}}$ は補助変数であるため、(93)式、(95)式、(96)式より $v_{WSM,k}, V_{WSM,k}$ も補助変数である。これらに加え、(97)式を制約、(93)式、(95)式、(96)式を補助変数の定義式と定義する。

(16) 電気料金および電気 CO₂ 排出量の計算機(ECC)

(99)式を最適化問題の定式化前に計算し、 Z を既知、 $Y_j^{\text{ele,bas,PR}}, \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}}, \Delta \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}}, y_z^{\text{ele,buy}}, y_z^{\text{ele,adj}}, y_z^{\text{ele,sur}}, y_z^{\text{ele,sell}}, g^{\text{ele}}$ を定数と定義すると、 $\bar{C}_{ESM,j}^{\text{use}}$ は定数、 $C_{ESM}^{\text{use}}, E_{ESM,k}^{\text{buy}}, E_{ESM,k}^{\text{sell}}$ は補助変数であるため、(98)式、(100)式から(107)式より $C_{ESM}, Y_{\text{ele,bas,PR}}, f_z^{\text{ele,buy,PR}}, y_{\text{ele,buy,PR}}, y_{\text{ele,adj,PR}}, y_{\text{ele,sur,PR}}, y_{\text{ele,sell,PR}}, y_{\text{ele,use,PR}}, y_{\text{ele,PR}}, G^{\text{ele,buy,PR}}, G^{\text{ele,sell,PR}}, G^{\text{ele,PR}}$ も補助変数である。

また、(98)式は if 条件式の中に最適化変数 C_{ESM}^{use} が含まれるため、求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。本定式化では、Big M²⁶⁾、small ε ⁸⁹⁾、インジケータ変数²⁷⁾を用いることで、(98)式を、

$$C_{ESM}^{\text{use}} \triangleq \sum_{j \in \mathcal{J}} C_{ESM,j}^{\text{use}}, \quad (210)$$

$$\begin{bmatrix} C_{ESM} \\ Y_{\text{ele,bas,PR}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \sum_{j \in \mathcal{J}} (\bar{C}_{ESM,j}^{\text{use}} b_{ESM,j}) \\ \sum_{j \in \mathcal{J}} (Y_j^{\text{ele,bas,PR}} b_{ESM,j}) \end{bmatrix}, \quad (211)$$

$$\begin{cases} \varepsilon b_{ESM,j} \leq C_{ESM,j}^{\text{use}} \leq \bar{C}_{ESM,j}^{\text{use}} b_{ESM,j} & \text{if } j = 1 \\ (\bar{C}_{ESM,j-1}^{\text{use}} + \varepsilon) b_{ESM,j} \leq C_{ESM,j}^{\text{use}} \leq \bar{C}_{ESM,j}^{\text{use}} b_{ESM,j} & \text{otherwise,} \\ \forall j \in \mathcal{J}, \end{cases} \quad (212)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} b_{ESM,j} \leq 1, \quad (213)$$

$$b_{ESM,j} \in \{0,1\}, \forall j \in \mathcal{J}, \quad (214)$$

と置き換える。ここで、 $\bar{C}_{ESM,j}^{\text{use}}, (\bar{C}_{ESM,j-1}^{\text{use}} + \varepsilon)$ は Big M、 ε は small ε 、 $b_{ESM,j}$ はインジケータ変数かつ決定変数、 $C_{ESM,j}^{\text{use}}$ は決定変数である。なお、前述で触れた C_{ESM} は(211)式から補助変数となること分かる。

さらに、(101)式は if 条件式の中に最適化変数 $E_{ESM,k}^{\text{buy}}|_{k=|\mathcal{K}|+1}$ が含まれるため、求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。本定式化では、(101)式が区分一次関数となることを利用⁹³⁾し、Big M²⁶⁾とインジケータ変数²⁷⁾を用いることで、(100)式と(101)式を、

$$E_{ESM,k}^{\text{buy}}|_{k=|\mathcal{K}|+1} \triangleq \sum_{z \in \mathcal{Z}} E_{ESM,z}^{\text{buy,PR}}, \quad (215)$$

$$y^{\text{ele,buy,PR}} \triangleq \sum_{z \in \mathcal{Z}} (y_z^{\text{ele,buy}} E_{ESM,z}^{\text{buy,PR}}) + \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}}|_{z=0}, \quad (216)$$

$$\begin{cases} \Delta \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}} b_{ESM,z} \leq E_{ESM,z}^{\text{buy,PR}} \leq \Delta \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}} & \text{if } z = 1 \\ 0 \leq E_{ESM,z}^{\text{buy,PR}} \leq \Delta \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}} b_{ESM,z-1} & \text{if } z = |\mathcal{Z}| \\ \Delta \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}} b_{ESM,z} \leq E_{ESM,z}^{\text{buy,PR}} \leq \Delta \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}} b_{ESM,z-1} & \text{otherwise,} \\ \forall z \in \mathcal{Z}, \end{cases} \quad (217)$$

$$b_{ESM,z} \in \{0,1\}, \forall z \in \mathcal{Z}, \quad (218)$$

と置き換える。ここで、 $\Delta \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}}$ は Big M、 $b_{ESM,z}$ はインジケータ変数かつ決定変数、 $E_{ESM,z}^{\text{buy,PR}}$ は決定変数である。なお、 $f_z^{\text{ele,buy,PR}}$ の導出は最適化問題の求解後に求解結果を(100)式に代入して求める。

以上をまとめると、 Z を既知、 $Y_j^{\text{ele,bas,PR}}, \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}}, \Delta \bar{E}_{ESM,z}^{\text{buy,PR}}, y_z^{\text{ele,buy}}, y_z^{\text{ele,adj}}, y_z^{\text{ele,sur}}, y_z^{\text{ele,sell}}, g^{\text{ele}}$ を定数、 $C_{ESM,j}^{\text{use}}, b_{ESM,j},$

$E_{ESM,z}^{\text{buy,PR}}, b_{ESM,z}$ を決定変数、 $y_{\text{ele,bas,PR}}, y_{\text{ele,buy,PR}}, y_{\text{ele,adj,PR}}, y_{\text{ele,sur,PR}}, y_{\text{ele,sell,PR}}, y_{\text{ele,use,PR}}, y_{\text{ele,PR}}, G^{\text{ele,buy,PR}}, G^{\text{ele,sell,PR}}, G^{\text{ele,PR}}$ を補助変数、(212)式から(214)式、(217)式、(218)式を制約、(102)式から(107)式、(210)式、(211)式、(215)式、(216)式を補助変数の定義式と定義する。なお、 $f_z^{\text{ele,buy,PR}}$ は最適化後に(100)式より求めるものとする。

(17) ガス料金およびガス CO₂ 排出量の計算機(GCC)

S を既知、 $Y_s^{\text{gas,bas,PR}}, y_s^{\text{gas,buy}}, \bar{U}_{GSM,s}^{\text{PR}}, y_s^{\text{gas,adj}}, g^{\text{gas}}$ を定数と定義すると、 $U_{GSM,k}$ は補助変数であるため、(108)式から(113)式より $Y_{\text{gas,bas,PR}}, y_{\text{gas,buy}}, y_{\text{gas,buy,PR}}, y_{\text{gas,adj,PR}}, y_{\text{gas,use,PR}}, y_{\text{gas,PR}}, G_{\text{gas,PR}}$ も補助変数である。

このとき、(108)式は if 条件式の中に最適化変数 $U_{GSM,k}|_{k=|\mathcal{K}|+1}$ が含まれるため、求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。また、(109)式の右辺は最適化変数同士の乗算 $y_{\text{gas,buy}} U_{GSM,k}|_{k=|\mathcal{K}|+1}$ があるため、非線形となる。本定式化では、Big M²⁶⁾、small ε ⁸⁹⁾、インジケータ変数²⁷⁾を用いることで、(108)式と(109)式を

$$U_{GSM,k}|_{k=|\mathcal{K}|+1} \triangleq \sum_{s \in \mathcal{S}} U_{GSM,s}^{\text{PR}}, \quad (219)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{\text{gas,bas,PR}} \\ Y_{\text{gas,buy,PR}} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \sum_{s \in \mathcal{S}} (Y_s^{\text{gas,bas,PR}} b_{GSM,s}) \\ \sum_{s \in \mathcal{S}} (y_s^{\text{gas,buy}} U_{GSM,s}^{\text{PR}}) \end{bmatrix}, \quad (220)$$

$$\begin{cases} \varepsilon b_{GSM,s} \leq U_{GSM,s}^{PR} \leq \bar{U}_{GSM,s}^{PR} b_{GSM,s} & \text{if } s = 1 \\ \left(\bar{U}_{GSM,s-1}^{PR} + \varepsilon \right) b_{GSM,s} \leq U_{GSM,s}^{PR} \leq \bar{U}_{GSM,s}^{PR} b_{GSM,s} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall s \in \mathcal{S}, \quad (221)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} b_{GSM,s} \leq 1, \quad (222)$$

$$b_{GSM,s} \in \{0,1\}, \quad \forall s \in \mathcal{S}, \quad (223)$$

と置き換えて線形化を行う。ここで、 $\bar{U}_{GSM,s}^{PR}$ ($\bar{U}_{GSM,s-1}^{PR} + \varepsilon$) は Big M, ε は small ε , $b_{GSM,s}$ はインジケータ変数かつ決定変数, $U_{GSM,s}^{PR}$ は決定変数である。なお, $y_{gas,buy}$ の導出は最適化問題の求解後に求解結果を (108) 式に代入して求める。

以上をまとめると, \mathcal{S} を既知, $y_s^{gas,bas,PR}$, $y_s^{gas,buy}$, $\bar{U}_{GSM,s}^{PR}$, $y_{gas,adj}$, g^{gas} を定数, $U_{GSM,s}^{PR}$, $b_{GSM,s}$ を決定変数, $y_{gas,bas,PR}$, $y_{gas,buy,PR}$, $y_{gas,adj,PR}$, $y_{gas,use,PR}$, $y_{gas,PR}$, $G^{gas,PR}$ を補助変数, (221) 式から (223) 式を制約, (110) 式から (113) 式, (219) 式, (220) 式を補助変数の定義式と定義する。なお, $y_{gas,buy}$ は最適化後に (108) 式より求めるものとする。

(18) 水道料金および水道 CO₂ 排出量の計算機(WCC)

(114) 式, (117) 式を最適化問題の定式化前に計算し, \mathcal{L}, \mathcal{Q} を既知, $\bar{V}_{WSM,l}^{PR}$, $\Delta \bar{V}_{WSM,l}^{PR}$, $y_l^{water,use}$, $\bar{V}_{WSM,q}^{PR}$, $\Delta \bar{V}_{WSM,q}^{PR}$, $y_q^{sewage,use}$, $\gamma^{water,bas,PR}$, $\gamma^{sewage,bas,PR}$, g^{water} を定数と定義すると, $V_{WSM,k}$ は補助変数であるため, (115) 式, (116) 式, (118) 式から (121) 式より $f_l^{water,use,PR}$, $\gamma^{water,use,PR}$, $f_q^{sewage,use,PR}$, $\gamma^{sewage,use,PR}$, $\gamma^{water,PR}$, $G^{water,PR}$ も補助変数である。

このとき, (116) 式と (119) は if 条件式の中に最適化変数 $V_{WSM,k} |_{k=|\mathcal{K}|+1}$ が含まれるため, 求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。本定式化では, (116) 式と (119) 式が区分一次関数となることを利用⁹³⁾し, Big M²⁶⁾とインジケータ変数²⁷⁾を用いることで, (115) 式, (116) 式, (118) 式, (119) 式を,

$$V_{WSM,k} |_{k=|\mathcal{K}|+1} \triangleq \sum_{l \in \mathcal{L}} V_{WSM,l}^{PR}, \quad (224)$$

$$\gamma^{water,use,PR} \triangleq \sum_{l \in \mathcal{L}} (y_l^{water,use} V_{WSM,l}^{PR}) + \bar{V}_{WSM,l}^{PR} |_{l=0}, \quad (225)$$

$$V_{WSM,k} |_{k=|\mathcal{K}|+1} \triangleq \sum_{q \in \mathcal{Q}} V_{WSM,q}^{PR}, \quad (226)$$

$$\gamma^{sewage,use,PR} \triangleq \sum_{q \in \mathcal{Q}} (y_q^{sewage,use} V_{WSM,q}^{PR}) + \bar{V}_{WSM,q}^{PR} |_{q=0}, \quad (227)$$

$$\begin{cases} \Delta \bar{V}_{WSM,l}^{PR} b_{WSM,l} \leq V_{WSM,l}^{PR} \leq \Delta \bar{V}_{WSM,l}^{PR} & \text{if } l = 1 \\ 0 \leq V_{WSM,l}^{PR} \leq \Delta \bar{V}_{WSM,l}^{PR} b_{WSM,l-1} & \text{if } l = |\mathcal{L}| \\ \Delta \bar{V}_{WSM,l}^{PR} b_{WSM,l} \leq V_{WSM,l}^{PR} \leq \Delta \bar{V}_{WSM,l}^{PR} b_{WSM,l-1} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall l \in \mathcal{L}, \quad (228)$$

$$\begin{cases} \Delta \bar{V}_{WSM,q}^{PR} b_{WSM,q} \leq V_{WSM,q}^{PR} \leq \Delta \bar{V}_{WSM,q}^{PR} & \text{if } q = 1 \\ 0 \leq V_{WSM,q}^{PR} \leq \Delta \bar{V}_{WSM,q}^{PR} b_{WSM,q-1} & \text{if } q = |\mathcal{Q}| \\ \Delta \bar{V}_{WSM,q}^{PR} b_{WSM,q} \leq V_{WSM,q}^{PR} \leq \Delta \bar{V}_{WSM,q}^{PR} b_{WSM,q-1} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad \forall q \in \mathcal{Q}, \quad (229)$$

$$b_{WSM,l} \in \{0,1\}, \quad \forall l \in \mathcal{L}, \quad (230)$$

$$b_{WSM,q} \in \{0,1\}, \quad \forall q \in \mathcal{Q}, \quad (231)$$

と置き換える。ここで, $\Delta \bar{V}_{WSM,l}^{PR}$, $\Delta \bar{V}_{WSM,q}^{PR}$ は Big M, $b_{WSM,l}$, $b_{WSM,q}$ はインジケータ変数かつ決定変数,

$V_{WSM,l}^{PR}$, $V_{WSM,q}^{PR}$ は決定変数である。なお, $f_l^{water,use,PR}$, $f_q^{sewage,use,PR}$ の導出は最適化問題の求解後に求解結果をそれぞれ (115) 式, (118) 式に代入して求める。

以上をまとめると, \mathcal{L}, \mathcal{Q} を既知, $\bar{V}_{WSM,l}^{PR}$, $\Delta \bar{V}_{WSM,l}^{PR}$, $y_l^{water,use}$, $\bar{V}_{WSM,q}^{PR}$, $\Delta \bar{V}_{WSM,q}^{PR}$, $y_q^{sewage,use}$, $\gamma^{water,bas,PR}$, $\gamma^{sewage,bas,PR}$, g^{water} を定数, $V_{WSM,l}^{PR}$, $V_{WSM,q}^{PR}$, $b_{WSM,l}$, $b_{WSM,q}$ を決定変数, $\gamma^{water,use,PR}$, $\gamma^{sewage,use,PR}$, $\gamma^{water,PR}$, $G^{water,PR}$ を補助変数, (228) 式から (231) 式を制約, (120) 式, (121) 式, (224) 式から (227) 式を補助変数の定義式と定義する。なお, $f_l^{water,use,PR}$, $f_q^{sewage,use,PR}$ は最適化後にそれぞれ (115) 式, (118) 式より求めるものとする。

(19) ガソリン料金およびガソリン CO₂ 排出量の計算機 (OCC)

y^{oil} , $g^{oil,buy}$, $g^{oil,run}$ を定数と定義すると, $\hat{v}_{RGL,k}$, Δk は定数, C_{GEV} は補助変数であるため, (122) 式, (123) 式より y^{oil} , $G^{oil,buy}$, $G^{oil,run}$, G^{oil} も補助変数である。

このとき, (122) 式は if 条件式の中に最適化変数 C_{GEV} が含まれるため, 求解にソルバーを用いるために if 条件式を含まない形に変形する。本定式化では, インジケータ変数²⁷⁾を用いることで, (122) 式を,

$$\begin{bmatrix} y^{oil} \\ G^{oil,buy} \\ G^{oil,run} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} y^{oil} \\ g^{oil,buy} \\ g^{oil,run} \end{bmatrix} \sum_{k \in \mathcal{K}} (\hat{v}_{RGL,k} \Delta k) b_{GEV}, \quad (232)$$

と置き換える。ここで, b_{GEV} はインジケータ変数である。

以上をまとめると, y^{oil} , $g^{oil,buy}$, $g^{oil,run}$ を定数, y^{oil} , $G^{oil,buy}$, $G^{oil,run}$, G^{oil} を補助変数, (123) 式, (232) 式を補助変数の定義式と定義する。

(20) 設備減価償却費および設備減価償却 CO₂ 排出量の計算機(DCC)

(124) 式, (126) 式を最適化問題の定式化前に計算し, ε^{inv} を既知, y_e^{DC} , g_e^{DC} , $y_{e'}^{ini,DC}$, $g_{e'}^{ini,DC}$, $y_{HWT}^{ini,DC}$, $g_{HWT}^{ini,DC}$, $y_{HWT}^{ini,DC,water}$, $g_{HWT}^{ini,DC,water}$, $y_{GEV}^{ini,DC}$, $g_{GEV}^{ini,DC}$, $r_e^{cost,total}$, $r_e^{CO_2,total}$ を定数と定義すると, N_e , C_{HPU}^{heat} , C_e , $E_{e',k} |_{k=1}$, $Q_{HWT,k}$, C_{GEV} は最適化変数であるため, y_e^{DC} , g_e^{DC} , $y_{e'}^{ini,DC}$, $g_{e'}^{ini,DC}$, $y_{HWT}^{ini,DC}$, $g_{HWT}^{ini,DC}$, $y_{GEV}^{ini,DC}$, $g_{GEV}^{ini,DC}$, $y^{inv,DC}$, $G^{inv,DC}$ は補助変数であり, (125) 式, (127) 式から (130) 式を補助変数の定義式と定義する。

(17) 総コスト・総 CO₂ 排出量モデル

(131) 式の右辺の項はすべて補助変数であるため $\gamma^{total,PR}$, $G^{total,PR}$ も補助変数であり, (131) 式を補助変数の定義式と定義する。

4.4 技術選択・設備容量計画・運転計画の同時最適化問題

これまでをまとめると, 最適化問題の定式化のための前処理関数は,

Pre-Processing-Function-of-JOP-TSCPOS-DES:

given \mathcal{E}^{inv} , \mathcal{K} , \mathcal{K}' , Δk , Z , L , Q ,
 $\{\hat{H}_k, \hat{v}_k^{car}\}_{k \in \mathcal{K}}$, $\{\hat{T}_k\}_{k \in \mathcal{K}'}$,
 H_{PVA}^{test} , α_{PVA} , T_{PVA}^{test} , η_{REL} , η_{RGL} ,
 $\{\hat{V}_{HWT,k}^{out}\}_{k \in \{1\}}$, $\{\hat{v}_{HWT,k}, \hat{v}_{HWT,k}^{in}\}_{k \in \mathcal{K}}$,

$$\begin{aligned}
& c_{\text{water}}, n^{\text{sph}}, \{\hat{T}_k^{\text{tap}}\}_{k \in \mathcal{K}}, T_{\text{waterBoil}}, V_{\text{HWT}}^{\text{cap}}, \\
& \{T_{\text{HWT},k}, \bar{T}_{\text{HWT},k}, \underline{V}_{\text{HWT},k}, \bar{V}_{\text{HWT},k}\}_{k \in \mathcal{K}'}, \\
& \eta_{\text{HPU}}, T^{\text{DTH}}, \{\hat{T}_k\}_{k \in \mathcal{K}}, \\
& \{\bar{E}_{\text{ESM},z}^{\text{buy,PR}}\}_{z \in \{0\} \cup \mathcal{Z}}, \\
& \{\bar{V}_{\text{WSM},l}^{\text{PR}}\}_{l \in \{0\} \cup \mathcal{L}}, \{\bar{V}_{\text{WSM},q}^{\text{PR}}\}_{q \in \{0\} \cup \mathcal{Q}}, \\
& N_{\text{day}}, n_{\text{dpy}}, \{y_e, g_e, N_e^{\text{life}}, r_e^{\text{cost,total}}, r_e^{\text{CO}_2,\text{total}}\}_{e \in \mathcal{E}^{\text{inv}}} \\
\text{output } & \{\hat{P}_{\text{PVA},k}, \hat{P}_{\text{PVA},k}^{\text{cur}}, \hat{P}_{\text{REL},k}, \hat{V}_{\text{RGL},k}\}_{k \in \mathcal{K}}, \\
& \{\hat{V}_{\text{HWT},k}\}_{k \in \mathcal{K}' \setminus \{1\}}, \alpha^{\text{water}}, \{\hat{W}_{\text{HWT},k}^{\text{in}}\}_{k \in \mathcal{K}}, \\
& C_{\text{HWT}}, \{\hat{T}_{\text{HWT},k}^{\text{SOH}}, \bar{T}_{\text{HWT},k}^{\text{SOH}}\}_{k \in \mathcal{K}'}, \{\hat{\eta}_{\text{HPU},k}\}_{k \in \mathcal{K}}, \\
& \{\Delta \bar{E}_{\text{ESM},z}^{\text{buy,PR}}\}_{z \in \mathcal{Z}}, \\
& \{\Delta \bar{V}_{\text{WSM},l}^{\text{PR}}\}_{l \in \mathcal{L}}, \{\Delta \bar{V}_{\text{WSM},q}^{\text{PR}}\}_{q \in \mathcal{Q}}, \\
& \{y_e^{\text{DC}}, g_e^{\text{DC}}\}_{e \in \mathcal{E}^{\text{inv}}}, \\
& \{y_{e'}^{\text{ini,DC}}, g_{e'}^{\text{ini,DC}}\}_{e' \in \{\text{BAT, BEV}\}}, \\
& y_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,gas}}, g_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,gas}}, y_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,water}}, g_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,water}}, \\
& y_{\text{GEV}}^{\text{ini,DC}}, g_{\text{GEV}}^{\text{ini,DC}}, y_{\text{HWT}}^{\text{DC}}, g_{\text{HWT}}^{\text{DC}} \\
\text{where } & (3), (4), (24), (46), (47), (50), (55), (57), \\
& (70), (99), (114), (117), (124), (126)
\end{aligned}$$

