

ゼロ・エネルギーグリーンハウスに関する研究

研究代表者 菅野 颯馬
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

日本の施設園芸の面積は 43,220 ha (2018 年) と世界第 4 位の規模であり、特に燃焼式暖房により年間 618 万トンの CO₂ を排出している。農業分野の脱炭素化に向けては、施設園芸の省エネルギー化と燃料転換が求められる。建築環境分野で適用されている建築物の省エネルギー性能や再生可能エネルギー導入を評価する ZEB (net Zero Energy Building)、ZEH (net Zero Energy House) に準じた手法を施設園芸温室に適用し、ZEG (net Zero Energy Greenhouse) の定義と評価手法を開発する。さらに、開発した評価手法に則り、実