で表され、混合整数線形計画(MILP)問題として定式化された JOP-TSCPOS-DES は文献⁵⁴⁾の記述形式に沿って、

JOP-TSCPOS-DES:

$$\begin{aligned}
\text{given } & \mathcal{E}^{\text{inv}}, \mathcal{K}, \mathcal{K}', \Delta k, \mathcal{M}, \mathcal{J}, \mathcal{Z}, \mathcal{S}, \mathcal{L}, \mathcal{Q}, M, \varepsilon, \zeta \\
& c_{\text{PVA}}, \{\eta_e^{\text{in}}, \eta_e^{\text{out}}, \underline{C}_e, \bar{C}_e\}_{e \in \{\text{HPC, BCD, VCD}\}}, \\
& \{\eta_{e'}^{\text{in}}, \eta_{e'}^{\text{out}}, \alpha_{e'}\}_{e' \in \{\text{BAT, BEV}\}}, \underline{C}_{\text{BAT}}, \bar{C}_{\text{BAT}}, \\
& C_{\text{BEV}}^{\text{RM}}, C_{\text{GEV}}^{\text{RM}}, \underline{C}_{\text{BEV}}^{\text{SOC,sug}}, \bar{C}_{\text{PSU}}, \bar{C}_{\text{SDB}}, \\
& \eta_{\text{GWH}}, q^{\text{gas}}, \underline{C}_{\text{GWH}}, \bar{C}_{\text{GWH}}, \\
& \alpha^{\text{water}}, \beta_{\text{HWT}}, A_{\text{HWT}}, C_{\text{HWT}}, \\
& \alpha_{\text{STC}}, \beta_{\text{STC}}, F_{\text{STC}}, \alpha_{\text{STC}}, a_{\text{PVA}}, A^{\text{roof}}, \\
& \alpha_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \beta_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \gamma_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \delta_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \underline{C}_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \bar{C}_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \\
& \hat{E}_{\text{ESM}}^{\text{buy,start}}, \hat{E}_{\text{ESM}}^{\text{sell,start}}, \bar{C}_{\text{ESM}}, \hat{V}_{\text{WSM}}^{\text{start}}, \\
& \{\hat{P}_{\text{PVA},k}, \hat{P}_{\text{PVA},k}^{\text{cur}}, \hat{P}_{\text{REL},k}, \hat{V}_{\text{RGL},k}, \hat{P}_{\text{AEL},k}, \\
& \hat{V}_{\text{HWT},k}, \hat{W}_{\text{HWT},k}^{\text{in}}, \hat{H}_k, \hat{\eta}_{\text{HPU},k}, \hat{T}_k^{\text{tap}}, \\
& \hat{T}_{\text{HWT},k}, \hat{V}_{\text{HWT},k}, \hat{V}_{\text{CWL},k}, \hat{V}_{\text{HWT},k}^{\text{in}}, \bar{V}_{\text{WSM},k}\}_{k \in \mathcal{K}}, \\
& \{r_{e',k}^{\text{SOC}}, \bar{r}_{e',k}^{\text{SOC}}\}_{e' \in \{\text{BAT, BEV}\}, k \in \mathcal{K}'}, \\
& \{\hat{b}_{\text{REL},k}\}_{k \in \{0\} \cup \mathcal{K}'}, \\
& \{P_{\text{HPU},m}^{\text{heat}}\}_{m \in \mathcal{M}}, \{C_{\text{ESM},j}^{\text{use}}\}_{j \in \mathcal{J}}, \\
& \{\hat{V}_{\text{HWT},k}, \hat{T}_k, \hat{T}_{\text{HWT},k}^{\text{SOH}}, \bar{T}_{\text{HWT},k}^{\text{SOH}}, \\
& \underline{T}_{\text{HWT},k}, \bar{T}_{\text{HWT},k}\}_{k \in \mathcal{K}'}, \{y_j^{\text{ele,bas,PR}}\}_{j \in \mathcal{J}}, \\
& \{\Delta \bar{E}_{\text{ESM},z}^{\text{buy,PR}}, y_z^{\text{ele,buy}}\}_{z \in \mathcal{Z}}, \{\bar{E}_{\text{ESM},z}^{\text{buy,PR}}\}_{z \in \{0\} \cup \mathcal{Z}}, \\
& y^{\text{ele,adj}}, y^{\text{ele,sur}}, y^{\text{ele,sell}}, g^{\text{ele}}, \\
& \{y_s^{\text{gas,bas,PR}}, y_s^{\text{gas,buy}}, \bar{U}_{\text{GSM},s}^{\text{PR}}\}_{s \in \mathcal{S}}, \\
& y^{\text{gas,adj}}, g^{\text{gas}}, \\
& \{\Delta \bar{V}_{\text{WSM},l}^{\text{PR}}, y_l^{\text{water,use}}\}_{l \in \mathcal{L}}, \{\bar{V}_{\text{WSM},l}^{\text{PR}}\}_{l \in \{0\} \cup \mathcal{L}}, \\
& \{\Delta \bar{V}_{\text{WSM},q}^{\text{PR}}, y_q^{\text{sewage,use}}\}_{q \in \mathcal{Q}}, \{\bar{V}_{\text{WSM},q}^{\text{PR}}\}_{q \in \{0\} \cup \mathcal{Q}}, \\
& , y^{\text{water,bas,PR}}, y^{\text{sewage,bas,PR}}, g^{\text{water}} \\
& , y^{\text{oil}}, g^{\text{oil,buy}}, g^{\text{oil,run}} \\
& \{y_e^{\text{DC}}, g_e^{\text{DC}}, r_e^{\text{cost,total}}, r_e^{\text{CO}_2,\text{total}}\}_{e \in \mathcal{E}^{\text{inv}}} \\
& \{y_{e'}^{\text{ini,DC}}, g_{e'}^{\text{ini,DC}}\}_{e' \in \{\text{BAT, BEV}\}}, \\
& y_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,gas}}, g_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,gas}}, y_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,water}}, g_{\text{HWT}}^{\text{ini,DC,water}},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& y_{\text{GEV}}^{\text{ini,DC}}, g_{\text{GEV}}^{\text{ini,DC}}, Y_{\text{HWT}}^{\text{DC}}, G_{\text{HWT}}^{\text{DC}} \\
\text{find } & \{b_e\}_{e \in \{\text{HPC, BCD, VCD, BAT, BEV, HPU, GWH}\}}, N_{\text{PVA}}, \\
& \{C_e\}_{e \in \{\text{HPC, BCD, VCD, BAT, PSU, SDB, GWH}\}}, C_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \\
& \{P_{\text{HPC},k}^{\text{P2H}}, P_{\text{HPC},k}^{\text{P2B}}, P_{\text{HPC},k}^{\text{P2V}}, P_{\text{HPC},k}^{\text{P2H}}, P_{\text{HPC},k}^{\text{P2V}}, P_{\text{HPC},k}^{\text{P2H}}, \\
& f_{\text{HPC},k}^{\text{out}}, f_{\text{HPC},k}^{\text{in}}, b_{\text{HPC},k}, u_{\text{GWH},k}, \\
& w_{\text{STC},k}^{\text{gen}}, b_{\text{STC},k}, P_{\text{ESM},k}^{\text{buy}}, P_{\text{ESM},k}^{\text{sell}}, b_{\text{ESM},k}\}_{k \in \mathcal{K}}, \\
& \{P_{e,k}^{\text{out}}, P_{e,k}^{\text{in}}, b_{e,k}\}_{e \in \{\text{BCD, VCD}\}, k \in \mathcal{K}}, \\
& \{E_{e',k}\}_{e' \in \{\text{BAT, BEV}\}, k \in \{1\}}, \{T_{\text{HWT},k}\}_{k \in \{1\}}, \\
& \{W_{\text{STC},k,i}, W_{\text{STC},k,i}^{\text{cur}}\}_{k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{I}}, \{b_{\text{STC},i}\}_{i \in \mathcal{I}}, \\
& \{T_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}\}_{k \in \mathcal{K}' \setminus \{1\}}, \\
& \{W_{\text{HPU},k,m}^{\text{heat}}, b_{\text{HPU},k,m}^{\text{heat}}\}_{k \in \mathcal{K}, m \in \mathcal{M}}, \\
& \{C_{\text{ESM},j}^{\text{use}}, b_{\text{ESM},j}\}_{j \in \mathcal{J}}, \\
& \{E_{\text{ESM},z}^{\text{buy,PR}}\}_{z \in \mathcal{Z}}, \{b_{\text{ESM},z}\}_{z \in \mathcal{Z} \setminus \{|Z|}}, \\
& \{U_{\text{GSM},s}^{\text{PR}}, b_{\text{GSM},s}\}_{s \in \mathcal{S}}, \\
& \{V_{\text{WSM},l}^{\text{PR}}\}_{l \in \mathcal{L}}, \{b_{\text{WSM},l}\}_{l \in \mathcal{L} \setminus \{|L|}}, \\
& \{V_{\text{WSM},q}^{\text{PR}}\}_{q \in \mathcal{Q}}, \{b_{\text{WSM},q}\}_{q \in \mathcal{Q} \setminus \{|Q|}}, \\
\text{which minimize } & Y^{\text{total,PR}} \text{ or } (G^{\text{total,PR}} + \varepsilon C_{\text{ESM}}^{\text{use}}), \\
\text{subject to } & (7), (19), (32)-(35), (43), (58), (59), (65), \\
& (80), (81), (97), (136)-(138), (140)-(152), \\
& (157), (159)-(161), (166), (167), (170), \\
& (171), (173)-(176), (178)-(180), (182)-(184), \\
& (185)-(188), (190)-(193), (197)-(201), (203), \\
& (204), (206), (207), (209), (212)-(214), \\
& (217), (218), (221)-(223), (228)-(231), \\
& (5), (6), (8)-(11), (41), (48), (49), (51), \\
& (53), (60), (66), (67), (71), (79), (82), \\
& (85)-(87), (91)-(93), (95), (96), (102)-(107), \\
& (110)-(113), (120), (121), (123), (125), \\
& (127)-(135), (153)-(156), (162)-(165), \\
& (194)-(196), (205), (210), (211), (215), \\
& (216), (219), (220), (224)-(227), (232),
\end{aligned}$$

で表される。ここで、given は定数の一覧、find は決定変数の一覧、which minimize は最小化する目的関数、subject to は制約の一覧、where は補助変数の定義式の一覧である。また、目的関数は各子問題の目的関数を内包し、各子問題の制約は subject to に含まれる。さらに、最適化問題の求解後の後処理関数は、

Post-Processing-Function-of-JOP-TSCPOS-DES:

$$\begin{aligned}
\text{given } & \mathcal{K}, \mathcal{K}', \Delta k, \mathcal{Z}, \mathcal{S}, \mathcal{L}, \mathcal{Q}, \\
& \{\eta_e^{\text{in}}, \eta_e^{\text{out}}\}_{e \in \{\text{HPC, BCD, VCD, BAT, BEV}\}}, \\
& \{f_{\text{HPC},k}\}_{k \in \mathcal{K}}, \{P_{e,k}\}_{e \in \{\text{BCD, VCD, BAT, BEV}\}, k \in \mathcal{K}}, \\
& \{E_{e',k}\}_{e' \in \{\text{BAT, BEV}\}, k \in \{1\}}, \\
& \{E_{e',k}\}_{e' \in \{\text{BAT, BEV}\}, k \in \mathcal{K}' \setminus \{1\}}, \{C_{e'}\}_{e' \in \{\text{BAT, BEV}\}}, \\
& \{Q_{\text{HWT},k}\}_{k \in \mathcal{K}'}, C_{\text{HWT}}, \{T_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}\}_{k \in \mathcal{K}' \setminus \{1\}}, \\
& \{P_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}, C_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}, W_{\text{HPU},k}^{\text{heat}}\}_{k \in \mathcal{K}}, \\
& \{\Delta \bar{E}_{\text{ESM},z}^{\text{buy,PR}}\}_{z \in \mathcal{Z} \setminus \{|Z|}}, \{y_z^{\text{ele,buy}}\}_{z \in \mathcal{Z}}, \\
& \{\bar{E}_{\text{ESM},z}^{\text{buy,PR}}\}_{z \in \{0\} \cup \mathcal{Z} \setminus \{|Z|}}, \{E_{\text{ESM},k}^{\text{buy}}\}_{k \in \{|\mathcal{K}|+1\}}, \\
& \{y_s^{\text{gas,buy}}, \bar{U}_{\text{GSM},s}^{\text{PR}}\}_{s \in \mathcal{S}}, \{U_{\text{GSM},k}\}_{k \in \{|\mathcal{K}|+1\}}, \\
& \{\Delta \bar{V}_{\text{WSM},l}^{\text{PR}}\}_{l \in \mathcal{L} \setminus \{|L|}}, \{y_l^{\text{water,use}}\}_{l \in \mathcal{L}}, \\
& \{\bar{V}_{\text{WSM},l}^{\text{PR}}\}_{l \in \{0\} \cup \mathcal{L} \setminus \{|L|}}, \{V_{\text{WSM},k}\}_{k \in \{|\mathcal{K}|+1\}}, \\
& \{\Delta \bar{V}_{\text{WSM},q}^{\text{PR}}\}_{q \in \mathcal{Q} \setminus \{|Q|}}, \{y_q^{\text{sewage,use}}\}_{q \in \mathcal{Q}},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left\{ \overline{V}_{WSM,q}^{PR} \right\}_{q \in \{0\} \cup Q \setminus \{1Q\}} , \\ \text{output } & \left\{ \eta_{e,k} \right\}_{e \in \{HPC, BCD, VCD, BAT, BEV\}, k \in \mathcal{K}} , \\ & \left\{ r_{e',k}^{SOC} \right\}_{e' \in \{BAT, BEV\}, k \in \mathcal{K}'} , \left\{ T_{HWT,k}^{SOH} \right\}_{k \in \mathcal{K}'} , \\ & \left\{ T_{HPU,k}^{heat,on} \right\}_{k \in \mathcal{K}'} , \left\{ r_{HPU,k}^{COP,heat,on} \right\}_{k \in \mathcal{K}} , \\ & E_{HPU}^{heat}, Q_{HPU}^{heat}, \left\{ f_z^{ele,buy,PR} \right\}_{z \in Z} , y_{gas,buy} \\ \text{where } & \left\{ f_l^{water,use,PR} \right\}_{l \in L} , \left\{ f_q^{sewage,use,PR} \right\}_{q \in Q} , \\ & (12), (20), (25), (30), (56), (68), (69), (72), \\ & (74), (75), (100), (108), (115), (118) \end{aligned}$$

で表される。

5. ケーススタディ

4. で定式化した JOP-TSCPOS-DES(最適化モデル)を用いた数値実験をケーススタディとして実施した。

5.1 想定した状況

DES として福井市の 4 人世帯の住宅 1 軒を想定した。DES は電力契約として、北陸電力の買電料金メニュー「従量電灯 B」⁸⁴⁾と売電料金メニュー「かんたん固定単価プラン」⁸⁵⁾、ガス契約として、福井都市ガスのガス料金メニュー「一般料金」⁸⁶⁾、上下水道契約として福井市上下水道局の上水道料金メニュー「一般用水道料金」⁸⁷⁾と下水道料金メニュー「一般汚水下水道使用料」⁸⁸⁾を契約していることを想定した。

DES では REL を除く DLS, UECS, CSS に加えて、SDB, HPWH(HPU と HWT)が既設されており、SDB, HPWH, GEV は買替時期が到来している状況を想定した。DES の住民はこれらの買替の際に PVUS や STCUS の導入によるスマートハウス化も視野に入れており、JOP-TSCPOS-DES の求解により最適なシステム構成(技術選択と設備容量計画)を検討したいものと想定した。

なお、本数値実験では、複数の検討ケースでの解の比較を行うものの、それらの中から最終的な解を選択する行為(DES の住民による意思決定)は本稿では扱わない。これらの解の比較により、本モデルの有用性などを議論する。

5.2 設定した検討ケース

本稿で想定した検討ケースを表 2 に示す。本稿では、8 個の検討ケースを設定した。また、以後、Case 1ax, 1ay, 1bx, 1by の総称を共通する 1 を利用して Cases 1, Case 1ax, 1ay, 2ax, 2ay の総称を共通する a を利用して Cases a, Case 1ax, 1ay の総称を共通する 1a を利用して Cases 1a などと呼ぶ。

表 2 において、Cases 1 は買替設備である SDB, HPWH, GEV のみを再度導入する検討ケースである。特に、Cases 1a は既設 DES と同種同容量の機器構成を示し、他ケースとの比較の基準ケースとなる。Cases 1 における分析では、Cases 1b で導出された設備容量、総コスト、総 CO₂ 排出量を Cases 1a と比較した。この比較により、本最適化モデル(HPWH のダイナミクスの考慮)が、容量最適化の有無による HPWH

表 2 検討ケース

Case name	Considerations		
	Selecting tech.	Equipment cap.	Objective
1ax	Only replace, fixed	Fixed as RM cap.	TC min.
1ay	Only replace, fixed	Fixed as RM cap.	TCO ₂ min.
1bx	Only replace, fixed	Cap. opt.	TC min.
1by	Only replace, fixed	Cap. opt.	TCO ₂ min.
2ax	w/ PVUS and STCUS, fixed	Fixed as RM cap.	TC min.
2ay	w/ PVUS and STCUS, fixed	Fixed as RM cap.	TCO ₂ min.
2bx	w/ PVUS and STCUS, opt.	Cap. opt.	TC min.
2by	w/ PVUS and STCUS, opt.	Cap. opt.	TCO ₂ min.

tech: technology, cap.: capacities, opt.: optimization, RM: ready-made,

TC: total cost, TCO₂: total CO₂ emission amount, w/: with,

PVUS: photovoltaic utilization system,

STCUS: solar thermal collection and utilization system.

の導入ポテンシャルの変化に与える影響を評価した。

また、表 2 において、Cases 2 は買替設備である SDB, HPWH, GEV を再度導入することに加えて、PVUS と STCUS を新規導入する検討ケースである。特に、Cases 2a は既製品の住宅用 V2H 蓄電システム「eneplat」⁷³⁾のモデル構成を想定した技術リッチなシステム構成である。Cases 2 における分析では、Cases 2b など導出された設備容量、総コスト、総 CO₂ 排出量を Cases 1a などと比較した。この比較により、本最適化モデル(HPWH のダイナミクスの考慮と電気・熱・水の連携の詳細考慮)が、技術選択と容量最適化の有無による各機器の導入ポテンシャルの変化に与える影響を評価した。なお、8 個の検討ケースのうち、技術選択を最適化しているのは Cases 2b のみである点に注意されたい。

さらに、各検討ケースでは必要に応じて下記の制約を追加した。

$$\begin{cases} N_e = 0 \\ C_{e'} = 0 \\ b_{BEV} = 0 \end{cases} \quad \text{if any of Cases 1 is selected}$$

$$\begin{cases} N_e = N_e^{RM} \\ C_{e'} = C_{e'}^{RM} \\ b_{BEV} = 1 \end{cases} \quad \text{if any of Cases 2a is selected,}$$

$$\forall e \in \{PVA, STC\},$$

$$\forall e' \in \{HPC, BCD, VCD, BAT, PSU, GWH\}, \quad (233)$$

$$C_{SDB} = C_{SDB}^{RM} \quad \text{if any of Cases 1,2a is selected,} \quad (234)$$

$$C_{HPU}^{heat} = C_{HPU}^{heat, RM} \quad \text{if any of Cases a is selected,} \quad (235)$$

5.3 定数の設定

各機器の主なパラメータの設定を表 3 に、各機器の容量とコストと CO₂ 排出量に関するパラメータの設定を表 4 に、計画期間の離散時刻断面の設定を表 5 に、電気基本料金の料金区分の設定を表 6 に、買電料金の料金区分の設定を表 7 に、ガス料金の料金区分の設定を表 8 に、上水道従量料金の料金区分の設定を表 9 に、下水道従量料金の料金区分の設定を表 10 に、ヒートポンプ給湯機の離散稼働段階の設定を表 11 に示す。

表3 各機器の主なパラメータの設定

Equipment	Symbols	Units	Value	Ref.
-	$ J $	-	40	-
	A^{roof}	m ²	80	-
	c^{water}	kJ/(°C·L)	4.0437	23)
	$T^{\text{waterBoil}}$	°C	100	-
	N^{day}	day	5	16)
	n^{sph}	sec./hour	3600	-
	n^{dpy}	day/year	365	-
	M	kW/item or kW	100	-
	ε	kW/item or - or kW m ³	0.01	-
	ζ	item	1	-
PVA	$H_{\text{PVA}}^{\text{test}}$	kW/m ²	1	76)
	α_{PVA}	/°C	0.005	23)
	$T_{\text{PVA}}^{\text{test}}$	°C	25	76)
	a_{PVA}	m ² /item	1.542×0.780	94)
$e \in \{ \text{HPC}, \text{BCD}, \text{VCD} \}$	η_e^{out}	-	0.965	95)
	η_e^{in}	-	0.965	95)
$e' \in \{ \text{BAT}, \text{BEV} \}$	$\alpha_{e'}$	/hour	0.00005	96)
	$\eta_{e'}^{\text{out}}$	-	0.965	95)
	$\eta_{e'}^{\text{in}}$	-	0.965	95)
	$\bar{r}_{e',k}^{\text{SOC}}, \forall k \in \mathcal{K}'$	-	0.2	68)
	$\bar{r}_{e',k}^{\text{SOC}}, \forall k \in \mathcal{K}'$	-	0.8	68)
	$I_{\text{BEV}}^{\text{SOC,sug}}$	-	0.5	54)
	GWH	η_{GWH}	-	0.92
q^{gas}		kWh/m ³	12.7778	98)
HWT	β_{HWT}	kW/(m ² ·°C)	0.9296×10 ⁻³	23)
	A_{HWT}	m ²	3.6248	23)
	$T_{\text{HWT},k}, \forall k \in \mathcal{K}'$	°C	0	-

	$\bar{T}_{\text{HWT},k}, \forall k \in \mathcal{K}'$	°C	95	-
	$\underline{V}_{\text{HWT},k}, \forall k \in \mathcal{K}'$	L	0	-
	$\bar{V}_{\text{HWT},k}, \forall k \in \mathcal{K}'$	L	370	99)
STC	α_{STC}	-	0.77/0.9	23)
	β_{STC}	kW/(m ² ·°C)	5.0×10 ⁻³ /0.9	23)
	F_{STC}	-	0.9	23)
	a_{STC}	m ² /item	2.002×1.002	100)
	HPU	η_{HPU}	-	0.8
T^{DTH}		°C	5	42)
$\alpha_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$		-	5.506	42), 99)
$\beta_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$		/°C	0.065	42)
$\gamma_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$		/°C	0.029	42)
$\delta_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$		/°C	0.030	42)
REL	η_{REL}	km/kWh	10 ³ /124×0.8	101)
RGL	η_{RGL}	km/L	16.6	102)
ESM	\bar{C}_{ESM}	kW	6	84)
WSM	$\bar{v}_{\text{WSM},k}, \forall k \in \mathcal{K}$	L/hour	2400	103)
CCS	$y^{\text{ele,adj}}$	JPY/kWh	-6.67	104)
	$y^{\text{ele,sur}}$	JPY/kWh	3.49	105)
	$y^{\text{ele,sell}}$	JPY/kWh	8.0	85)
	g^{ele}	kg-CO ₂ /kWh	0.481	106)
	$y^{\text{gas,adj}}$	JPY/m ³	37.34	107)
	g^{gas}	kg-CO ₂ /m ³	2.3639	108)
	$\gamma^{\text{water,bas,PR}}$	JPY	171.7808	87)
	$\gamma^{\text{sewage,bas,PR}}$	JPY	189.8630	88)
	g^{water}	kg-CO ₂ /L	4.4×10 ⁻⁴	109)
	y^{oil}	JPY/L	178.2750	110)
	$g^{\text{oil,buy}}$	kg-CO ₂ /L	0.48	111)
	$g^{\text{oil,run}}$	kg-CO ₂ /L	2.32	111)

Ref.: references

表4 各機器の容量とコストとCO₂排出量に関するパラメータの設定

Item	Equipment												
	PVA	HPC	BCD	VCD	BAT	BEV	PSU	SDB	GWH	HWT	STC	HPU	GEV
Lower bound of cap. at installation	-	1 kW C_{HPC}	1 kW C_{BCD}	1 kW C_{VCD}	1 kWh C_{BAT}	-	-	-	15 kW C_{GWH}	-	-	1 kW $C_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$	-
Upper bound of cap. at installation	-	20 kW \bar{C}_{HPC}	20 kW \bar{C}_{BCD}	20 kW \bar{C}_{VCD}	20 kWh \bar{C}_{BAT}	-	20 kW \bar{C}_{PSU}	20 kW \bar{C}_{SDB}	100 kW \bar{C}_{GWH}	-	-	100 kW $\bar{C}_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$	-
Lifetime N_e^{life} [year]	25 ¹¹²⁾	15 ¹¹²⁾	15 ¹¹²⁾	15 ¹¹²⁾	10 ¹¹²⁾	8 ¹¹³⁾	15	15	10 ¹¹⁴⁾	15 ¹¹⁵⁾	15 ¹¹⁶⁾	10 ¹¹⁵⁾	13 ¹¹⁷⁾
RM cap.	20 ¹¹⁸⁾ item $N_{\text{PVA}}^{\text{RM}}$ (0.24 ⁹⁴⁾ $C_{\text{PVA}}^{\text{RM}}$	6.0 ⁹⁵⁾ kW $C_{\text{HPC}}^{\text{RM}}$	6.7 ¹¹⁹⁾ kW $C_{\text{BCD}}^{\text{RM}}$	6.0 ¹²⁰⁾ kW $C_{\text{VCD}}^{\text{RM}}$	6.7 ¹²¹⁾ kWh $C_{\text{BAT}}^{\text{RM}}$	35.8 ¹⁰¹⁾ kWh $C_{\text{BEV}}^{\text{RM}}$	10 ¹²²⁾ kW $C_{\text{PSU}}^{\text{RM}}$	10 ¹²³⁾ kW $C_{\text{SDB}}^{\text{RM}}$	27.9 ⁹⁷⁾ kW $C_{\text{GWH}}^{\text{RM}}$	370 ⁹⁹⁾ L $V_{\text{HWT}}^{\text{cap}}$	2 ¹⁰⁰⁾ item $N_{\text{STC}}^{\text{RM}}$	4.5 ⁹⁹⁾ kW $C_{\text{HPU}}^{\text{heat, RM}}$	51 ¹⁰²⁾ L $C_{\text{GEV}}^{\text{RM}}$
Initial cost of RM cap. [JPY]	4,114,000 ¹¹⁸⁾	968,000 ⁷³⁾	407,000 ⁷³⁾	1,760,000 ⁷³⁾	2,090,000 ⁷³⁾	4,990,000 ¹²⁴⁾	473,000/2 ⁷³⁾	473,000/2 ⁷³⁾	202,840 ¹²⁵⁾	50,000 ¹²⁶⁾	184,800 ¹²⁷⁾	200,000 ¹²⁶⁾	2,209,900 ¹²⁸⁾
Initial cost per cap. y_e	205,700 JPY/item	161,333 JPY/kW	60,746 JPY/kW	293,333 JPY/kW	311,940 JPY/kWh	139,385 JPY/kWh	23,650 JPY/kW	23,650 JPY/kW	7,270 JPY/kW	135 JPY/L	92,400 JPY/item	44,444 JPY/kW	43,331 JPY/L
DC of initial cost per cap. y_e^{DC}	112.71 JPY/item	147.34 JPY/kW	55.48 JPY/kW	267.88 JPY/kW	427.32 JPY/kWh	238.67 JPY/kWh	21.60 JPY/kW	21.60 JPY/kW	9.96 JPY/kW	0.12 JPY/L	84.38 JPY/item	60.88 JPY/kW	45.66 JPY/L

LCCO ₂ emission of RM cap. excluding maintenance [kg-CO ₂]	4754.88	2592.6	2895.07	2592.6	6399.17	12332	4321	4321	396.18	150.96	69.21	6.89	5558
LCCO ₂ emission coefficient excluding maintenance per cap. g_e	237.74 /item 129)	432.10 /kW 129)	432.10 /kW 129)	432.10 /kW 129)	955.10 /kWh 130)	344.47 /kWh 131)	432.10 /kW 129)	432.10 /kW 129)	14.00 /kW 132)	0.41 /L 132)	34.60 /item 132)	1.53 /kW 132)	108.98 /L 131)
DC of LCCO ₂ emission coefficient excluding maintenance per cap. g_e^{DC}	0.1303 /item	0.3946 /kW	0.3946 /kW	0.3946 /kW	1.3084 /kWh	0.5898 /kWh	0.3946 /kW	0.3946 /kW	0.0195 /kW	0.0004 /L	0.0316 /item	0.0021 /kW	0.1148 /L
annual interest rate [-]	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)	0.02 133)
Capital annual expense rate [-]	0.0512	0.0778	0.0778	0.0778	0.1113	0.1365	0.0778	0.0778	0.1113	0.0778	0.0778	0.1113	0.0881
Annual maintenance cost of RM cap. [JPY]	50000	2500	2500	2500	2500	80000	2500	2500	2500	2500	5000	2500	80000
Annual maintenance cost per cap. y_e^{mnt} [-]	2500 /item	416.7 /kW	373.1 /kW	416.7 /kW	373.1 /kWh	2234.6 /kWh	250 /kW	250 /kW	89.6 /kW	6.76 /L	2500 /item	555.6 /kW	1568.6 /L
Maintenance annual expense rate [-]	0.0122	0.0026	0.0061	0.0014	0.0012	0.0160	0.0106	0.0106	0.0123	0.0500	0.0271	0.0125	0.0362
Total annual expense rate $r_e^{cost,total}$ [-]	0.0634	0.0804	0.0840	0.0792	0.1125	0.1525	0.0884	0.0884	0.1237	0.1278	0.1049	0.1238	0.1243
Total annual CO ₂ emission rate $r_e^{CO_2,total}$ [-]	0.0122	0.0026	0.0061	0.0014	0.0012	0.0160	0.0106	0.0106	0.0123	0.0500	0.0271	0.0125	0.0362
DC of initial energy replenishment cost per cap.	-	-	-	-	0.0423 /kW $y_{BAT}^{ini,DC}$	0.0528 /kW $y_{BEV}^{ini,DC}$	-	-	-	0.2145 /m ³ $y_{HWT}^{ini,DC,gas}$ 1.41 × 10 ⁻⁵ /L $y_{HWT}^{ini,DC,water}$	-	-	0.1876 /L $y_{GEV}^{ini,DC}$
DC of initial energy replenishment CO ₂ emission per cap.	-	-	-	-	0.00068 /kW $g_{BAT}^{ini,DC}$	0.000854 /kW $g_{BEV}^{ini,DC}$	-	-	-	0.0022 /m ³ $g_{HWT}^{ini,DC,gas}$ 4.01 × 10 ⁻⁷ /L $g_{HWT}^{ini,DC,water}$	-	-	0.000506 /L $g_{GEV}^{ini,DC}$

cap.: capacity, RM: ready-made, DC: depreciation cost, LCCO₂: life cycle CO₂.

表5 計画期間の離散時刻断面の設定

Section name	Items	
	k	t_k
Section 1	1	2012/12/21 Fri. 00:00
Section 2	2	2012/12/21 Fri. 01:00
⋮	⋮	⋮
Section 119 (Section $\lfloor \mathcal{K} \rfloor - 1$)	119	2012/12/25 Tue. 22:00
Section 120 (Section $\lfloor \mathcal{K} \rfloor$)	120	2012/12/25 Tue. 23:00
Section 121 (Section $\lfloor \mathcal{K}' \rfloor$)	121	2012/12/26 Wed. 00:00

$\mathcal{T} \triangleq [t^{\text{start}}, t^{\text{end}}] = [2012/12/21 \text{ Fri. } 00:00, 2012/12/26 \text{ Wed. } 00:00]$,

$\Delta k = 1$ hour, 12/21 and 12/25 are weekday, 12/22 - 12/24 are holiday.

表6 電気基本料金の料金区分の設定⁸⁴⁾

Tier name	Items			
	Range [kW]	j	$\overline{C}_{ESM,j}^{\text{use}}$ [kW]	$y_j^{\text{ele,bas,PR}}$ [JPY]
Tier 0	$C_{ESM}^{\text{use}} = 0$	-	-	-
Tier 1	$0.0 < C_{ESM}^{\text{use}} \leq 1.0$	1	1.0	49.73
Tier 2	$1.0 < C_{ESM}^{\text{use}} \leq 1.5$	2	1.5	74.59
Tier 3	$1.5 < C_{ESM}^{\text{use}} \leq 2.0$	3	2.0	99.45
Tier 4	$2.0 < C_{ESM}^{\text{use}} \leq 3.0$	4	3.0	149.18
Tier 5	$3.0 < C_{ESM}^{\text{use}} \leq 4.0$	5	4.0	198.90
Tier 6	$4.0 < C_{ESM}^{\text{use}} \leq 5.0$	6	5.0	248.63
Tier 7 (Tier $\lfloor \mathcal{J} \rfloor$)	$5.0 < C_{ESM}^{\text{use}} \leq 6.0$	7	6.0	298.36

Tier 0 is no contract.

表7 買電料金の料金区分の設定⁸⁴⁾

Tier name	Items			
	Range [kWh]	z	$\bar{E}_{ESM,z}^{buy,PR}$ [kWh]	$y_z^{ele,buy}$ [JPY/kWh]
Tier 0	$E_{ESM,k}^{buy} _{k= Z +1} = 0$	0	0	-
Tier 1	$0 < E_{ESM,k}^{buy} _{k= Z +1} \leq 19.73$	1	19.73	49.73
Tier 2	$19.73 < E_{ESM,k}^{buy} _{k= Z +1} \leq 49.32$	2	49.32	74.59
Tier 3 (Tier Z)	$49.32 < E_{ESM,k}^{buy} _{k= Z +1} \leq 733.81$	3	733.81	99.45

Tier 0 is no contract.

表8 ガス料金の料金区分の設定⁸⁶⁾

Tier name	Items				
	Range [m ³]	s	$\bar{U}_{GSM,s}^{PR}$ [m ³]	$y_s^{gas,bas,PR}$ [JPY]	$y_s^{gas,buy}$ [JPY/m ³]
Tier 0	$U_{GSM,k} _{k= Z +1} = 0$	0	-	-	-
Tier 1	$0 < U_{GSM,k} _{k= Z +1} \leq 3.3$	1	3.3	96.99	234.89
Tier 2	$3.3 < U_{GSM,k} _{k= Z +1} \leq 16.4$	2	16.4	126.09	226.62
Tier 3	$16.4 < U_{GSM,k} _{k= Z +1} \leq 32.9$	2	32.9	223.08	220.60
Tier 4 (Tier S)	$32.9 < U_{GSM,k} _{k= Z +1} \leq 1040.4$	3	1040.4	434.52	214.48

Tier 0 is no contract.

表9 上水道従量料金の料金区分の設定⁸⁷⁾

Tier name	Items			
	Range [L]	l	$\bar{V}_{WSM,l}^{PR}$ [L]	$y_l^{water,use}$ [JPY/L]
Tier 0	$V_{WSM,k} _{k= Z +1} = 0$	0	0	-
Tier 1	$0 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.0164 \times 10^5$	1	0.0164×10^5	0.0154
Tier 2	$0.0164 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.0329 \times 10^5$	2	0.0329×10^5	0.1078
Tier 3	$0.0329 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.0493 \times 10^5$	3	0.0493×10^5	0.1265
Tier 4	$0.0493 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.0658 \times 10^5$	4	0.0658×10^5	0.1628
Tier 5	$0.0658 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.2466 \times 10^5$	5	0.2466×10^5	0.2112
Tier 6 (Tier L)	$0.2466 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 2.9352 \times 10^5$	6	2.9352×10^5	0.2387

Tier 0 is contracted but not used.

PVA は品番: VBM240FJ01N⁹⁴⁾, HPC は品番: LJRE32C⁹⁵⁾, BCD は品番: LJDB302C¹¹⁹⁾, VCD は品番: LJV2671C¹²⁰⁾, BAT は品番: LJB1367C¹²¹⁾, BEV は型式: ZAA-AUEAZ(ベースモデル)¹⁰¹⁾, PSU は品番: LJTS1A01¹²²⁾, SDB は品番: BHM85222C2¹²³⁾, GWH は型式: RUX-E1616W(A)(23-6504)¹²⁵⁾, HPWH は品番: HE-S37LQS(HPU は品番: HE-PS45L, HWT は品番: HE-S37LQ)⁹⁹⁾, STC は品番: UF-2202D-

表10 下水道従量料金の料金区分の設定⁸⁸⁾

Tier name	Items			
	Range [L]	q	$\bar{V}_{WSM,q}^{PR}$ [L]	$y_q^{sewage,use}$ [JPY/L]
Tier 0	$V_{WSM,k} _{k= Z +1} = 0$	0	0	-
Tier 1	$0 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.0164 \times 10^5$	1	0.0164×10^5	0.0121
Tier 2	$0.0164 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.0329 \times 10^5$	2	0.0329×10^5	0.1342
Tier 3	$0.0329 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.0493 \times 10^5$	3	0.0493×10^5	0.1518
Tier 4	$0.0493 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.0822 \times 10^5$	4	0.0822×10^5	0.1771
Tier 5	$0.0822 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.3288 \times 10^5$	5	0.3288×10^5	0.2288
Tier 6	$0.3288 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 0.8219 \times 10^5$	6	0.8219×10^5	0.2442
Tier 7 (Tier Q)	$0.8219 \times 10^5 < V_{WSM,k} _{k= Z +1} \leq 2.9352 \times 10^5$	7	2.9352×10^5	0.2530

Tier 0 is contracted but not used.

表11 ヒートポンプ給湯機の離散稼働段階の設定

Level name	Items	
	m	$P_{HPU,m}^{heat}$ [kW]
Level 0	-	-
Level 1	1	0.1
Level 2	2	0.2
⋮	⋮	⋮
Level 39 (Level M - 1)	39	5.9
Level 40 (Level M)	60	6.0

Level 0 is no operation.

BL(STC 単体は品番: SCQ-220)¹⁰⁰⁾, GEV は MAZDA3 15C¹⁰²⁾ の仕様書やカタログなどを参考にして、パラメータを設定した。なお、車種の選定に際して、文献¹³¹⁾で CO₂ 排出量が示されており、公開データが入手できた e-Golf¹⁰¹⁾ と MAZDA3¹⁰²⁾ とした。

表3において、DES の建築面積は 25 坪、自動車のガレージを除く住宅棟は片流れ屋根(南向き、勾配 30°, 図2 参照)とし、PVA と STC を設置可能な屋根面積 A^{roof} を 80 m² に設定した。|J| は STC の最大設置枚数を示し、 a_{STC} と A^{roof} から、40 枚と設定した。 c^{water} は文献²³⁾での設定値として、水の比熱(比熱容量)を 4.186 kJ/(°C・L)、水の密度を 0.966 kg/L としたときの値とした。 $\eta_{BCD}^{out}, \eta_{BCD}^{in}, \eta_{VCD}^{out}, \eta_{VCD}^{in}, \eta_e^{out}, \eta_e^{in}$ の値は該当仕様書には記載されていなかったため、便宜上、 $\eta_{HPU}^{out}, \eta_{HPU}^{in}$ と同値とした。BAT と BEV のバッテリーはリチウムイオン電池であると仮定し、文献⁹⁶⁾を参考にし、1 か月あたりの自己放電率を 3-4% として 1 時間あたりの自己放電率 α_e に換算した。ガス種は 13A とし、福井都市ガスの 13A の単位発熱量 46 MJ/m³⁹⁸⁾ を単位換算し、 q^{gas} を設定し

た. HWT は円筒形であると仮定し, A_{HWT} は文献²³⁾での設定値として, 底面の半径を $303 \times 10^{-3} \text{ m}$, 高さを $1601 \times 10^{-3} \text{ m}$ としたときの値とした. $\bar{T}_{\text{HWT},k}$ は沸騰を避けるために 95°C とした. $\alpha_{\text{STC}}, \beta_{\text{STC}}, F_{\text{STC}}$ は文献²³⁾での設定値を参考にし, F_{STC} を 0.9 と仮定し, $\alpha_{\text{STC}}, \beta_{\text{STC}}$ の値を設定した. HPU の COP 計算のための回帰係数 $\alpha_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \beta_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \gamma_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \delta_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$ のうち, $\beta_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \gamma_{\text{HPU}}^{\text{heat}}, \delta_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$ は文献⁴²⁾の値とし, $\alpha_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$ は HWT の仕様書の値(外気温 7°C , 入水温度 9°C , 沸き上げ目標温度 90°C の際に入力電力 1.5 kW , 出力熱力 4.5 kW)⁹⁹⁾となるように値を設定した. GEV の燃費の値¹⁰²⁾は WLTC モードの値を用いているため, JC08 モードの値として仕様書¹⁰¹⁾に記載されている BEV の電費(交流電力量消費率の逆数) η_{REL} は 0.8 を乗ずることで WLTC モード相当の値として設定した. WSM のメーター口径は 20 mm , 流量の上界値は 40 L/min . とし¹⁰³⁾, 冷水入水速度の上界値 $\bar{v}_{\text{WSM},k}$ を設定した. 各種コストに関する値は, 公開されている最新値として, $y^{\text{ele,adj}}, y^{\text{ele,sur}}, y^{\text{gas,adj}}$ は 2024 年 12 月の値^{104), 105), 107)}, g^{ele} は 2023 年度実績値¹⁰⁶⁾, g^{water} は 2024 年 4 月の値¹⁰⁹⁾を設定した. g^{gas} は石油連盟の石油システム推進室が環境省の温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル¹³⁴⁾より算出した CO_2 排出係数 $0.185 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}$ ¹⁰⁸⁾を単位換算した値を設定した. y^{oil} は経済産業省資源エネルギー庁による給油所小売価格調査結果¹¹⁰⁾のうち, 福井県の 2024 年 12 月の 4 週間のレギュラー現金価格の平均値を設定した.

表 4 において, $\underline{C}_e, \underline{C}_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$ は設備容量の求解値が 0.001 kW などの現実的ではない値となることを避けるために 1 kW に設定した. $\underline{C}_{\text{GWH}}$ に関しては GWH の最小導入可能容量を 8 号程度と仮定し, 15 kW に設定した. なお, 本稿では $\underline{C}_{\text{HPU}}^{\text{heat}}$ として, 入力電力側ではなく, 出力熱力側の値として設定していることに注意されたい. N_e^{life} は各機器の保証期間や一般的な寿命の目安とされる期間など¹¹²⁾⁻¹¹⁷⁾を参考にして設定した. g_e は文献¹²⁹⁾⁻¹³²⁾の値を参考にして設定した. HPWH の既製品の価格は文献¹²⁶⁾を参考にして, HWT が 5 万円, HPU が 20 万円とした. 各種設備の合計導入コストは多額となることが予想されるため, DES の住民はローンまたは分割払いで機器を購入すると仮定し, 文献¹³³⁾を参考にして金利を設定した. コスト面における総年経費率(資本回収係数やメンテナンス年経費率を含む) $r_e^{\text{cost,total}}$ に対する CO_2 排出量面での係数 $r_e^{\text{CO}_2,\text{total}}$ は該当するデータを見つけることができなかったため, 本数値実験では便宜上, メンテナンス年経費率と同値に設定した.

表 5 において, 住民のエネルギー需要には 1 年を周期とする季節変動があるため¹³⁵⁾, 設備容量計画では長期的な計画期間を設けることが望ましい. しかし, 本稿では, 計算機やソルバーの性能の制約により, 計画期間 \mathcal{T} を 5 日間(時刻断面の粒度 Δk は 1 時間)¹⁶⁾に絞って数値実験を行った. こ

の 5 日間は, 電力需要と給湯需要が共に高くなり, 所要容量が最大化されると予想される 12 月の晴れ曇り雨が混在する日に設定した. また, 福井市の平均的な気候条件を反映させるために, METPV-20¹³⁶⁾の斜面日射量(南向き, 傾斜角 30°)の平均年データに基づき, 対象年は 2012 年とした. なお, 1 年間を対象とした解析等は今後の課題とする.

また, **表 6** から **表 10** において, 各種項目を示す記号に PR が付されているものに関しては計画期間である 5 日間に換算した日割値であることに注意されたい.

表 11 において, 既製品の HPWH の仕様⁹⁹⁾を参考にし, 容量最適化における定格入力電力の上界値 6.0 kW とし, 0.1 kW 刻みで入力電力を調整しながら部分負荷運転を行うことが可能であると仮定し, 総離散稼働段階数 $|\mathcal{M}|$ を 60 と設定した.

以下, 時系列データを図示する場合には, 離散時間値 X_k をホルダを利用して連続時間値 X_t に変換したものを図示する. 外生変数の予測値の設定値として利用した, $\hat{P}_{\text{AEL},t}, \hat{T}_{\text{HWL},t}, \hat{v}_{\text{HWL},t}, \hat{v}_{\text{CWL},t}, \hat{v}_t^{\text{car}}, \hat{\delta}_{\text{REL},t}, \hat{H}_t, \hat{T}_t, \hat{T}_t^{\text{tap}}$ および $\hat{v}_{\text{HWT},t}^{\text{out}}, \hat{v}_{\text{HWT},t}^{\text{in}}, \hat{V}_{\text{HWT},t}$ の時系列データをそれぞれ **図 7**, **図 8**, **図 9**, **図 10**, **図 11**, **図 12**, **図 13**, **図 14**, **図 15** および **図 16** に示す. また, $\hat{E}_{\text{ESM}}^{\text{buy,start}}, \hat{E}_{\text{ESM}}^{\text{sell,start}}, \hat{U}_{\text{GSM}}^{\text{start}}, \hat{V}_{\text{WSM}}^{\text{start}}$ はすべて 0 とした.

図 7 で示される AEL の予測需要電力(HPWH の需要電力を除く) $\hat{P}_{\text{AEL},t}$ は文献^{16), 137)-144)}の値を参考にして設定した. 計画期間 5 日間における最大電力は 2.6 kW , 合計電力量は 74.0 kW , 負荷率(5 日間の平均値を 5 日間の最大値で除した場合の百分率)は 23.7% である. この設定は, RE 由来の電源や熱源の導入効果が大きくなると期待される, 高需要低負荷率かつオール電化の需要家を模擬するためのものである.

図 8, **図 9** は文献^{16), 145)}の値を参考にして設定し, **図 11** は **図 7** の $\hat{P}_{\text{AEL},t}$ に合わせて文献^{137), 140), 146)-151)}の値を参考にして設定した.

図 11, **図 12** で示される自動車の予測走行速度 \hat{v}_t^{car} と BEV の VCD との予測接続状態 $\hat{\delta}_{\text{REL},t}$ は文献¹⁵²⁾で示される自動車の一般道路における平均旅行速度と文献¹⁵³⁾で示される BEV の利用パターンを参考にして設定した. 特に, 利用パターンとして, 平日は文献¹⁵³⁾における長距離通勤型を基に, 休日は文献¹⁵³⁾における休日レジャー長距離型を基に設定を行った. また, 本モデルでは DES 1 軒に対して自動車は 1 台まで導入できるモデルであるものの, 対象地域とした福井県では 1 軒あたり平均 1.7 台自動車を保有¹⁵⁶⁾している. ゆえに, 1 台あたりの走行距離を文献¹⁵³⁾よりも長く設定することで福井市での状況を模擬した. 具体的には, 平日は 30 km/trip , 2 trip/day , 休日は 60 km/trip , 2 trip/day に設定した. また, 日中は通勤先またはレジャー先での駐車

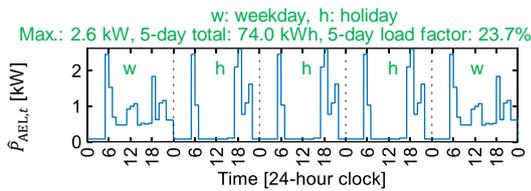


図7 交流電力負荷の予測需要電力 (HPWH の需要電力を除く)の 時系列データの設定^{16), 137)-144)}

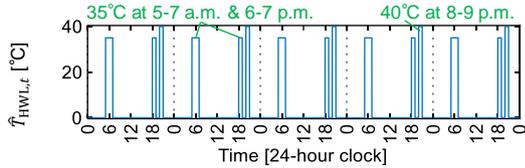


図8 給湯負荷の予測需要湯温の 時系列データの設定^{16), 145)}

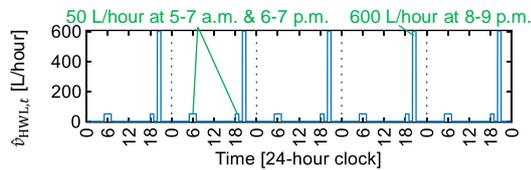


図9 給湯負荷の予測需要湯量使用速度の 時系列データの設定^{16), 145)}

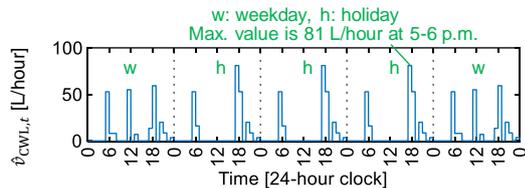


図10 水道冷水負荷の予測需要水量使用速度の 時系列データの設定^{137), 140), 146)-151)}

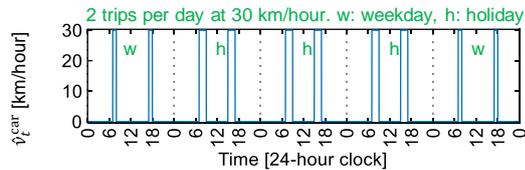


図11 自動車の予測走行速度の 時系列データの設定^{152), 153)}

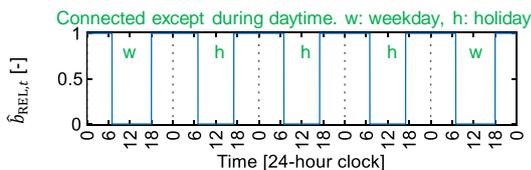


図12 バッテリー式電気自動車の充放電器との 予測接続状態の時系列データの設定^{152), 153)}

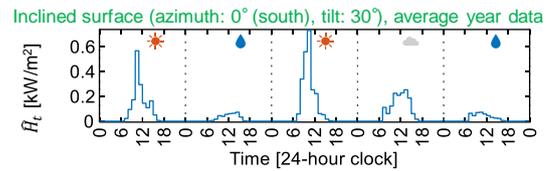


図13 予測日射強度の時系列データの設定¹³⁶⁾

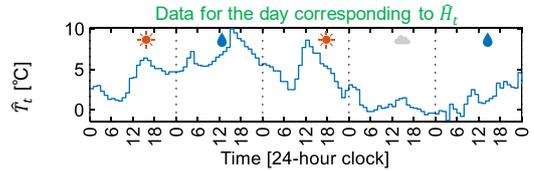


図14 予測外気温の時系列データの設定¹⁵⁴⁾

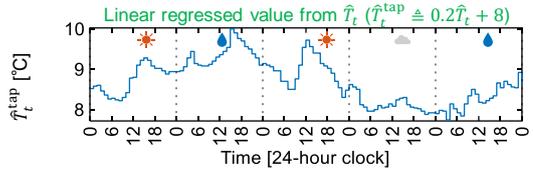


図15 予測上水道水温の時系列データの設定^{154), 155)}

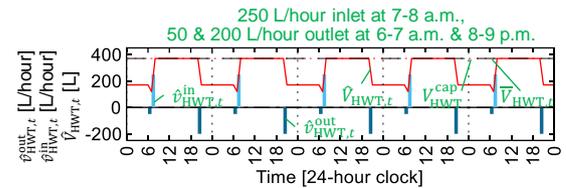


図16 貯湯槽への予測入出水速度と予測貯湯量の 時系列データの設定¹⁶⁾

を想定し、BEVの充放電可能時間帯は自宅に駐車中の朝と夜のみとした。

図13で示される予測日射強度 \hat{H}_t はMETPV-20¹³⁶⁾の斜面日射量(南向き、傾斜角30°)の平均年データを基に設定した。計画期間5日間の各日の日中の天候は、1日目は晴天、2日目は雨天、3日目は晴天、4日目は曇天、5日目は雨天である。

図14で示される予測外気温 \hat{T}_t は \hat{H}_t の時系列データに対応する日時のデータを気象庁のデータベース¹⁵⁴⁾から引用した。計画期間5日間のうち、1日目から3日目は比較的暖かく、4日目と5日目は冬日である。特に、除霜閾値 $T^{DTH} \triangleq 5^\circ\text{C}$ 以下となる \hat{T}_t ではHPWHの効率が $\eta_{\text{HPU}} \triangleq 0.8$ 倍になる⁴²⁾と仮定した。

図15で示される予測上水道水温 \hat{T}_t^{tap} は \hat{T}_t から線形回帰による予測が可能である^{38), 57)}と仮定し、図15中の回帰式より求めた。回帰係数は文献^{154), 155)}のデータを参考にして設定した。

図16で示されるHWTの予測温水出水速度 $\hat{v}_{\text{HWT},t}^{\text{out}}$ 、予測冷水入水速度 $\hat{v}_{\text{HWT},t}^{\text{in}}$ 、予測貯湯量 $\hat{V}_{\text{HWT},t}$ は文献¹⁶⁾の値を参考にして設定した。特に、朝の出水直後に満水まで入水を

行うことで、日中の PVA の余剰電力を用いた HPWH による給湯や STC による給湯を行いやすいスケジュールとした。また、 $\hat{v}_{HWT,t}^{out}$ を HWL の予測需要湯量使用速度 $\hat{v}_{HWT,t}$ より低い値として設定することにより、上水道からの HWL の湯温調整用冷水入水 ($\hat{v}_{HWT,t}^{dilute}$) を行う運用となるように設定した。このような設定により、HWT の貯湯温 $T_{HWT,k}$ が 60°C から 80°C となるようにした。なお、本モデルでは、 $\hat{v}_{HWT,t}^{out}$ 、 $\hat{v}_{HWT,t}^{in}$ 、 $\hat{V}_{HWT,t}$ は最適化モデルでは定数(固定スケジュール)として設定した。これらの最適化(可変スケジュール化)を含むより包括的な意味での全体最適化は今後の課題とする。

5.4 実験環境

JOP-TSCPOS-DES は、MATLAB R2024b¹⁵⁷⁾上で Optimization Toolbox を利用した問題ベースアプローチ¹⁵⁸⁾によってコード化され、Gurobi Optimizer V. 12.0¹⁵⁹⁾を使用して求解された。求解の実行に使用した計算機の仕様は CPU : Intel Core i9-13900(最大 5.2 GHz, 8P + 16E コア, 32 スレッド), メモリ : 32 GB(DDR5), OS : Windows 11 Pro 64-bit である。Gurobi の求解終了条件は初期設定のもの(相対最適性ギャップ(Gap)¹⁶⁰⁾が 0.01%未満)とし、Parallel Computing Toolbox を利用した parfor¹⁶¹⁾によって全ての検討ケースを並列して求解した。

5.5 実装された最適化モデルの規模

コード化された MILP 問題である JOP-TSCPOS-DES の規模は、ソルバーによる前処理前で、最適化変数は 38,587 個(内、連続変数が 30,714 個, 0-1 変数を含む整数変数が 7,873 個)である。制約は各検討ケースで、53,629 個(Cases a), 53,628 個(Cases 1b), 53,618 個(Cases 2b)である。これらの制約数の違いは(233)式から(235)式の有無による違いである。

5.6 数値実験の結果 1 : 解の相対最適性ギャップ

全ての検討ケースにおいて、実行可能解は得られたものの、計算機のメモリを使い果たしても最適解(Gap が 0.01%未満)を得ることはできなかった。求解開始から 5 時間後(実験環境を考慮した求解限界)までの各検討ケースの Gap の減少推移を図 17 に示す。

図 17 より、各 Gap は求解開始 2 時間(7,200 秒)後には十分に収束し、5 時間(18,000 秒)後では Cases a は 1.9-3.3%, Cases b は 5.0-6.5%であることが確認できる。これらが 0%(厳密解)に収束しなかった要因としては、モデルの詳細度を上げるために Big M²⁶⁾やインジケータ変数²⁷⁾などを多用しており、最適化問題の解の探索が難しかったことが挙げられる。特に Cases a は設備容量を所与のものとした運転計画問題であるのに対し、Cases b は設備容量計画、運転計画の同時最適化問題であり、Cases b は Cases a よりも計算負荷が高く、Cases a と Cases b の Gap 差はこれに起因する。

本数値実験において注目すべきは、HPWH のダイナミック

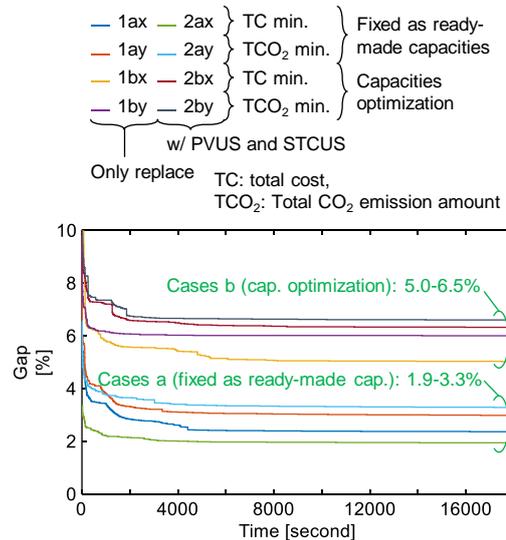


図 17 求解開始から 5 時間後までの各検討ケースの相対最適性ギャップの減少推移

スの考慮や複数の RE 機器を対象とした複雑かつ大規模な全体最適化問題を、市販の計算機を用いて現実的な求解時間内で「解けた」点にある。本稿では、求解開始から 5 時間後の実行可能解を、市販の計算機を用いて現実的な求解時間内で得られる最大精度の解とし、本最適化モデルの準最適解として扱う。以後、本稿では、この解を基に議論を進める。

5.7 数値実験の結果 2 : 導出された設備容量と運転計画

以下、最適化変数 X の求解値を X^* とする。

各検討ケースにおける、設備容量の求解値 C_e^* , $C_{HPU}^{heat,*}$, $C_{ESM}^{use,*}$, N_e^* を表 12 に、設備設置屋根面積の求解値 $a_{PVA} N_{PVA}^*$ + $a_{STC} N_{STC}^*$ と 5 日間の日割電気料金の求解値 $Y^{ele,PR,*}$ を表 13 に、5 日間の日割ガス料金の求解値 $Y^{gas,PR,*}$ と日割上下水道料金の求解値 $Y^{water,PR,*}$ を表 14 に、5 日間の設備減価償却費の求解値 $Y^{ini,DC,*}$ を表 15 に、5 日間の日割総コストの求解値 $Y^{total,PR,*}$ を表 16 に、5 日間の設備減価償却 CO₂ 排出量の求解値 $G^{ini,DC,*}$ を表 17 に、5 日間の日割総 CO₂ 排出量の求解値 $G^{total,PR,*}$ を表 18 に示す。

ESM の売買電力の求解値 $P_{ESM,t}^*$ の構成を図 18 に、HWT の蓄熱量の求解値 $Q_{HWT,t}^*$ の構成を図 19 と図 20 に、HPU の加熱における COP の求解値 $r_{HPU,t}^{COP,heat,*}$ の構成を図 21 に、HPU の加熱における出力熱力の求解値 $W_{HPU,t}^{heat,*}$ の構成を図 22 に、HWL の予測需要湯量使用速度 $\hat{v}_{HWT,t}$ の構成を図 23 に示す。

検討ケース毎の HPU の加熱における入力電力の求解値 $P_{HPU,t}^{heat,*}$ と出力熱力の求解値 $W_{HPU,t}^{heat,*}$ と COP の求解値 $r_{HPU,t}^{COP,heat,on,*}$ の関係を図 24 に、検討ケース毎の HPU の加熱における $P_{HPU,t}^{heat,*}$ と $W_{HPU,t}^{heat,*}$ と $r_{HPU,t}^{COP,heat,on,*}$ の計画期間におけるばらつきを図 25 に示す。

他の主要な求解値に関しては付録に示す。

表 12 各検討ケースにおける設備容量の求解値

Case	Equipment capacity																
	C_{PVA}^*	N_{PVA}^*	C_{HPC}^*	C_{BCD}^*	C_{VCD}^*	C_{BAT}^*	C_{BEV}^*	C_{PSU}^*	C_{SDB}^*	C_{GWH}^*	C_{HWT}	V_{HWT}^{cap}	N_{STC}^*	$C_{HPU}^{heat,*}$	C_{GEV}^*	C_{ESM}^*	$C_{ESM}^{use,*}$
	[kW]	[item]	[kW]	[kW]	[kW]	[kWh]	[kWh]	[kW]	[kW]	[kW]	[kWh]	[L]	[item]	[kW]	[L]	[kW]	[kW]
1ax	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	41.6	370.0	0	4.5	51.0	3.0	3.0
1ay	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	41.6	370.0	0	4.5	51.0	6.0	5.8
1bx	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	41.6	370.0	0	4.1	51.0	3.0	3.0
1by	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	41.6	370.0	0	17.4	51.0	6.0	6.0
2ax	4.8	20	6.0	6.7	6.0	6.7	35.8	10.0	10.0	27.9	41.6	370.0	2	4.5	0.0	2.0	2.0
2ay	4.8	20	6.0	6.7	6.0	6.7	35.8	10.0	10.0	27.9	41.6	370.0	2	4.5	0.0	4.0	3.8
2bx	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	15.0	41.6	370.0	0	3.9	51.0	3.0	3.0
2by	15.9	66	9.4	0.0	1.4	0.0	35.8	9.4	3.5	15.0	41.6	370.0	0	11.7	0.0	6.0	6.0

All values are rounded up to one decimal place. Gray cells indicate fixed values in each case. Bold values indicate the maximum value in each column.

表 13 各検討ケースにおける設備設置屋根面積と 5 日間の日割電気料金の求解値

Case	Equipment-installed roof area			Pro-rated electricity cost						
	$a_{PVA}N_{PVA}^* + a_{STC}N_{STC}^*$			$\gamma_{ele,PR,*}$						
	$a_{PVA}N_{PVA}^*$	$a_{STC}N_{STC}^*$	Total	$\gamma_{ele,bas,PR,*}$	$\gamma_{ele,use,PR,*}$		Subtotal	$\gamma_{ele,sur,PR,*}$	$-\gamma_{ele,sell,PR,*}$	Total
					$\gamma_{ele,buy,PR,*}$	$\gamma_{ele,adj,PR,*}$				
[m ²]	[m ²]	[m ²]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	
1ax	0.0	0.0	0.0	150	4,800	-907	3,892	475	0	4,516
1ay	0.0	0.0	0.0	299	4,767	-901	3,866	472	0	4,636
1bx	0.0	0.0	0.0	150	4,800	-907	3,892	475	0	4,516
1by	0.0	0.0	0.0	299	4,665	-882	3,782	462	0	4,542
2ax	24.1	4.1	28.1	100	6,063	-1,138	4,924	596	-1	5,619
2ay	24.1	4.1	28.1	199	5,981	-1,123	4,857	588	-157	5,487
2bx	0.0	0.0	0.0	150	4,275	-811	3,463	425	0	4,037
2by	79.4	0.0	79.4	299	5,706	-1,073	4,633	562	-620	4,873

Area values are rounded up to one decimal place. Cost values are rounded up to the nearest integer.

Bold values indicate the maximum value at area category and the minimum value at cost category in each column.

表 14 各検討ケースにおける 5 日間の日割ガス料金と日割上下水道料金の求解値

Case	Pro-rated gas cost					Pro-rated water and sewage cost				
	$\gamma_{gas,PR,*}$					$\gamma_{water,PR,*}$				
	$\gamma_{gas,bas,PR,*}$	$\gamma_{gas,use,PR,*}$			Total	$\gamma_{water,bas,PR}$	$\gamma_{water,use,PR,*}$	$\gamma_{sewage,bas,PR}$	$\gamma_{sewage,use,PR,*}$	Total
		$\gamma_{gas,buy,PR,*}$	$\gamma_{gas,adj,PR,*}$	Subtotal						
[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	
1ax	0	0	0	0	0	172	424	190	505	1,290
1ay	0	0	0	0	0	172	424	190	505	1,290
1bx	0	0	0	0	0	172	424	190	505	1,290
1by	0	0	0	0	0	172	424	190	505	1,290
2ax	97	354	57	411	508	172	424	190	504	1,289
2ay	127	1,041	172	1,212	1,338	172	424	190	504	1,289
2bx	97	309	49	358	455	172	424	190	504	1,289
2by	127	1,011	167	1,178	1,304	172	424	190	504	1,289

All values are rounded up to the nearest integer. Gray cells indicate fixed values in each case. Bold values indicate the minimum value in each column.

表 15 各検討ケースにおける 5 日間の設備減価償却費の求解値

Case	Equipment depreciation cost																	
	$\gamma^{ini,DC,*}$																	
	$\gamma^{DC,*}_{PVA}$	$\gamma^{DC,*}_{HPC}$	$\gamma^{DC,*}_{BCD}$	$\gamma^{DC,*}_{VCD}$	$\gamma^{DC,*}_{BAT}$	$\gamma^{DC,*}_{BEV}$	$\gamma^{DC,*}_{PSU}$	$\gamma^{DC,*}_{SDB}$	$\gamma^{DC,*}_{GWH}$	γ^{DC}_{HWT}	$\gamma^{DC,*}_{STC}$	$\gamma^{DC,*}_{HPU}$	$\gamma^{DC,*}_{GEV}$	$\gamma^{ini,DC,*}_{BAT}$	$\gamma^{ini,DC,*}_{BEV}$	$\gamma^{ini,DC,*}_{HWT}$	$\gamma^{ini,DC,*}_{GEV}$	Total
	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]
1ax	0	0	0	0	0	0	0	236	0	52	0	308	2,619	0	0	1	10	3,223
1ay	0	0	0	0	0	0	0	236	0	52	0	308	2,619	0	0	1	10	3,223
1bx	0	0	0	0	0	0	0	236	0	52	0	278	2,619	0	0	1	10	3,192
1by	0	0	0	0	0	0	0	236	0	52	0	1,186	2,619	0	0	1	10	4,100
2ax	2,398	956	403	1,735	3,186	9,848	236	236	313	52	187	308	0	1	1	1	0	19,853
2ay	2,398	956	403	1,735	3,186	9,848	236	236	313	52	187	308	0	1	1	1	0	19,852
2bx	0	0	0	0	0	0	0	62	168	52	0	265	2,619	0	0	1	10	3,173
2by	7,911	1,493	0	382	0	9,848	221	80	168	52	0	799	0	0	1	1	0	20,951

All values are rounded up to the nearest integer. Gray cells indicate fixed values in each case. Bold values indicate the minimum value in each column.

表 16 各検討ケースにおける 5 日間の日割総コストの求解値

Case	Pro-rated total cost					
	$\gamma^{total,PR,*}$					
	$\gamma^{ele,PR,*}$	$\gamma^{gas,PR,*}$	$\gamma^{water,PR,*}$	$\gamma^{oil,*}$	$\gamma^{ini,DC,*}$	Total
	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]	[JPY]
1ax	4,516	0	1,290	5,155	3,223	14,183
1ay	4,636	0	1,290	5,155	3,223	14,302
1bx	4,516	0	1,290	5,155	3,192	14,153
1by	4,542	0	1,290	5,155	4,100	15,086
2ax	5,619	508	1,289	0	19,853	27,267
2ay	5,487	1,338	1,289	0	19,852	27,965
2bx	4,037	455	1,289	5,155	3,173	14,108
2by	4,873	1,304	1,289	0	20,951	28,416

All values are rounded up to the nearest integer. Bold values indicate the minimum value in each column.

表 17 各検討ケースにおける 5 日間の設備減価償却 CO₂ 排出量の求解値

Case	Equipment depreciation CO ₂ emissions																	
	$G^{ini,DC,*}$																	
	$G^{DC,*}_{PVA}$	$G^{DC,*}_{HPC}$	$G^{DC,*}_{BCD}$	$G^{DC,*}_{VCD}$	$G^{DC,*}_{BAT}$	$G^{DC,*}_{BEV}$	$G^{DC,*}_{PSU}$	$G^{DC,*}_{SDB}$	$G^{DC,*}_{GWH}$	G^{DC}_{HWT}	$G^{DC,*}_{STC}$	$G^{DC,*}_{HPU}$	$G^{DC,*}_{GEV}$	$G^{ini,DC,*}_{BAT}$	$G^{ini,DC,*}_{BEV}$	$G^{ini,DC,*}_{HWT}$	$G^{ini,DC,*}_{GEV}$	Total
	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]
1ax	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.99	0.00	0.15	0.00	0.01	6.07	0.00	0.00	0.01	0.03	10.24
1ay	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.99	0.00	0.15	0.00	0.01	6.07	0.00	0.00	0.01	0.03	10.24
1bx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.99	0.00	0.15	0.00	0.01	6.07	0.00	0.00	0.01	0.03	10.24
1by	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.99	0.00	0.15	0.00	0.04	6.07	0.00	0.00	0.01	0.03	10.27
2ax	2.64	2.38	2.67	2.38	8.78	21.46	3.99	3.99	0.55	0.15	0.07	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	49.04
2ay	2.64	2.38	2.67	2.38	8.78	21.46	3.99	3.99	0.55	0.15	0.07	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	49.03
2bx	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05	0.30	0.15	0.00	0.01	6.07	0.00	0.00	0.01	0.03	7.59
2by	8.71	3.71	0.00	0.53	0.00	21.46	3.74	1.36	0.30	0.15	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	39.97

All values are rounded up to two decimal places. Gray cells indicate fixed values in each case. Bold values indicate the minimum value in each column.

表 18 各検討ケースにおける 5 日間の日割総 CO₂ 排出量の求解値

Case	Pro-rated total CO ₂ emissions									
	$G^{total,PR,*}$									
	$G^{ele,PR,*}$			$G^{gas,PR,*}$	$G^{water,PR,*}$	$G^{oil,*}$			$G^{ini,DC,*}$	Total
	$G^{ele,buy,PR,*}$	$-G^{ele,sell,PR,*}$	subtotal			$G^{oil,buy,*}$	$G^{oil,run,*}$	subtotal		
[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	[kg-CO ₂]	
1ax	65.45	0.00	65.45	0.00	2.21	13.88	67.09	80.97	10.24	158.85
1ay	65.01	0.00	65.01	0.00	2.21	13.88	67.09	80.97	10.24	158.42
1bx	65.45	0.00	65.45	0.00	2.21	13.88	67.09	80.97	10.24	158.85
1by	63.67	0.00	63.67	0.00	2.21	13.88	67.09	80.97	10.27	157.10
2ax	82.10	-0.02	82.09	3.57	2.21	0.00	0.00	0.00	49.04	136.89
2ay	81.02	-9.44	71.59	10.86	2.21	0.00	0.00	0.00	49.03	133.67
2bx	58.52	0.00	58.52	3.11	2.21	13.88	67.09	80.97	7.59	152.37
2by	77.40	-37.25	40.15	10.55	2.21	0.00	0.00	0.00	39.97	92.86

All values are rounded up to two decimal places. Bold values indicate the minimum value in each column.

表 16 より、5 日間の日割総コストの求解値 $y^{total,PR,*}$ が最も低くなるのは Case 2bx(設備更新に加えて RE 機器の技術選択と設備容量計画を考慮する総コスト最小化ケース)であることが確認できる。加えて表 12 より、Case 2bx では設備更新によって HPU は既製品容量である 4.5 kW よりも小さい 3.9 kW まで導入され、他の RE 機器は導入されていないことが確認できる。この際、給湯は HP とガスのハイブリッドであり、GWH は最小導入可能容量とした 15 kW(8 号程度)だけ導入されている。このことは、表 4 で設定した HPWH を除く現状の各種 RE 機器の導入コストが高く、技術選択や設備容量最適化を行っても経済的視点からは HPU を除く RE 機器の導入は最適解とならないことを示している。なお、本数値実験では、元々 HPWH を導入していた DES の設備更新を想定したものの、本稿の冒頭で述べたように、日本全体としての業務部門や家庭部門の給湯においては、電力や RE 熱源の利用は約 14%程度である⁹⁾。Case 2bx の結果における HPU と GWH の合計容量に占める HPU の容量の比率は 20.6%である。ゆえに、これらの部門では現状の導入コストにおいても、これらの差分である 6.6 ポイント分だけ HPU の追加導入ポテンシャルがあることが推測される。

表 18 より、5 日間の日割総 CO₂ 排出量の求解値 $G^{total,PR,*}$ が最も低くなるのは Case 2by(設備更新に加えて RE 機器の技術選択と設備容量計画を考慮する総 CO₂ 排出量最小化ケース)であることが確認できる。このとき、Case 1ay(現状の DES の設備での CO₂ 排出量最小化ケース)での $G^{total,PR,*}$ は 158.42 kg-CO₂ であるに対して、Case 2by での $G^{total,PR,*}$ は 92.86 kg-CO₂ であり、各種 RE 機器の技術選択、設備容量計画、運転計画の同時最適化により、 $G^{total,PR,*}$ を 41.4%削減できることが分かった。この際、表 16 より、Case 1ay での $y^{total,PR,*}$ は 14,302 JPY である対し

て、Case 2by での $y^{total,PR,*}$ は 28,416 JPY であり、総コストが約 2 倍に増加することが見込まれる。特に、Case 1ay での 5 日間の設備減価償却費の求解値 $y^{ini,DC,*}$ は 3,223 JPY であるのに対して、Case 2by での $y^{ini,DC,*}$ は 20,951 JPY であり、設備減価償却費が約 6.5 倍に増加することが見込まれる。このことは、本想定下では RE 機器による $G^{total,PR,*}$ の削減効果を最大限得るためには、現状の RE 機器の導入コストを、技術革新や政府による補助金等で少なくとも 6.5 分の 1 程度にする必要があることを示唆している。なお、本数値実験の想定では、卒 FIT 後(売電料金単価 $y^{ele,sell}$ は 8 JPY/kWh 固定)、PVA と STC は屋根設置のみ(最大設置可能面積 A^{roof} は 80 m²)、余剰売電にかかる出力制御指令は無し(引込線容量 6 kW まで売電可能)としており、この際の Case 2by での $G^{total,PR,*}$ は 0 以下の値とならない。このことは、本想定下では技術選択、設備容量計画、運転計画の同時最適化を行っても、DES(業務他部門における小規模な事業所 1 棟やテナント 1 区間、家庭部門における住宅 1 軒など)単体では CN を達成できないことを示しており、他部門との連携等や新たな技術革新が必要となることを示唆している。

表 18 より、Cases 1(設備更新のみを行い、RE 機器の導入検討を行わないケース)では $G^{total,PR,*}$ は 157.10~158.85 kg-CO₂ であり、ほとんど変化がない。このことは、HPWH の運用方法や導入容量を変化させることは $G^{total,PR,*}$ 減少への寄与が小さく、PVUS や STCUS の導入による HPWH との連携が不可欠であることを示している。

表 12 より、Case 2by では HPU は既製品容量である 4.5 kW の 2 倍以上となる 11.7 kW が導入されており、それに加えて GWH は最小導入可能容量とした 15 kW(8 号程度)だけ導入されていることが確認できる。このことは、HPWH のみを利用するよりも、HPWH と GWH を連携利

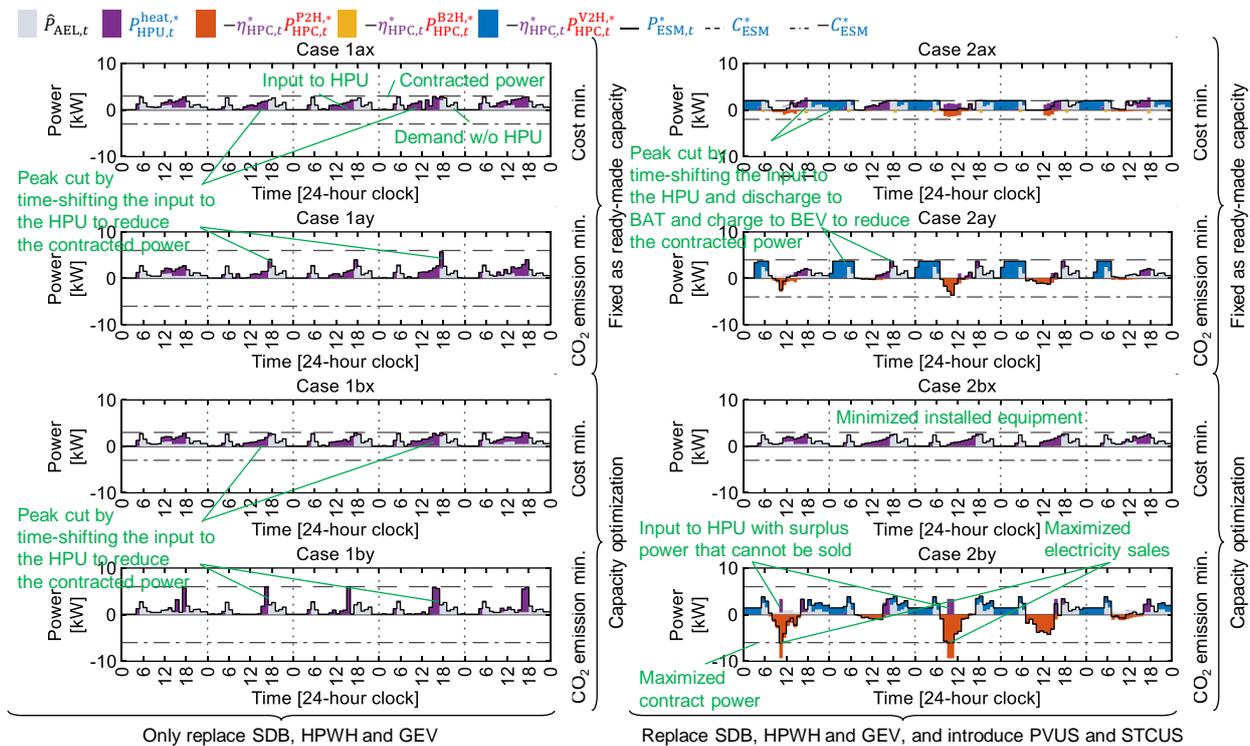


図 18 電力スマートメータの売買電力の求解値の構成

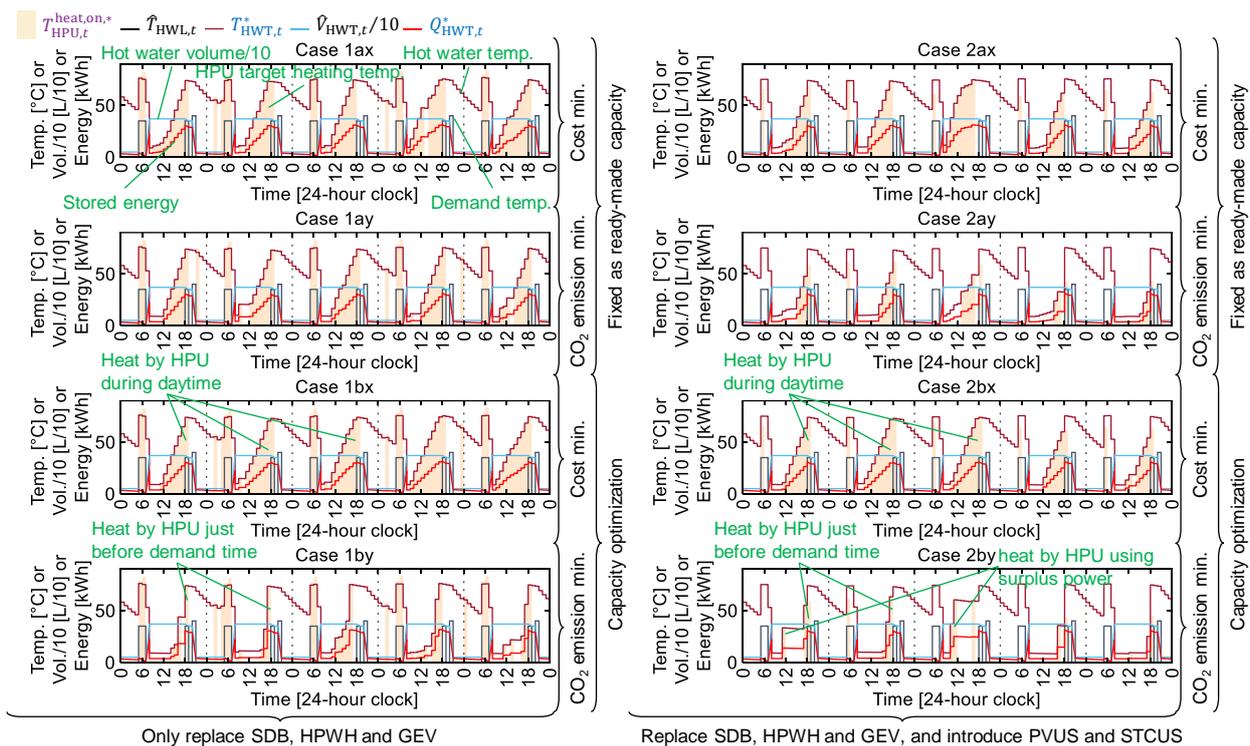


図 19 貯湯槽の蓄熱量の求解値の構成(温度と水量)

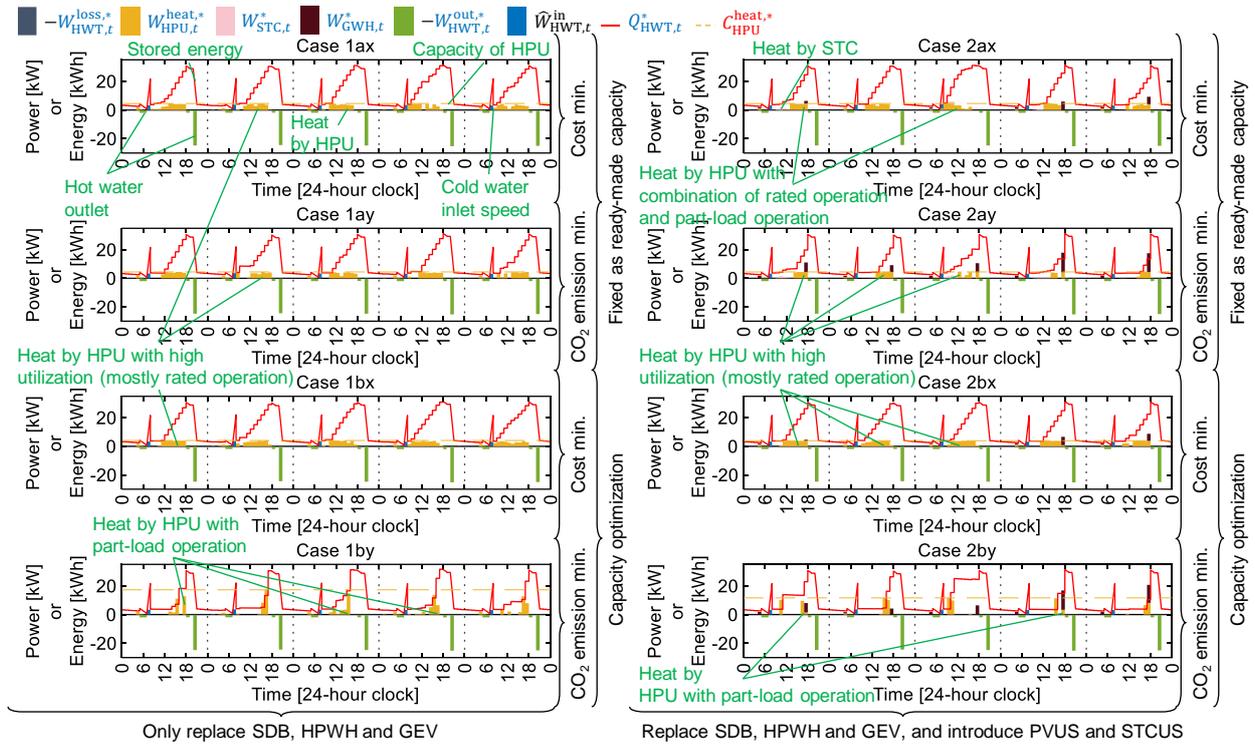


図 20 貯湯槽の蓄熱量の求解値の構成(熱力)

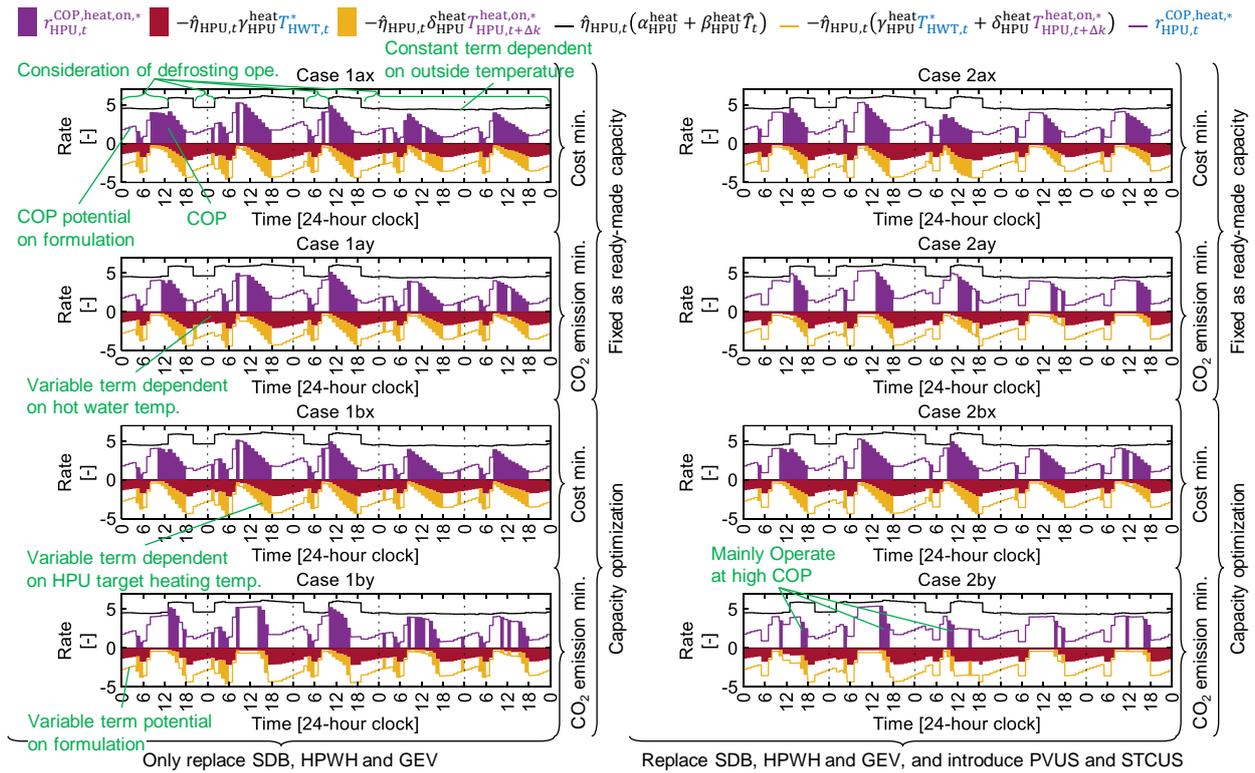


図 21 空気熱ヒートポンプユニットの加熱における成績係数の求解値の構成

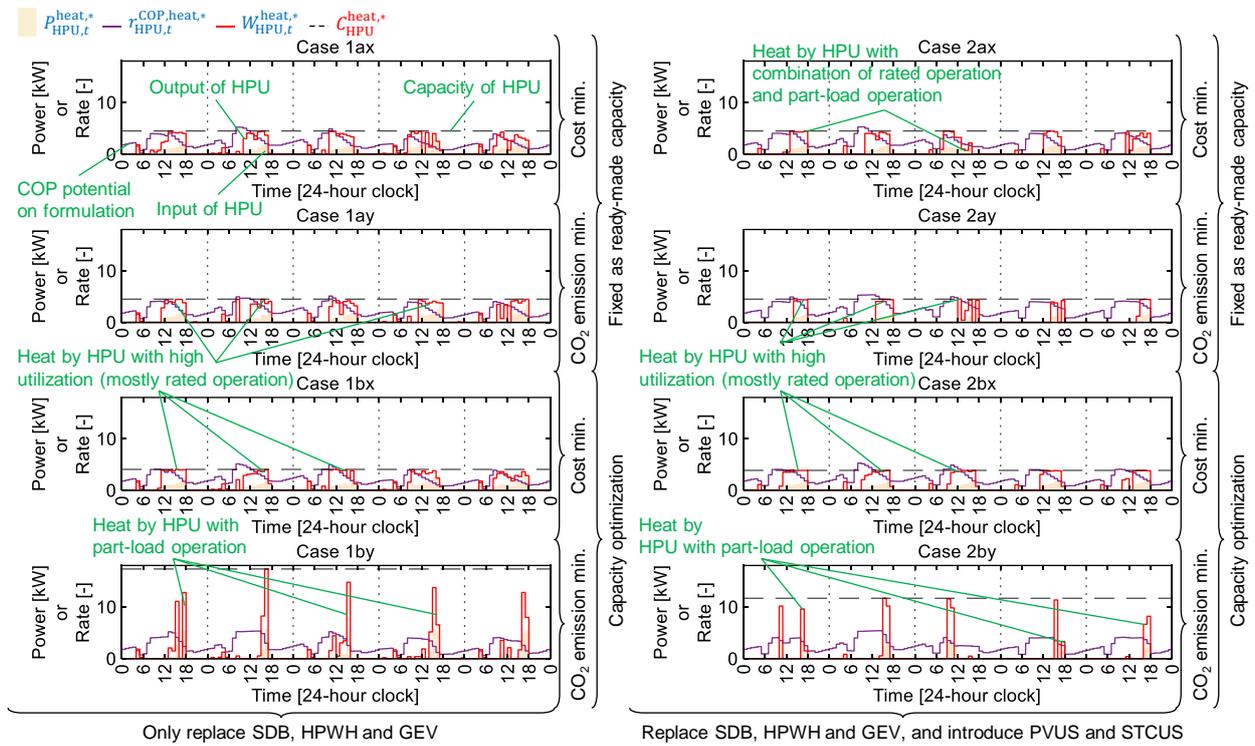


図 22 空気熱ヒートポンプユニットの加熱における出力熱力の求解値の構成

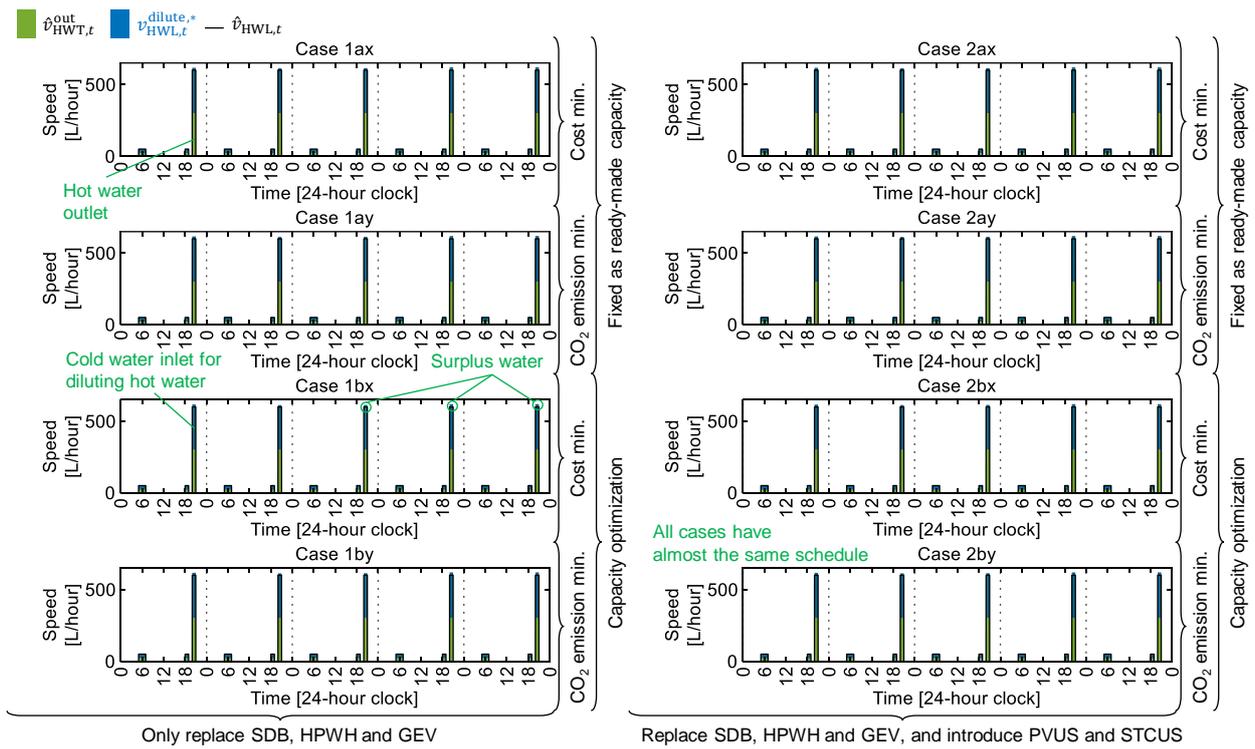


図 23 給湯負荷の予測需要湯量使用速度の構成

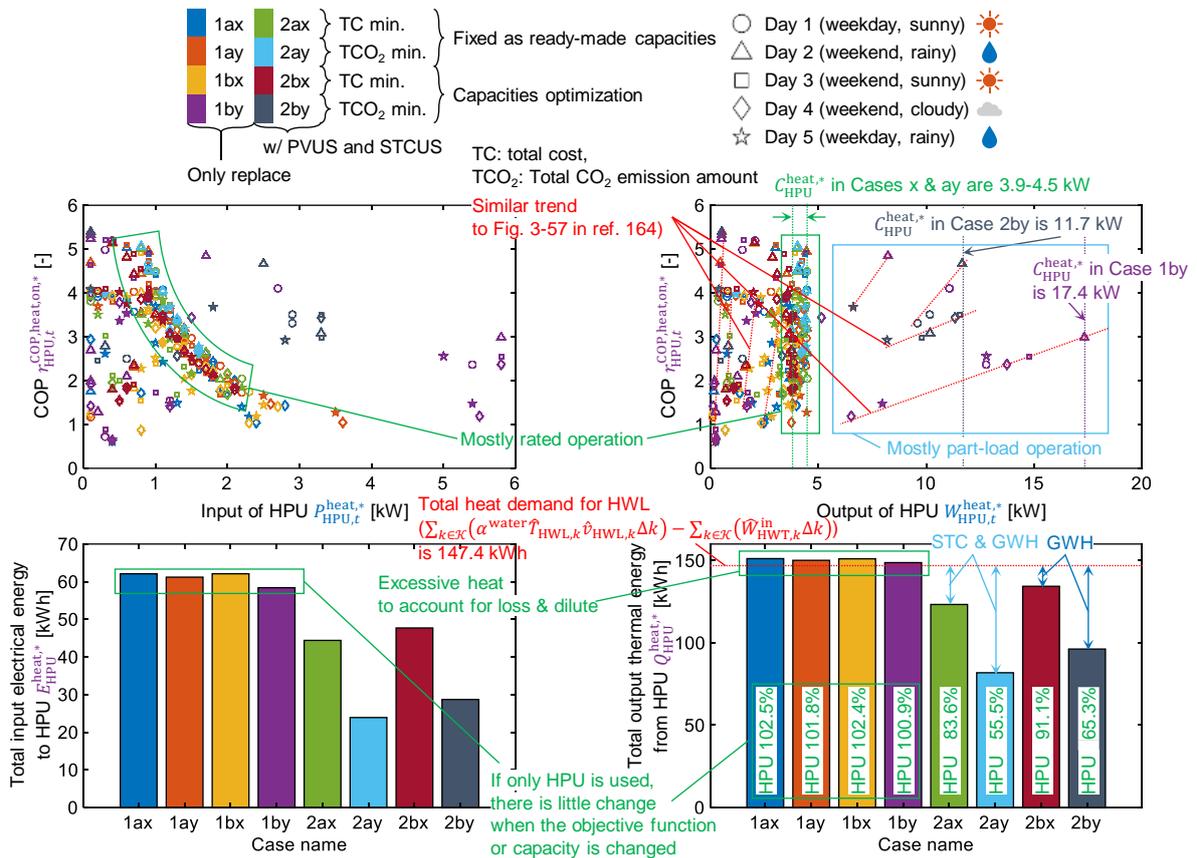


図 24 検討ケース毎のヒートポンプユニットの加熱における入力電力と出力熱力と成績係数の関係

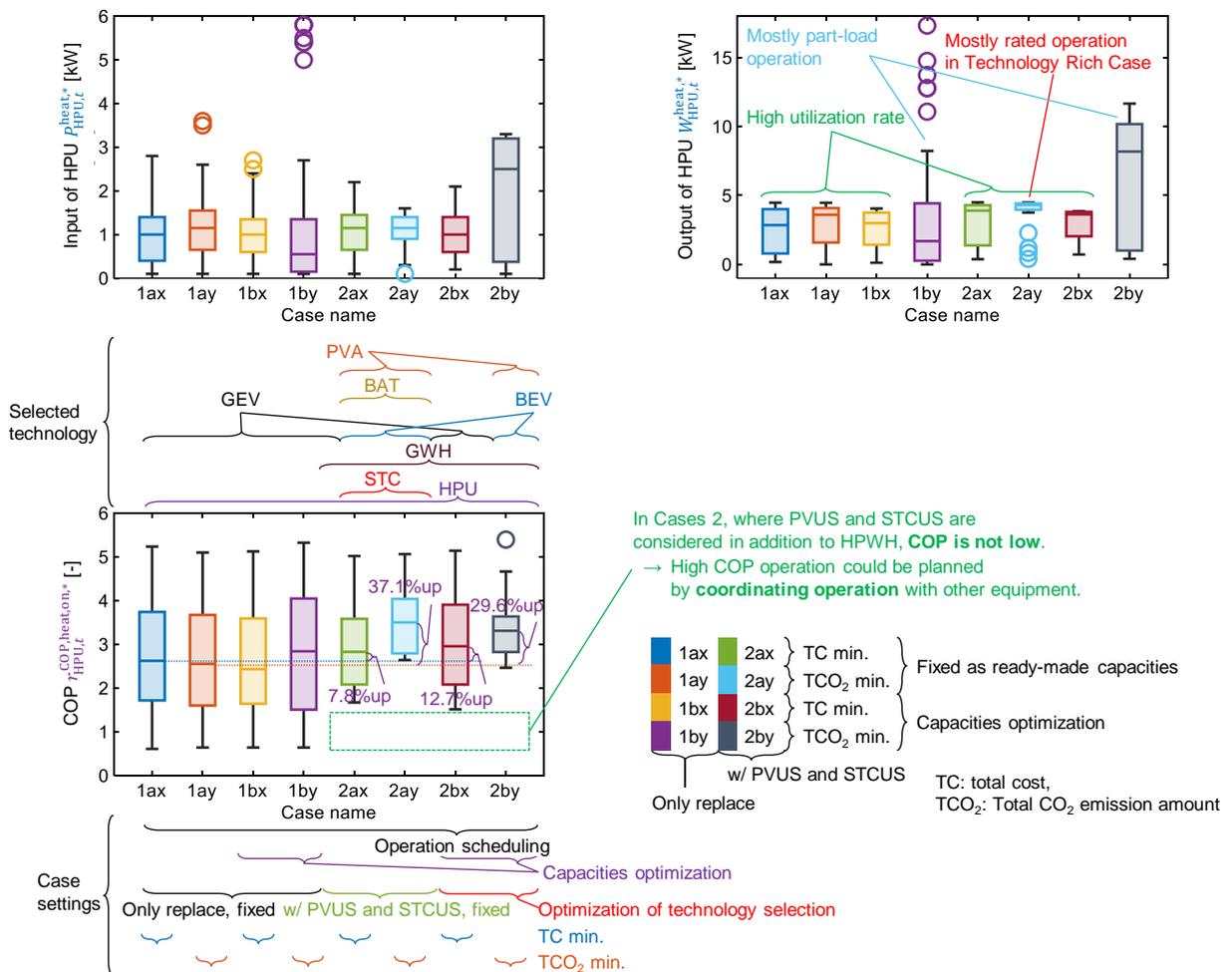


図 25 検討ケース毎のヒートポンプユニットの加熱における入力電力と出力熱力と成績係数の計画期間におけるばらつき

用する方が CN へ近づくことを示しており、文献¹⁶²⁾、¹⁶³⁾の研究内容を支持するものである。

加えて表 12 と表 13 より、Case 2by では PVA は A^{roof} を最大限活用して 15.9 kW(79.4 m²) 導入されているのに対し、STC や BAT は導入されていない。これは、(106) 式、(107) 式に示したように、本モデルでは売電によって買電と同値の電気 CO₂ 排出係数 g^{ele} で計算される CO₂ 排出量の削減効果があると仮定したためである。つまり、本数値実験では、表 3 で設定した売電による 0.481 kg-CO₂/kWh の削減効果を優先するために、変換効率による損失が大きい BAT を利用した自家消費や HWT の貯湯温や外気温によって効率低下が起こる STC の導入よりも、PVA を優先導入し、売電を行ったためと考えられる。この売電は、図 18 の Case 2by における正午頃のスケジュールからも確認できる。この際、引込線容量 6 kW を超える売電はできないことから、図 18 の 1 日目と 3 日目では引込線容量の制限によって売電できなかった余剰電力を HPU での給湯に利用しており、この給湯が HPU の導入容量 $C_{\text{HPU}}^{\text{heat}*}$ を決定する一因であることが図 22 の Case 2by における 3 日目の正午頃のスケジュールから分かる。なお、本数値実験の想定では、余剰売電にかかる出力制御指令は無しとした。売電可能量が減少(出力制御の要請量が増加)した際には、PVA の余剰売電よりも自家消費が優先されることから、導入設備構成や運用が変化するものと考えられる。出力制御指令を考慮した際のケーススタディは今後の課題とする。

図 22 より、HPU の加熱における出力熱力の求解値 $W_{\text{HPU},t}^{\text{heat}*}$ (赤の実線) と $C_{\text{HPU}}^{\text{heat}*}$ (黒の破線) に着目すると、Cases by は主に部分負荷運転、Case 2ax は定格に近い運転と部分負荷運転の組み合わせ、その他の検討ケースでは定格に近い運転が計画されていることが確認できる。このことは、図 25 右上に示す $W_{\text{HPU},t}^{\text{heat}*}$ の箱ひげ図からも同様に、最大値 (= $C_{\text{HPU}}^{\text{heat}*}$) と中央値が近く、また四分位範囲が小さいほど定格に近い運転を、最大値と中央値が遠く、また四分位範囲が大きいほど部分負荷運転の割合が多くなることとして確認できる。これらの結果は、各種 RE 機器の技術選択、設備容量計画、運転計画の同時最適化として CO₂ 排出量の最小化を行う際には、部分負荷運転の考慮が必要になることを示している。つまり、詳細な部分負荷運転を考慮するために本モデルで取り入れた HPWH のダイナミクスの考慮に意義があることを確認できたことを示している。

加えて図 25 右上において、最大値と中央値が近く、定格に近い運転の傾向を強く示す Case 2ay と Case 2bx では、図 24 右上で示される $W_{\text{HPU},t}^{\text{heat}*}$ と COP の求解値 $r_{\text{HPU},t}^{\text{COP,heat,on}*}$ の散布図において、緑枠に示される横軸と垂直となる分布が確認できる。この分布は図 24 左上で示される HPU の加熱における入力電力の求解値 $P_{\text{HPU},t}^{\text{heat}*}$ と $r_{\text{HPU},t}^{\text{COP,heat,on}*}$ の散布図にお

いて、緑枠に示される曲線分布として確認できる。他方、図 25 右上において、四分位範囲が大きく、部分負荷運転の傾向を強く示す Cases by では、図 24 右上において、赤の点線で示される放射状分布が確認できる。このような放射状分布は文献¹⁶⁴⁾の解析結果である図 3-57 と同じ傾向を示し、部分負荷運転を特徴づける分布であると考えられる。以上をまとめると、HPWH のダイナミクスを考慮した本モデルにより、定格運転や部分負荷運転の傾向を区別・可視化が可能であることが分かった。

図 24 右下に示す HPU の加熱における総出力熱量の求解値 $Q_{\text{HPU}}^{\text{heat}*}$ の棒グラフにおいて、赤の点線は HWL の総加熱需要(147.4 kWh)を示し、各棒グラフ内の HPU の%は総加熱需要に対する $Q_{\text{HPU}}^{\text{heat}*}$ の百分率を示す。ここで、Cases 1 において百分率が 100 を超えるのは、HWT における熱損失などを考慮しているためである。また、Cases 2 において HPU の百分率が低い理由は STC や GWH との連携運転を行っているためである。この際、図 25 左下に示す $r_{\text{HPU},t}^{\text{COP,heat,on}*}$ の箱ひげ図において、HPU のみで給湯を行う Cases 1 に比べて、HPU、STC、GWH の連携運転を行う Cases 2 の方が $r_{\text{HPU},t}^{\text{COP,heat,on}*}$ の最小値が高くなることが確認できる。これは、連携運転によって HPU の COP が低くなる時間帯の運転を STC や GWH などの他の機器に任せることが可能になったためである。本数値実験の条件では、図 14 に示すように、4 日目と 5 日目は外気温低く、COP が低くなる。図 20 における Cases 2 のスケジュールでは、4 日目と 5 日目は HPU よりも GWH による給湯の割合が高い。ゆえにこの連携運転が HPU の高 COP(高効率)運転に寄与していることが分かった。また、HPU を連続運転する場合、HWT の貯湯温 $T_{\text{HWT},k}$ は徐々に上昇することから、(71) 式で示したように、COP は徐々に下降する。このような COP のダイナミクスは図 21 における $r_{\text{HPU},t}^{\text{COP,heat,on}*}$ (紫の棒グラフ) のスケジュールからも確認できる。また、図 20 における Cases 2 の 12 時から 18 時頃のスケジュールでは、HPU による加熱(黄の棒グラフ)を行った後、GWH による加熱(茶の棒グラフ)を行うスケジュールである。これは、 $T_{\text{HWT},k}$ が低温であり、HPU が高 COP 運転となる際には HPU で加熱を行い、 $T_{\text{HWT},k}$ が高温であり、HPU が低 COP となる際には GWH で加熱を行うことを示している。さらに、図 21 における Cases 2y のスケジュールの $r_{\text{HPU},t}^{\text{COP,heat,on}*}$ (紫の棒グラフ) に着目すると朝方 5 時頃の給湯を避け、夕方 18 時頃にかけて短期間だけ HPU を稼働する低 COP を避けるスケジュールであることが確認できる。このような連携運転も HPU の高 COP(高効率)運転に寄与していることが分かった。まとめると、本モデルによって COP 等などの HPWH のダイナミクスを模擬することにより、HPU と GWH の連携運転を模擬でき、その連携運転への各機器の寄与を洞察できることが分かった。

また、表 16 の $\gamma_{\text{total,PR},*}$ 、表 18 の $G_{\text{total,PR},*}$ 、図 25 左下の $\gamma_{\text{HPU},t}^{\text{COP,heat,on},*}$ の箱ひげ図では、Cases 1 内の各検討ケース間の差はあまり見られず、Cases 1 に加えて Cases 2 まで考慮すると、各検討ケース間に差が出ることを確認できる。これは、DES の HPWH の設備容量計画などを行う際には HPWH を取り巻く他の機器の電気・熱・水まで考慮することが重要であることを示している。

図 23 より、HWL の上水道からの HWL の湯温調整用冷水入水速度の求解値 $v_{\text{HWL},t}^{\text{dilute},*}$ はすべての検討ケースでほぼ同じスケジュールとなり、HWT から HWL への予測温水出水速度 $\hat{v}_{\text{HWT},k}^{\text{out}}$ (温水) に対してほぼ同量の $v_{\text{HWL},t}^{\text{dilute},*}$ (冷水) を混ぜ合わせて HWL の予測需要湯量使用速度 $\hat{v}_{\text{HWL},t}$ を満たしていることが確認できる。なお、本最適化モデルでは、 $\hat{v}_{\text{HWT},k}^{\text{out}}$ 、上水道から HWT への予測冷水入水速度 $\hat{v}_{\text{HWT},t}^{\text{in}}$ 、HWT の容積 $V_{\text{HWT}}^{\text{cap}}$ は定数として扱っている。これらの最適化まで考慮する場合には検討ケースごとに $v_{\text{HWL},t}^{\text{dilute},*}$ のスケジュールに変化が生じる可能性がある。これらを考慮した包括的な意味での全体最適化手法への発展は今後の課題とする。

6. おわりに

本稿では、DES における HPWH を中心とする多様な機器の技術選択と設備容量計画を、DEMS によって行われる DES の運転計画を考慮した上で、総コストや総 CO₂ 排出量を評価指標とした全体最適化により立案する数理モデル (プラントモデル SPM-TSCPOS-DES と最適化モデル JOP-TSCPOS-DES) を提案した。提案モデルの新規性は HPWH のダイナミクス (入力電力、出力熱力、貯湯温、貯湯量、蓄熱量、沸き上げ目標温度、COP の時間変化) と電気・熱・水の連携を考慮した点である。MILP 問題として定式化された JOP-TSCPOS-DES の数値実験は DES の一種である住宅 1 軒を対象としたケーススタディとして実施された。

本論文の貢献や明らかとなった知見は以下の通りである。

- HPWH のダイナミクスの考慮や複数の RE 機器を対象とした複雑かつ大規模な全体最適化問題 (JOP-TSCPOS-DES) を提案し、提案問題が市販の計算機を用いて現実的な求解時間内で解けることを示した。
- JOP-TSCPOS-DES を用いたケーススタディによって、DES を対象とした技術経済性分析や環境評価などが可能であることを示した。特に、本稿で実施したケーススタディによって明らかとなった知見は次の通りである。
 - ✓ 現状の RE 機器の導入コストでは、技術選択や設備容量最適化を行う場合、経済的視点からは HPU は 3.9 kW まで導入されるが、HPU 以外の RE 機器の導入は最適解となら

ない。

- ✓ 技術選択・設備容量計画・運転計画の同時最適化によって総 CO₂ 排出量最小化を行うと、HPWH 11.7 kW に加えて PVA と GWH が導入され、現状に比べて排出量が 41.4% 削減する。
- ✓ 上記の削減率を達成する設備導入を実現させるためには、現状の RE 機器の導入コストを少なくとも 6.5 分の 1 程度にする必要がある。
- 図 24 や図 25 に示したように、検討ケースによっては部分負荷運転の割合が多くなることから、HPWH を含む DES のモデルにおいて、HPWH のダイナミクスの考慮に意義があることを示した。また同図より、HPWH のダイナミクスを考慮した本モデルによって定格運転や部分負荷運転の傾向を区別・可視化することが可能であることを示した。
- 図 20、図 21、図 24、図 25 に関する議論で示したように、COP などの HPWH のダイナミクスを模擬することにより、HPU と GWH の連携運転を模擬でき、その連携運転への各機器の寄与を洞察できることを示した。

さらに、JOP-TSCPOS-DES は既製品購入における設備容量の過剰投資の有無や GX に向けた RE 設備の導入ポテンシャルの把握にも利用可能である。このことは、JOP-TSCPOS-DES が、DES 住民による設備導入検討のみならず、機器メーカーによる市場浸透のための製品価格の検討や、官公庁による GX 促進のための補助金の検討などに応用できる可能性を示している。

今後の課題として、パラメータ誤差と予測誤差の影響の調査^{37), 46), 65)}や、SPM-TSCPOS-DES と JOP-TSCPOS-DES の妥当性検証 (モデル化誤差の調査)、さらには図 1 で示したアーキテクチャにおける未設計領域である制御系の開発^{29), 33), 38), 40), 51), 57)}などが挙げられる。また、他の最適化手法と組み合わせた年間を通した (季節性を考慮した) 最適化モデル^{43), 67)}への拡張や、出力制御指令の考慮、HWT の温度分布等を考慮⁵²⁾した HPWH のダイナミクスの更なる詳細化、さらには HWT から HWL への予測温水出水速度 $\hat{v}_{\text{HWT},k}^{\text{out}}$ 、上水道から HWT への予測冷水入水速度 $\hat{v}_{\text{HWT},t}^{\text{in}}$ 、HWT の容積 $V_{\text{HWT}}^{\text{cap}}$ の最適化 (可変スケジュール化) を含むより包括的な意味での全体最適化手法への発展などが考えられる。最終的には、業務他部門と家庭部門のみならず、産業部門における温熱冷熱同時供給が可能かつ様々な温度範囲を扱う産業用 HP 機器等¹⁶⁵⁾を扱える一般化モデルへとその適応範囲を拡大していくことを目指している。

謝辞

本研究は、JST 共創の場形成支援プログラム JPMJPF2012 ならびに文部科学省卓越大学院プログラム「パワー・エネルギー・プロフェッショナル育成プログラム」による支援を受けたものである。また、本研究を遂行するにあたり、北陸電力株式会社新価値創造研究所元職員の金尾則一氏および同研究所現職員の羽入田勝也氏、足立隆之氏ならびに一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センターの田中覚氏からは貴重なご意見をいただいた。この場を借りてお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 内閣官房内閣広報室；第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説，(2020.10). https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html (アクセス日 2025.1.28)
- 2) 経済産業省；GX 実現に向けた基本方針，(2023.2)，pp. 1-27. https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002_1.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 3) 経済産業省 資源エネルギー庁；令和 5 年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2024)，(2024.6)，pp.1-287. https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/pdf/whitepaper2024_all.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 4) 経済産業省 資源エネルギー庁；令和 4 年度(2022 年度)エネルギー需給実績(確報)，(2024.4)，pp.1-47. http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/honbun2022fykaku.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 5) 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット；エネルギー・経済統計要覧 2023 年度版，(2023.4)，pp.1-358. https://eneken.ieej.or.jp/report_detail.php?article_info_id=11055 (アクセス日 2025.1.28)
- 6) ヒートポンプ・蓄熱センター；ヒートポンプ・蓄熱システム データブック 2023. <https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/material/handbook/DataBool2023/2023DataBook.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 7) International Energy Agency; World Energy Outlook 2024, (2024.10), pp.1-398. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> (アクセス日 2025.1.28)
- 8) ヒートポンプ・蓄熱センター；家庭用自然冷媒ヒートポンプ給湯機”エコキュート”の累計出荷台数 900 万台突破について，(2023.9). <https://www.hptcj.or.jp/index/newsrelease/tabid/2154/Default.aspx> (アクセス日 2025.1.28)
- 9) European Commission; REPowerEU: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy, (2022.3). https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1511 (アクセス日 2025.1.28)
- 10) International Energy Agency; The Future of Heat Pumps, (2022.11). <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps> (アクセス日 2025.1.28)
- 11) 旭貴弘；欧州ヒートポンプ市場の急成長と日本への示唆，国際環境経済研究所，(2023.9). https://ieei.or.jp/2023/09/asahi_20230907/ (アクセス日 2025.1.28)
- 12) 経済産業省 資源エネルギー庁；第 6 次エネルギー基本計画，(2021.10)，pp.1-128. https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 13) HPT TCP; Ongoing Annexes. <https://heatpumpingtechnologies.org/ongoing-annexes/> (アクセス日 2025.1.28)
- 14) HPT TCP; Project 66 Optimal Heat Pump Design and Operation: An International Collection of Common Techniques to Accelerate Broader Acceptance. <https://heatpumpingtechnologies.org/project66/> (アクセス日 2025.1.28)
- 15) HPT TCP; Annex 65 Heat Pumps in a Circular Economy. <https://heatpumpingtechnologies.org/annex65/> (アクセス日 2025.1.28)
- 16) 重信颯人，畑幸治，與那篤史，千住智信；快適度を考慮した独立型スマートハウスの多目的最適化，平成 29 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会(第 70 回連合大会)講演論文集，(2017.9)，pp.289-290. https://doi.org/10.11527/jceec.2017.0_289 (アクセス日 2025.1.28)
- 17) Kousuke Uchida, Tomonobu Senjyu, Naomitsu Urasaki, and Atsushi Yona; Installation effect by solar heater system using solar radiation forecasting, Proceedings of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific 2009, (2009.10), pp.1-4. <https://doi.org/10.1109/td-asia.2009.5356904> (アクセス日 2025.1.28)
- 18) Kenichi Tanaka, Kosuke Uchida, Kazuki Ogimi, Tomonori Goya, Atsushi Yona, Tomonobu Senjyu, Toshihisa Funabashi, and Chul-Hwan Kim; Optimal Operation by Controllable Loads Based on Smart Grid Topology Considering Insolation Forecasted Error, IEEE Transactions on Smart Grid, 2-3 (2011.9), pp.438-444. <https://doi.org/10.1109/tsg.2011.2158563> (アクセス日 2025.1.28)
- 19) Kenichi Tanaka, Akihiro Yoza, Kazuki Ogimi, Atsushi Yona, Tomonobu Senjyu, Toshihisa Funabashi, and Chul-Hwan Kim; Optimal operation of DC smart house system by controllable loads based on smart grid topology, Renewable Energy, 39-1 (2012.3), pp.132-139. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.026> (アクセス日 2025.1.28)

- 8)
- 20) Atsushi Yona, Tomonobu Senjyu, Toshihisa Funabashi, Paras Mandal, and Chul-Hwan Kim; Optimizing Re-planning Operation for Smart House Applying Solar Radiation Forecasting, *Applied Sciences*, 4-3 (2014.8), pp.366-379. <https://doi.org/10.3390/app4030366> (アクセス日 2025.1.28)
- 21) Akihiro Yoza, Atsushi Yona, Tomonobu Senjyu, and Toshihisa Funabashi; Optimal capacity and expansion planning methodology of PV and battery in smart house, *Renewable Energy*, 69 (2014.9), pp.25-33. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.030> (アクセス日 2025.1.28)
- 22) Yasuaki Miyazato, Hayato Tahara, Kosuke Uchida, Cirio Celestino Muarapaz, Abdul Motin Howlader, and Tomonobu Senjyu; Multi-Objective Optimization for Smart House Applied Real Time Pricing Systems, *Sustainability*, 8-12 (2016.12), 1273. <https://doi.org/10.3390/su8121273> (アクセス日 2025.1.28)
- 23) Yasuaki Miyazato, Shota Tobaru, Kosuke Uchida, Cirio Celestino Muarapaz, Abdul Motin Howlader, and Tomonobu Senjyu; Multi-Objective Optimization for Equipment Capacity in Off-Grid Smart House, *Sustainability*, 9-1 (2017.1), 117. <https://doi.org/10.3390/su9010117> (アクセス日 2025.1.28)
- 24) Akihiro Yoza, Kosuke Uchida, Shantanu Chakraborty, Narayanan Krishna, Mitsunaga Kinjo, Tomonobu Senjyu, and Zengfeng Yan; Optimal Scheduling Method of Controllable Loads in Smart Home Considering Re-Forecast and Re-Plan for Uncertainties, *Applied Sciences*, 9-19 (2019.9), 4064. <https://doi.org/10.3390/app9194064> (アクセス日 2025.1.28)
- 25) 井村順一, 東俊一, 増淵泉; ハイブリッドシステムの制御, (2014.1), p.1, コロナ社. <https://www.coronasha.co.jp/np/data/tachiyomi/978-4-339-03320-5.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 26) NTT データ数理システム; Big M, Nuorium Optimizer 定式化技法集. <https://www.msi.co.jp/solution/nuopt/docs/techniques/articles/big-m.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 27) NTT データ数理システム; インジケータ変数, Nuorium Optimizer 定式化技法集. <https://www.msi.co.jp/solution/nuopt/docs/techniques/articles/indicator-variables.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 28) 小松秀徳, 所健一, 篠原靖志; 遺伝的アルゴリズムを用いたヒートポンプ式給湯機の効率的な運転ルールの探索, *電気学会論文誌 C*, 130-2 (2010.2), pp.194-200. <https://doi.org/10.1541/ieejciss.130.194> (アクセス日 2025.1.28)
- 29) 入江寛, 横山明彦, 多田泰之; 大容量風力発電導入時における需要家ヒートポンプ給湯器と蓄電池の協調による系統周波数制御, *電気学会論文誌 B*, 130-3 (2010.3), pp.338-346. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.130.338> (アクセス日 2025.1.28)
- 30) Yuji Hanai, Kazuaki Yoshimura, Junya Matsuki, and Yasuhiro Hayashi; A Basic Study of a Coordinated Control Method for Heat Pump Water Heaters and Electric Vehicle Battery Chargers in Residence with PV Systems, *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 1-1 (2011), pp.97-103. <https://doi.org/10.5370/JICEE.2011.1.1.097> (アクセス日 2025.1.28)
- 31) 八太啓行, 小林広武; ヒートポンプ式給湯機による太陽光発電余剰電力の有効活用方式 —需要地系統大の翌日運用計画法と効果—, *電気学会論文誌 B*, 132-4 (2012.4), pp.317-324. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.132.317> (アクセス日 2025.1.28)
- 32) Qi Zhang, Tetsuo Tezuka, Keiichi N. Ishihara, Benjamin C. McLellan; Integration of PV power into future low-carbon smart electricity systems with EV and HP in Kansai Area, Japan, *Renewable Energy*, 44 (2012.8), pp.99-108. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.003> (アクセス日 2025.1.28)
- 33) Taisuke Masuta and Akihiko Yokoyama; Supplementary Load Frequency Control by Use of a Number of Both Electric Vehicles and Heat Pump Water Heaters, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3-3 (2012.9), pp.1253-1262. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2194746> (アクセス日 2025.1.28)
- 34) 大嶺英太郎, 八太啓行, 浅利真宏, 上野 剛, 小林広武; ヒートポンプ式給湯機と電力貯蔵装置を用いた太陽光発電余剰電力利用のための需要地系統運用手法, *電気学会論文誌 B*, 133-7 (2013.7), pp.631-641. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.133.631> (アクセス日 2025.1.28)
- 35) 加藤丈佳, 鈴置保雄; 大気外日射強度の日変化に連動したヒートポンプ給湯機群昼間運転の自律分散計画手法に関する一検討, *電気学会論文誌 C*, 134-2 (2014.2), pp.320-327. <https://doi.org/10.1541/ieejciss.134.320> (アクセス日 2025.1.28)
- 36) 宮本裕介, 林泰弘; 長期間運用を想定したヒートポンプ給湯器による太陽光発電システムの電圧上昇抑制効果, *電気学会論文誌 B*, 135-7 (2015.7), pp.423-436. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.135.423> (アクセス日 2025.1.28)
- 37) 池上貴志, 矢野達也; 太陽熱利用ヒートポンプ給湯機

- の運用における太陽熱取得量および給湯需要量予測誤差の影響, 太陽エネルギー, 42-3 (2016), pp.53-62. <https://www.jses-solar.jp/wp-content/uploads/233.3.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 38) 奥谷和也, 馬場旬平, 太田豊; 家庭用ヒートポンプ給湯機の可制御負荷利用時における需要側・系統側影響の検討, 電気学会論文誌 B, 136-1 (2016.1), pp.72-78. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.136.72> (アクセス日 2025.1.28)
- 39) 片山慎也, 永井俊行, 吉田彬, 天野嘉春; 2030年を目指した標準住戸の需要規模がCO₂排出量最少となる住設機器構成に与える影響の分析, エネルギー・資源学会論文誌, 39-6 (2018.11), pp.19-28. https://doi.org/10.24778/jjser.39.6_19 (アクセス日 2025.1.28)
- 40) 堀立磨, 馬場旬平, 榊原久介; 需要家利便性を考慮した家庭用ヒートポンプ給湯機の多数台可制御負荷運用手法, 電気学会論文誌 B, 139-2 (2019.2), pp.47-55. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.139.47> (アクセス日 2025.1.28)
- 41) 山本博巳; わが国のエネルギーチェーンを考慮したモデルによる電化ならびに電気機器の需要能動化の効果の試算, エネルギー・資源学会論文誌, 40-6 (2019.11), pp.220-231. https://doi.org/10.24778/jjser.40.6_220 (アクセス日 2025.1.28)
- 42) 山口大, 藤井健斗, 周佳奕, 曾育民, 長野克則; ヒートポンプを核としたスマートコミュニティに関する研究 (その9)モデル予測型 HEMS の適切な制御時間間隔に関する検討, 空気調和・衛生工学会北海道支部第54回学術講演会論文集, (2020), pp.43-46. <http://shase-hk.d.org/wp/wp-content/uploads/2020/04/BP-3.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 43) Tetsuya Wakui, Kazuki Akai, and Ryohei Yokoyama; Shrinking and receding horizon approaches for long-term operational planning of energy storage and supply systems, Energy, 239 (2022.1), 122066. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122066> (アクセス日 2025.1.28)
- 44) 東谷拓弥, 池上貴志, 秋澤淳; 電気自動車および双方向給電が住宅エネルギーシステムの経済的最適技術構成に与える影響, エネルギー・資源学会論文誌, 43-4 (2022.7), pp.140-150. https://doi.org/10.24778/jjser.43.4_140 (アクセス日 2025.1.28)
- 45) 古屋裕至, 池上貴志, 秋澤淳; ライフライン途絶時のエネルギー供給維持を考慮したコージェネレーションシステムの最適構成, エネルギー・資源学会論文誌, 44-6 (2023.11), pp.284-293. https://doi.org/10.24778/jjser.44.6_284 (アクセス日 2025.1.28)
- 46) 浅利真宏, 所健一, 小林広武, 伊藤正幸; 需要家機器との連携制御を用いた太陽光発電逆潮流抑制方式 — 予測の不確実性を考慮したヒートポンプ式給湯機の運用計画法 —, 電力中央研究所報告, (2009.8), pp.1-14. <https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=R08025> (アクセス日 2025.1.28)
- 47) Yuji Hanai, Kazuaki Yoshimura, Junya Matsuki, and Yasuhiro Hayashi; Load Management Using Heat-Pump Water Heater and Electric Vehicle Battery Charger in Distribution System with PV, Journal of International Council on Electrical Engineering, 1-2 (2011), pp.207-213. <https://doi.org/10.5370/JICEE.2011.1.2.207> (アクセス日 2025.1.28)
- 48) 池上貴志, 片岡和人, 岩船由美子, 荻本和彦; 太陽熱集熱器とヒートポンプ給湯機併用住宅におけるエネルギー需給に関する解析, 土木学会論文集 G, 67-6 (2011), pp.II_351-II_362. https://doi.org/10.2208/jscejg.67.II_351 (アクセス日 2025.1.28)
- 49) 小田拓也, 秋澤淳, 柏木孝夫; コージェネレーションの都市規模別導入ポテンシャル — 系統電源と民生部門のエネルギーシステム最適化 —, エネルギー・資源学会論文誌, 34-2 (2013.3), pp.1-8. https://doi.org/10.24778/jjser.34.2_1 (アクセス日 2025.1.28)
- 50) 益田泰輔, 井上孝弘, 横山明彦; 負荷周波数制御と経済負荷配分制御のための多数台のヒートポンプ給湯機の運転計画作成手法, 電気学会論文誌 B, 133-4 (2013.4), pp.302-312. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.133.302> (アクセス日 2025.1.28)
- 51) 富田泰志, 小林朗, 鶴貝満男; 太陽光発電の余剰電力吸収のためのヒートポンプ給湯機群制御方式の開発, 電気学会論文誌 C, 133-8 (2013.8), pp.1607-1615. <https://doi.org/10.1541/ieejc.133.1607> (アクセス日 2025.1.28)
- 52) 所健一, 若松裕紀, 橋本克巳, 菅谷義昭, 小田修司; ハイブリッド給湯システムの機器構成と運転ルールの最適化, 電気学会論文誌 C, 134-9 (2014.2), pp.1365-1372. <https://doi.org/10.1541/ieejc.134.1365> (アクセス日 2025.1.28)
- 53) 宮本裕介, 林泰弘; 家庭用蓄電池とヒートポンプ給湯器による多数台太陽光発電システムの電気料金改善効果, 電気学会論文誌 B, 136-3 (2016.3), pp.245-258. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.136.245> (アクセス日 2025.1.28)
- 54) 縄田郁海, 佐々木勇介, 川島明彦, 稲垣伸吉, 鈴木達也; モデル予測型 HEMS における車載蓄電池とヒートポンプ式給湯器の協調運用, システム制御情報学会論

- 文誌, 30-4 (2017.4), pp.143-152. <https://doi.org/10.5687/iscie.30.143> (アクセス日 2025.1.28)
- 55) Yumiko Iwafune, Junichiro Kanamori, and Hisayoshi Sakakibara; A comparison of the effects of energy management using heat pump water heaters and batteries in photovoltaic -installed houses, *Energy Conversion and Management*, 148 (2017.9), pp.146-160. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.060> (アクセス日 2025.1.28)
- 56) 高橋雅仁, 松橋隆治; 再生可能電源出力の不確実性を考慮した需給運用計画モデルを用いた蓄電池と可制御ヒートポンプ給湯機による発電コスト低減効果分析, *電気学会論文誌 B*, 137-12 (2017.12), pp.756-765. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.137.756> (アクセス日 2025.1.28)
- 57) 近藤健一, 田中大幹, 竹内悠, 馬場旬平, 横山明彦, 今田博己, 青柳福雄; 温浴施設に設置されたヒートポンプ給湯機を用いたデマンドレスポンスの実証検討, *電気学会論文誌 B*, 139-6 (2019.6), pp.435-445. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.139.435> (アクセス日 2025.1.28)
- 58) Tetsuya Wakui, Kento Sawada, Ryohei Yokoyama, and Hirohisa Aki; Predictive management for energy supply networks using photovoltaics, heat pumps, and battery by two-stage stochastic programming and rule-based control, *Energy*, 179 (2019.7), pp.1302-1319. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.148> (アクセス日 2025.1.28)
- 59) 片山慎也, 吉田彬, 天野嘉春; 2030 年に向けた電力融通可能な集合住宅における最適機器構成の分析, *エネルギー・資源学会論文誌*, 41-1 (2020.1), pp.11-20. https://doi.org/10.24778/jjser.41.1_11 (アクセス日 2025.1.28)
- 60) 大森洋幸, 根岸信太郎, 池上貴志; 家庭用ヒートポンプ給湯機による電力需給調整力の提供効果の評価, *電気学会論文誌 B*, 140-4 (2020.4), pp.313-322. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.140.313> (アクセス日 2025.1.28)
- 61) Shota Kimata, Takayuki Shiina, Tetsuya Sato, Ken-ichi Tokoro; Operation planning for heat pump in a residential building, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 14-5 (2020), JAMDSM0076. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2020jamdsm0076> (アクセス日 2025.1.28)
- 62) 長野克則, 葛隆生, 阪田義隆; ヒートポンプを核としたスマートコミュニティに関する研究 (その 13)モデル予測型 EMS を有する建物群で構成されるコミュニティの環境負荷削減効果, *令和 3 年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, 9 (2021), pp.57-60. https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2021.9.0_57 (アクセス日 2025.1.28)
- 63) 石川歩惟, 所健一; PV 余剰電力活用のための複数台の家庭用ヒートポンプ式給湯機の連携運転計画法の提案と評価, *電力中央研究所報告*, (2022.4), pp.1-17. <http://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=GD21003> (アクセス日 2025.1.28)
- 64) 笠原亮太, 飯野穰, 林泰弘, 金子雄; 需要家利益と系統貢献価値の同時実現を目指した住宅需要家群向け DER 最適配置計画, *電気学会論文誌 B*, 142-9 (2022.9), pp.404-414. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.142.404> (アクセス日 2025.1.28)
- 65) 齋藤正明, 加藤政一; 蓄熱空調設備を有するビル施設の需要再予測・機器運用再計画による運用手法の評価, *電気学会論文誌 C*, 142-10 (2022.10), pp.1123-1134. <https://doi.org/10.1541/ieejjeiss.142.1123> (アクセス日 2025.1.28)
- 66) 喜田勇志, 原亮一, 北裕幸; 電力系統安定化に貢献するマイクログリッド構築 - 需給調整力確保に伴う追加コスト -, *電気学会論文誌 B*, 143-2 (2023.2), pp.157-164. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.143.157> (アクセス日 2025.1.28)
- 67) 棚橋優, 小林浩, 中村勇太, 青木睦; パターン化された年間運用計画にもとづくマイクログリッドシステムの設備容量の最適化, *エネルギー・資源学会論文誌*, 44-6 (2023.11), pp.255-264. https://doi.org/10.24778/jjser.44_255 (アクセス日 2025.1.28)
- 68) Shinya Yamamoto, Masahiro Furukakoi, Akie Uehara, Alexey Mikhaylov, Paras Mandal, and Tomonobu Senjyu; MPC-based robust optimization of smart apartment building considering uncertainty for conservative reduction, *Energy and Buildings*, 318 (2024.9), 114461. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114461> (アクセス日 2025.1.28)
- 69) Takuya Higashitani, Takashi Ikegami, and Atsushi Akisawa; Optimization of residential energy system configurations considering the bidirectional power supply of electric vehicles and electricity interchange between two residences, *Energy*, 303 (2024.9), 131891. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131891> (アクセス日 2025.1.28)
- 70) ヒートポンプ・蓄熱センター; ヒートポンプ・蓄熱システムの有効性(省エネ性・環境性), (2012.2). <https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/20120229NewFolder/快適に節電/8.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 71) 経済産業省; 資料 3 ヒートポンプ給湯機の DRready 要件(案)(事務局資料), 第 3 回 DRready 勉強会, (2024.9), pp.1-35. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_en

- vironment/dr_ready/pdf/003_03_00.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 72) Binghui Han, Younes Zahraoui, Marizan Mubin, Saad Mekhilef, Mehdi Seyedmahmoudian, and Alex Stojcević, Home Energy Management Systems: A Review of the Concept, Architecture, and Scheduling Strategies, *IEEE Access*, 11 (2023.2), pp.19999-20025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3248502> (アクセス日 2025.1.28)
- 73) Panasonic ; 太陽光発電・蓄電システム : [住宅用]V2H 蓄電システム eneplat. https://sumai.panasonic.jp/v2h_chikuden/eneplat/ (アクセス日 2025.1.28)
- 74) Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and Thirunavukarasu Meyarivan; A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6-2 (2002.4), pp.182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017> (アクセス日 2025.1.28)
- 75) Michael D. Teter, Alexandra M. Newman, and Martin Weiss; Consistent notation for presenting complex optimization models in technical writing, *Sustainability*, 21-1 (2016.6), pp.1-17. <https://doi.org/10.1016/j.sorms.2016.05.001> (アクセス日 2025.1.28)
- 76) JPEA ; 太陽光発電の基礎知識 用語集, JPEA web サイト. <https://www.jpea.gr.jp/knowledge/glossary/> (アクセス日 2025.1.28)
- 77) 赤阪大介 ; 非線形モデル予測制御(NMPC)活用拡大に向けた取り組み, MATLAB EXPO 2018. <https://www.matlabexpo.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/images/events/matlabexpo/jp/2018/g4-nmpc-mw.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 78) M. Fuentes, G. Nofuentes, J. Aguilera, D. L. Talavera, and M. Castro; Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates, *Solar Energy*, 81-11 (2007.11), pp.1396-1408. <https://doi.org/10.1016/j.soler.2006.12.008> (アクセス日 2025.1.28)
- 79) C. R. Osterwald; Translation of device performance measurements to reference conditions, *Solar Cells*, 18-3-4 (1986.9-10), pp.269-279. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(86\)90126-2](https://doi.org/10.1016/0379-6787(86)90126-2) (アクセス日 2025.1.28)
- 80) NTT データ数理システム ; 頻出する式構造, Nuorium Optimizer 定式化技法集. <https://www.msi.co.jp/solution/nuopt/docs/techniques/articles/frequent-expression-structure.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 81) R. Z. Wang, M. Li, Y. X. Xu, and J. Y. Wu; An energy efficient hybrid system of solar powered water heater and adsorption ice maker, 68-2 (2000.2), pp.189-195. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00062-6) (アクセス日 2025.1.28)
- 82) ソーラーシステム振興協会 ; 業務用太陽熱利用システムの設計・施工ガイドライン, (2013.4), pp.1-142. <https://ssda.or.jp/wp-content/uploads/2024/07/publication05.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 83) John A. Duffie and William A. Beckman; *Solar Engineering of Thermal Processes*, (2013.4), pp.266-267, John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118671603> (アクセス日 2025.1.28)
- 84) 北陸電力 ; 従量電灯, 北陸電力 web サイト. <https://www.rikuden.co.jp/ryokin/minsei.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 85) 北陸電力 ; かんたん固定単価プラン, 北陸電力 web サイト. <https://www.rikuden.co.jp/koteikaitori/kaitorimenu.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 86) 福井都市ガス ; 一般料金, 福井都市ガス web サイト. <https://www.fukui-citygas.co.jp/price/> (アクセス日 2025.1.28)
- 87) 福井市 ; 水道料金表, 福井市 web サイト. <https://www.city.fukui.lg.jp/kurasi/suido/suidoap/020380.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 88) 福井市 ; 下水道使用料表(令和元年 10 月 1 日適用), 福井市 web サイト. https://www.city.fukui.lg.jp/kurasi/gesui/siyouryo/price_list.html (アクセス日 2025.1.28)
- 89) NTT データ数理システム ; small ϵ , Nuorium Optimizer 定式化技法集. <https://www.msi.co.jp/solution/nuopt/docs/techniques/articles/small-epsilon.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 90) NTT データ数理システム ; 自由変数の非負変数への分解, Nuorium Optimizer 定式化技法集. <https://www.msi.co.jp/solution/nuopt/docs/techniques/articles/decomposited-free-variable-to-non-negative-variable.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 91) NTT データ数理システム ; 最大値最小化問題, Nuorium Optimizer 定式化技法集. <https://www.msi.co.jp/solution/nuopt/docs/techniques/articles/minimizing-the-maximum-value.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 92) NTT データ数理システム ; 絶対値最小化問題, Nuorium Optimizer 定式化技法集. <https://www.msi.co.jp/solution/nuopt/docs/techniques/articles/optimization-with-absolute-values.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 93) NTT データ数理システム ; 折線関数の線形表現, Nuorium Optimizer 定式化技法集. <https://www.msi.co.jp/solution/nuopt/docs/techniques/articles/polyline.html> (アクセス日 2025.1.28)

- 94) Panasonic ; 品番 : VBM240FJ01N 標準仕様書, (2023.9). https://www2.panasonic.biz/scdw/a2A/Viewer?HINB=VBM240FJ01N&MEI_SYUBETU=標準仕様書&MEI_CTS_SYUBETU=shiyosyo&MEI_SIRYO=標準仕様書&URL_SITEI=%2Fideacontout%2F2023%2F10%2F03%2F2023100300220069.PDF&EDIT_FLG=0&INTER_OPEN_FLG=0 (アクセス日 2025.1.28)
- 95) Panasonic ; 品番 : LJRE32C 商品仕様書, (2024.10). https://www2.panasonic.biz/scdw/a2A/Viewer?HINB=LJRE32C&MEI_SYUBETU=商品仕様書&MEI_CTS_SYUBETU=shiyosyo&MEI_SIRYO=パワーステーション6.0kW・耐塩&URL_SITEI=%2Fideacontout%2F2024%2F10%2F24%2F2024102400200002.PDF&EDIT_FLG=0&INTER_OPEN_FLG=0 (アクセス日 2025.1.28)
- 96) スカイジャパンシステム ; 蓄電池専門用語集ー自己放電, 蓄電池バンク. https://batterybank.jp/glossary/sa/s_discharge.php (アクセス日 2025.1.28)
- 97) Rinnai ; ガス給湯器 一次エネルギー消費量計算プログラム(非住宅版)計算使用数値一覧, (2024.1). https://rinnai.jp/business_user/pdf/rux_building.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 98) 福井都市ガス ; 一般ガス供給約款, (2020.4). <https://www.fukui-citygas.co.jp/price/pdf/general.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 99) Panasonic ; 家庭用ヒートポンプ給湯器 取扱説明書. <https://www2.panasonic.biz/ideacontout/2023/06/27/2023062700220008.PDF> (アクセス日 2025.1.28)
- 100) ソーラーシステム振興協会 ; 製品情報 株式会社ノーリツ, ソーラーシステム振興協会 web サイト. <https://sda.or.jp/service/product08/> (アクセス日 2025.1.28)
- 101) Volkswagen ; e-Golf カタログ, (2019.10). https://www.volkswagen.co.jp/idhub/content/dam/onehub_pkw/importers/jp/pc/catalog/pdf/e-Golf_catalog.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 102) MAZDA ; MAZDA3 FASTBACK 主要諸元, (2024.7). https://www.mazda.co.jp/globalassets/assets/cars/mazda3/common/pdf/mazda3_specification_202407.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 103) サンホープ・アクア ; パイプの口径と流量について, サンホープ・アクア web サイト. <https://sunhope-aqua.com/post-2563> (アクセス日 2025.1.28)
- 104) 北陸電力 ; 燃料費調整単価および燃料費等調整単価推移, 北陸電力 web サイト. <https://www.rikuden.co.jp/nencho/tanka.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 105) 北陸電力 ; 2024 年度再生可能エネルギー発電促進賦課金単価の決定, (2024.3). <https://www.rikuden.co.jp/press/attach/24031904.pdf?1710827959> (アクセス日 2025.1.28)
- 106) 北陸電力 ; 当社の事業者別 CO₂ 排出係数[調整後排出係数](2023 年度実績), 北陸電力 web サイト. <https://www.rikuden.co.jp/ryokinshikumi/dengen.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 107) 福井都市ガス ; 2024 年 12 月 ガス料金の原料費調整について, (2024.11). <https://www.fukui-citygas.co.jp/contents/wp-content/uploads/2024/10/2024年12月一般.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 108) 石油連盟 石油システム推進室 ; エネルギー別 単価比較・二酸化炭素排出係数比較 福井(2024 年 11 月), (2024.12). <https://ecofeel.jp/assets/pdf/24.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 109) 日本レストルーム工業会 ; 水の CO₂ 換算係数について, トイレナビ. <https://www.sanitary-net.com/trend/standard/standard-co2.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 110) 経済産業省 資源エネルギー庁 ; 給油所小売価格調査(ガソリン, 軽油, 灯油), 経済産業省 資源エネルギー庁 web サイト. https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/results.html (アクセス日 2025.1.28)
- 111) 旭化成, 宇部興産, 住友化学, 三井化学, 三菱ケミカルリサーチ ; 「次世代自動車材料」に関する cLCA 評価, 日本化学工業会 web サイト, (2017.7). https://www.nikkakyo.org/upload_files/global_warming/clca/jirei/4thEdition/CaseStudy11_NextGenerationAutomotiveMaterial.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 112) Panasonic ; 長期保証について, Panasonic web サイト. https://sumai.panasonic.jp/solar_battery/reasons/reliability.html (アクセス日 2025.1.28)
- 113) NISSAN ; EV の保証について, NISSAN web サイト. <https://www.nissan.co.jp/EV/MAINTENANCE/> (アクセス日 2025.1.28)
- 114) Rinnai ; ガス給湯器の点検・取替え目安は 10 年です, Rinnai web サイト. <https://www.rinnai.co.jp/safety/use/term10/> (アクセス日 2025.1.28)
- 115) エコ突撃隊 ; エコキュートの耐用年数, 寿命は何年?, エコ突撃隊 web サイト. <https://totsugekitai.com/media/エコキュートの耐用年数、寿命は何年> (アクセス日 2025.1.28)
- 116) 松江市 ; 令和 6 年度太陽熱利用設備(ソーラーシステム)について, 松江市 web サイト. https://www.city.matsue.lg.jp/soshikikarasagasu/kankyoenergybu_kankyoenergyka/gomi_kankyo_pet/1/8/994.html (アクセス日 2025.1.28)
- 117) 自動車検査登録情報協会 ; 車種別の平均使用年数推移

- 表 令和 6 年. <https://www.airia.or.jp/publish/file/v19mrm00000019lz.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 118)Panasonic ; 住宅用太陽光発電システム・V2H 蓄電システム Web カタログ. <https://sumai.panasonic.jp/catalog/solarsystem.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 119)Panasonic ; 品番 : LJDB302C 商品仕様書, (2024.6). https://www2.panasonic.biz/scdw/a2A/Viewer?HINB=LJDB302C&MEI_SYUBETU=商品仕様書&MEI_CTS_SYUBETU=shiyosyo&MEI_SIRYO=6.7kWh屋内蓄電池用コンバータ・耐塩&URL_SITEI=%2Fideacontout%2F2024%2F06%2F05%2F2024060500200009.PDF&EDIT_FLG=0&INTER_OPEN_FLG=0 (アクセス日 2025.1.28)
- 120)Panasonic ; 品番 : LJV2671C 商品仕様書, (2024.6). [https://www2.panasonic.biz/scdw/a2A/Viewer?HINB=LJV2671C&MEI_SYUBETU=商品仕様書&MEI_CTS_SYUBETU=shiyosyo&MEI_SIRYO=V2Hスタンド6.0kW\(耐塩\)&URL_SITEI=%2Fideacontout%2F2024%2F06%2F29%2F2024062900200051.PDF&EDIT_FLG=0&INTER_OPEN_FLG=0](https://www2.panasonic.biz/scdw/a2A/Viewer?HINB=LJV2671C&MEI_SYUBETU=商品仕様書&MEI_CTS_SYUBETU=shiyosyo&MEI_SIRYO=V2Hスタンド6.0kW(耐塩)&URL_SITEI=%2Fideacontout%2F2024%2F06%2F29%2F2024062900200051.PDF&EDIT_FLG=0&INTER_OPEN_FLG=0) (アクセス日 2025.1.28)
- 121)Panasonic ; 品番 : LJB1367C 商品仕様書, (2024.3). https://www2.panasonic.biz/scdw/a2A/Viewer?HINB=LJB1367C&MEI_SYUBETU=商品仕様書&MEI_CTS_SYUBETU=shiyosyo&MEI_SIRYO=商品仕様書&URL_SITEI=%2Fideacontout%2F2024%2F04%2F12%2F2024041200200091.PDF&EDIT_FLG=0&INTER_OPEN_FLG=0 (アクセス日 2025.1.28)
- 122)Panasonic ; 品番 : LJTS1A01 標準仕様書, (2024.5). https://www2.panasonic.biz/scdw/a2A/Viewer?HINB=LJTS1A01&MEI_SYUBETU=標準仕様書&MEI_CTS_SYUBETU=shiyosyo&MEI_SIRYO=電力切替ユニット100Aタイプ单相3線用&URL_SITEI=%2Fideacontout%2F2024%2F05%2F21%2F2024052100200047.PDF&EDIT_FLG=0&INTER_OPEN_FLG=0 (アクセス日 2025.1.28)
- 123)Panasonic ; 品番 : BHM85222C2 商品情報, (2018.3). https://www2.panasonic.biz/scvb/a2A/opnItemDetail?contents_view_flg=1&itmcmp_link_flg=0&use_obligation=&catalog_view_flg=1&simple_search_flg=&item_cd=BHM85222C2&item_no=BHM85222C2&vcata_flg=1&b_cd=301&hinban_kbn=1&s_hinban_key=BHM85222C2&itmcmp_added_flg=0&close_flg=1 (アクセス日 2025.1.28)
- 124)価格.com ; e-ゴルフ, 価格.com web サイト. <https://kakaku.com/item/K0001006116/> (アクセス日 2025.1.28)
- 125)Rinnai ; 給湯専用機 (RUX シリーズ), Rinnai web サイト. <https://rinnai.jp/products/waterheater/gas/rux/e-series/> (アクセス日 2025.1.28)
- 126)価格.com ; エコキュート S シリーズ フルオート 370L HE-S37LQS [アイボリー], 価格.com web サイト. <https://kakaku.com/item/K0001557795/> (アクセス日 2025.1.28)
- 127)NORITZ ; 太陽熱利用給湯システム UF シリーズ, NORITZ web サイト. https://www.noritz.co.jp/product/kyutou_bath/taiyo/uf_series.html (アクセス日 2025.1.28)
- 128)MAZDA ; MAZDA3 FASTBACK, MAZDA web サイト. <https://www.mazda.co.jp/cars/mazda3/> (アクセス日 2025.1.28)
- 129)地球環境委員会 ; 電気設備の LCCO₂, LCC 削減のケーススタディ, 電気設備学会誌, 35-4 (2015.4), pp.267-274. <https://doi.org/10.14936/ieiej.35.267> (アクセス日 2025.1.28)
- 130)地球環境委員会 ; 電気設備の環境負荷低減手法 太陽光発電システム, 電気設備学会 web サイト, (2018.4). https://www.ieiej.or.jp/activity/environment/pdf/2015_reconsideration05.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 131)Ryuji Kawamoto, Hideo Mochizuki, Yoshihisa Moriguchi, Takahiro Nakano, Masayuki Motohashi, Yuji Sakai, and Atsushi Inaba; Estimation of CO₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA, Sustainability, 11-9 (2019.5), 2690. <https://doi.org/10.3390/su11092690> (アクセス日 2025.1.28)
- 132)桶真一郎, 見目喜重, 滝川浩史, 榊原建樹 ; 太陽光・熱／コージェネシステムの CO₂ 排出量に与えるシステム運転法の影響, 電気学会論文誌 B, 125-10 (2005), pp.930-938. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.125.930> (アクセス日 2025.1.28)
- 133)日本政策金融公庫 ; 中小企業事業(主要利率一覧表), 日本政策金融公庫 web サイト, (2024.12). <https://www.jfc.go.jp/n/rate/base.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 134)環境省 ; 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル(Ver5.0), 環境省 web サイト, (2024.2). <https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual> (アクセス日 2025.1.28)
- 135)辻毅一郎, 竹田功 ; 用途別民生用エネルギー需要の月変動特性, エネルギー・資源学会論文誌, 18-5 (1997.9), pp.66-72. <https://www.jser.gr.jp/wp-content/uploads/2021/02/18-478.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 136)NEDO ; 年間時刻別日射量データベース(METPV-20), 日射量データベース閲覧システム, (2021.4). https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/metpv_map.html (アクセス日 2025.1.28)
- 137)アイディー・シー ; 家電製品の電気代一覧表, uriba.jp. <https://www.uriba.jp/special/sp-denkidai.htm> (アクセス日 2025.1.28)

- 138) エスコ ; LED 照明の消費電力と電気代は？蛍光灯・白熱電球と徹底比較！, エスコ web サイト. <https://www.esco-co.jp/useful/ledelectricbill/> (アクセス日 2025.1.28)
- 139) MC リテールエナジー ; IH クッキングヒーターの電気代はいくら？ガスコンロとの比較や節約方法を解説, まちエネ, (2024.11). <https://www.machi-ene.jp/column/20241113/2584/> (アクセス日 2025.1.28)
- 140) Panasonic ; ななめドラム洗濯乾燥機 NA-LX129DL 仕様, Panasonic web サイト. <https://panasonic.jp/wash/c-db/products/NA-LX129DL/spec.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 141) 北海道ガス ; ロボット掃除機と一般の掃除機の電気代を比較！ランニングコストも, TagTag. <https://tagtag.hokkaido-gas.co.jp/portal/ecolife/appliance/3970> (アクセス日 2025.1.28)
- 142) 京王百貨店 ; アイロンの電気代は？5 つの節電方法とおすすめアイロンも！, グリーン住宅ポイント web サイト, (2021.8). https://www.keionet.com/info/jyutakupoint/column/iron_electricity_bill/ (アクセス日 2025.1.28)
- 143) 新日本エネックス ; 1 日の電気使用量の平均はどれくらい？効果的な節約方法も紹介, 新日本エネックス web サイト, (2024.8). <https://nj-enex.co.jp/column/1487/> (アクセス日 2025.1.28)
- 144) 佐野史典, 鈴東新, 上野剛, 佐伯修, 辻毅一郎 ; 住宅用用途別エネルギー消費日負荷曲線の推定 — 関西文化学術研究都市における計測調査報告(その 1)—, エネルギー・資源学会論文誌, 24-5 (2003.9), pp.50-56. <https://www.jser.gr.jp/wp-content/uploads/2021/02/24-347.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 145) 長府製作所 ; 電気温水器の選び方, 長府製作所 web サイト. https://www.chofu.co.jp/products/supply/electric_heat02.php (アクセス日 2025.1.28)
- 146) くつろぎホーム ; トイレリフォームすると節水効果で水道代が安くなるって, 本当なの！？, トイレリフォーム大阪.com, (2023.9). <https://トイレリフォーム大阪.com/tt27/oshiete/> トイレリフォームすると節水効果で水道代が安く / (アクセス日 2025.1.28)
- 147) 東京都水道局 ; 水の上手な使い方, 東京都水道局 web サイト. <https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/shiyou/jouzu.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 148) Panasonic ; 食器洗い乾燥機(食洗機) 比較表, Panasonic web サイト. <https://panasonic.jp/dish/comparison.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 149) 北海道産青果物拡販宣伝協議会 ; ご飯をおいしく味わう②水加減する, きたやさい web サイト. <https://www.kitayasai.com/kihon/kihon202011052> (アクセス日 2025.1.28)
- 150) 浄水器の達人 ; 家庭で 1 日に使う水の量は何リットルか知ってますか？, 浄水器の達人 web サイト. <https://etc.jp/blog/archives/4977> (アクセス日 2025.1.28)
- 151) 村川三郎, 坂上恭助, 越川康夫, 小原剛 ; 集合住宅における給水負荷の変動と瞬時最大流量の検討, 空気調和・衛生工学会 論文集, 15-43 (1990.6), pp.1-14. https://doi.org/10.18948/shase.15.43_1 (アクセス日 2025.1.28)
- 152) 国土交通省道路局 ; 資料-2 提言(素案) 2. 高速道路の利用状況, 第 4 回「使える」ハイウェイ推進会議, (2004.12). <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/highway/4pdf/22.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 153) NEDO ; 太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書, 太陽光発電システム搭載自動車検討委員会, (2018.1). <https://www.nedo.go.jp/content/100885777.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 154) 国土交通省気象庁 ; 過去の気象データ・ダウンロード, 国土交通省気象庁 web サイト. <https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/index.php> (アクセス日 2025.1.28)
- 155) 福井市 ; 水質検査結果 令和 5 年度定期年報, 福井市 web サイト. https://www.city.fukui.lg.jp/kurasi/suido/project/kensa_d/fil/R5nenpo.pdf (アクセス日 2025.1.28)
- 156) 自動車検査登録情報協会 ; 1 世帯当たり 1.016 台に — 自家用乗用車(登録車と軽自動車)の世帯当たり普及台数 —, (2024.8). <https://www.airia.or.jp/publish/file/v19mrm0000000nk7-att/kenbetsu2024.pdf> (アクセス日 2025.1.28)
- 157) MathWorks ; MATLAB リリース ノート, MathWorks ヘルプセンター. <https://jp.mathworks.com/help/matlab/release-notes.html?startrelease=R2024b&endrelease=R2024b> (アクセス日 2025.1.28)
- 158) MathWorks ; 問題ベースアプローチまたはソルバーベースアプローチを選択, MathWorks ヘルプセンター. <https://jp.mathworks.com/help/optim/ug/first-choose-problem-based-or-solver-based-approach.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 159) Gurobi Optimization ; What's New - Gurobi 12.0, Gurobi Optimizer. <https://www.gurobi.com/whats-new-gurobi-12-0/> (アクセス日 2025.1.28)
- 160) Gurobi Optimization ; MIPGap とは, Gurobi ヘルプセンター. <https://support.gurobi.com/hc/ja/articles/8265539575953-MIPGap> とは (アクセス日 2025.1.28)
- 161) MathWorks ; parfor, MathWorks ヘルプセンター. <https://jp.mathworks.com/help/parallel-computing/parfor.html> (アクセス日 2025.1.28)
- 162) 山田武史, 所寿洋, 中島忠司, 中村勇人, 山野健治, 長

井孝之, 笹川雄司, 一色正男; ハイブリッド給湯機と蓄電池システムによる太陽光発電の自家消費利用の連携効果の検証, エネルギー・資源学会論文誌, 44-1 (2023.1), pp.39-46. https://doi.org/10.24778/jjsr.44.1_39 (アクセス日 2025.1.28)

163) 山田武史, 小長井教宏, 笹川雄司, 一色正男; 北海道におけるハイブリッド暖房のヒートポンプを用いた DR への貢献に関する検証, エネルギー・資源学会論文誌, 46-1 (2025.1), pp.73-79. https://doi.org/10.24778/jjsr.46.1_73 (アクセス日 2025.1.28)

164) ヒートポンプ・蓄熱センター; 「平成 22 年度電力負荷平準化対策推進事業」先導的負荷平準化機器導入普及モデルに係る調査 報告書. https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/technology/verification/pdf/report_verification.pdf (アクセス日 2025.1.28)

165) 甲斐田武延; 産業用ヒートポンプの適用拡大に向けた技術動向, 電気学会論文誌 B, 144-12 (2024.12), pp.604-607. <https://doi.org/10.1541/ieejpes.144.604> (アクセス日 2025.1.28)

付録

PVA の発電電力の求解値 $P_{PVA,t}^*$ の構成を 図 26 に、HPC の PSU への充放電電力の求解値 $P_{HPC,t}^*$ の構成を 図 27 に、BAT の蓄電量の求解値 $E_{BAT,t}^*$ の構成を 図 28 に、BEV の蓄電量の

求解値 $E_{BEV,t}^*$ の構成を 図 29 に、GWH の出力熱力の求解値 $W_{GWH,t}^*$ の構成を 図 30 に、STC の出力熱力の求解値 $W_{STC,t}^*$ の構成を 図 31 に示す。

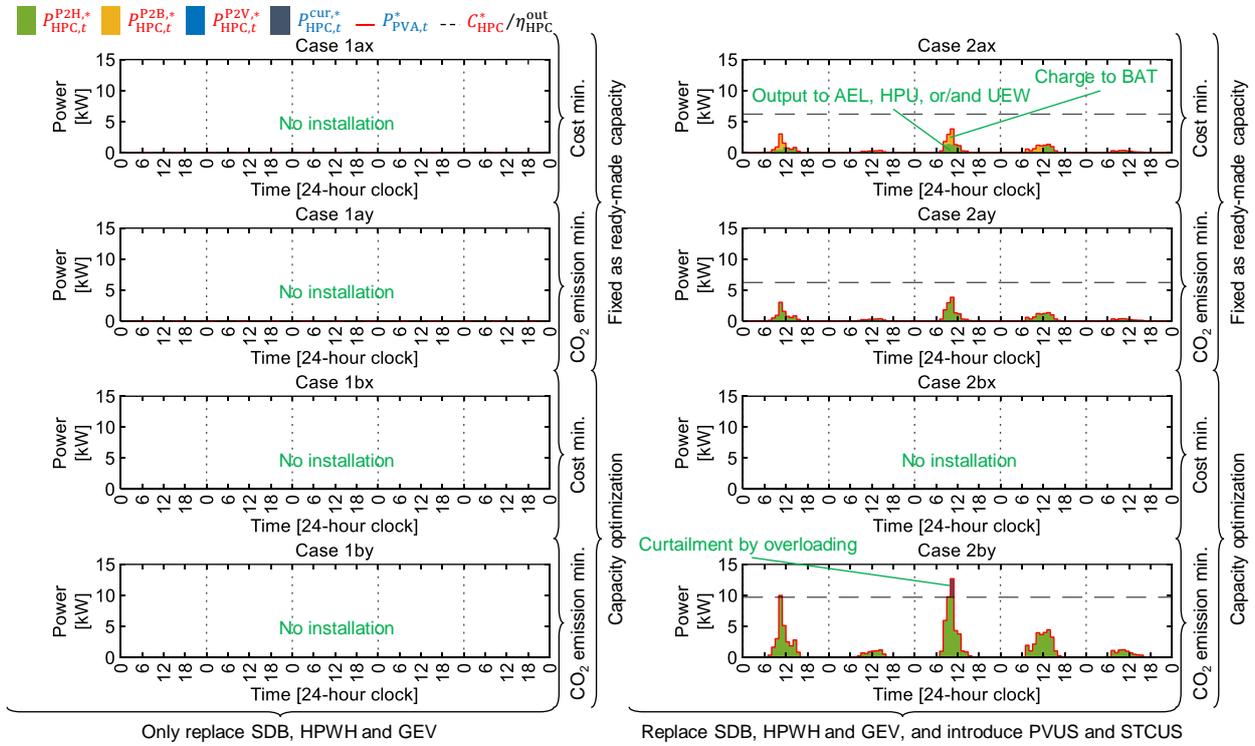


図 26 太陽光発電アレイの発電電力の求解値の構成

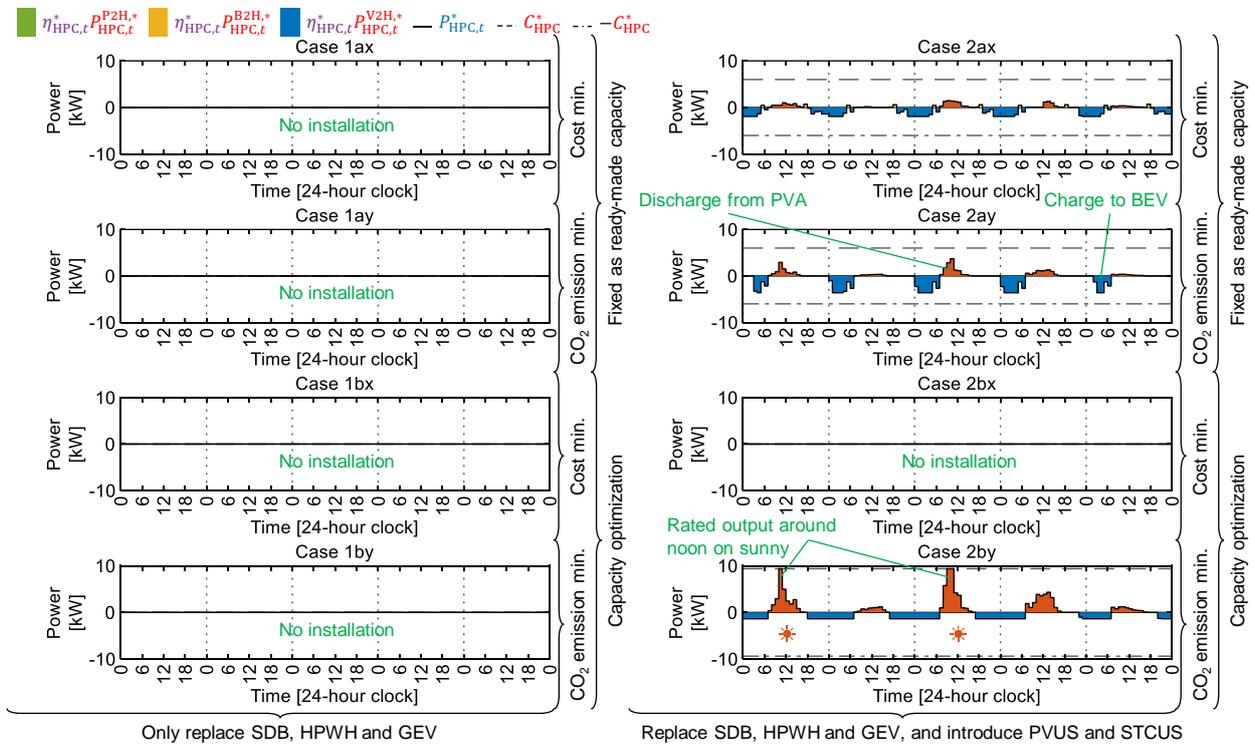


図 27 ハイブリッドパワーコンディショナーの電力切替ユニットへの充放電電力の求解値の構成

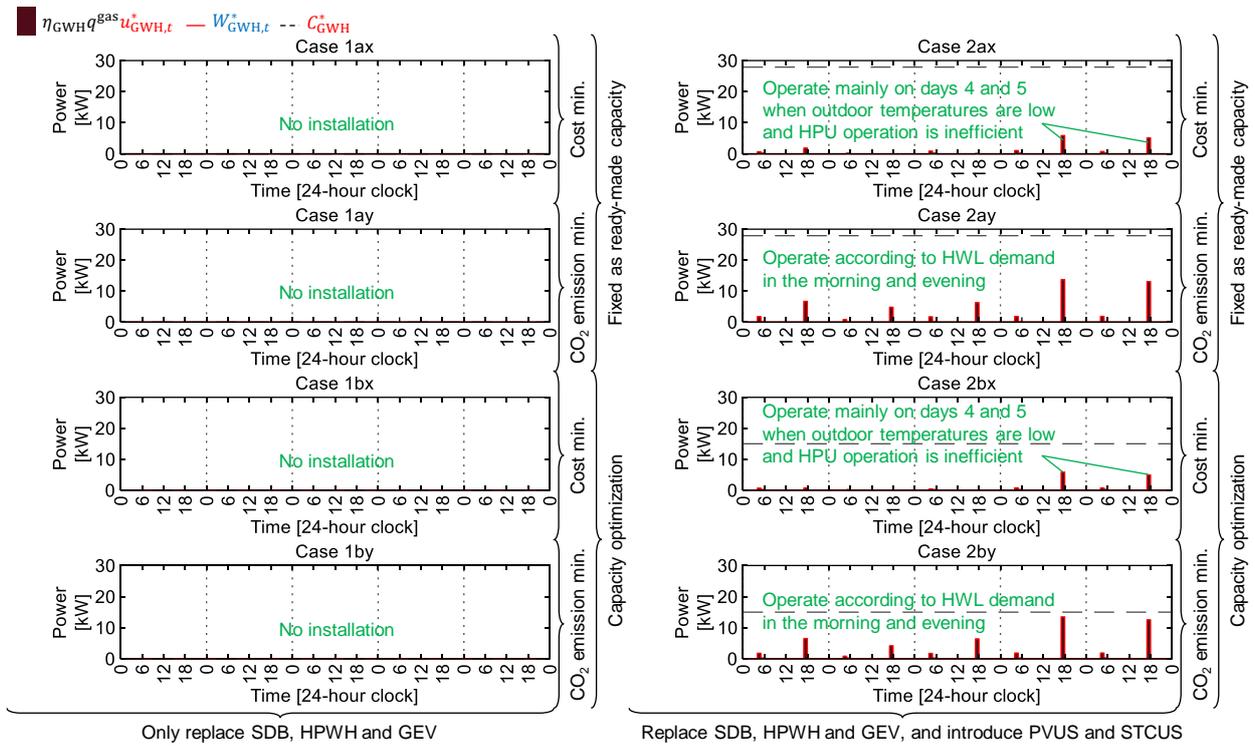


図 30 ガス給湯機の実出力熱力の求解値の構成

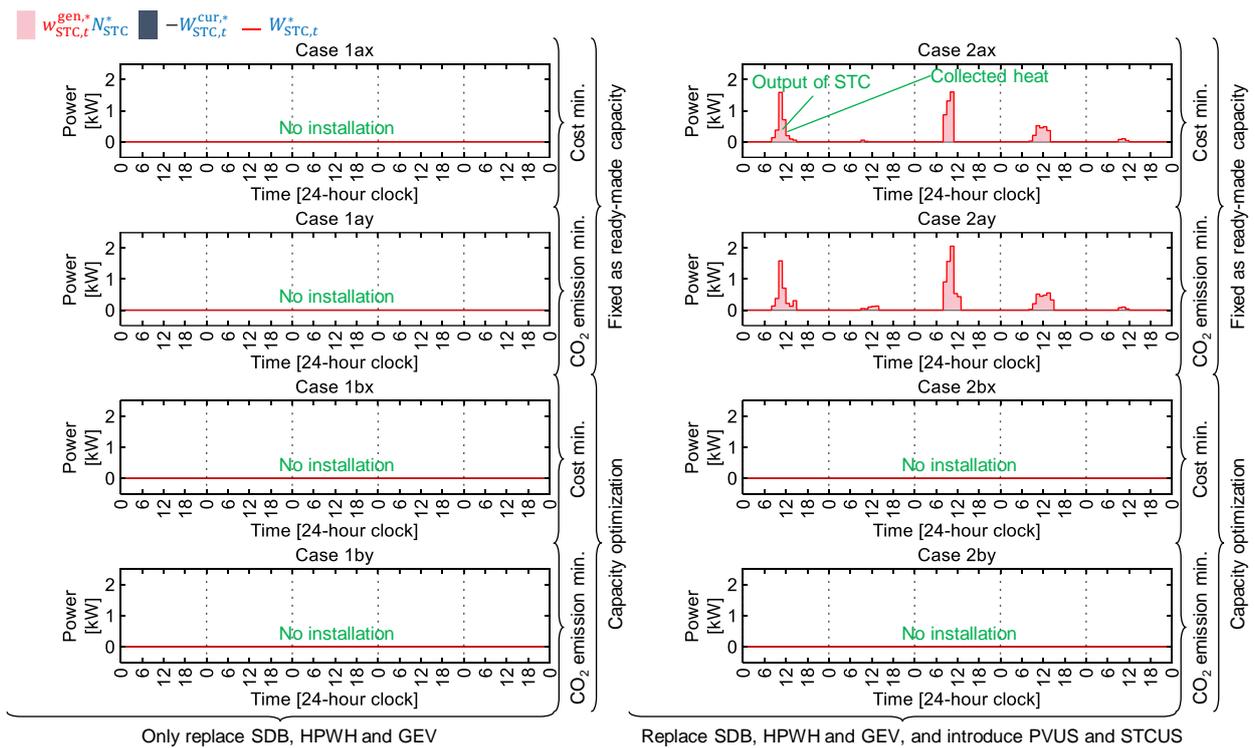


図 31 太陽熱集熱器の実出力熱力の求解値の構成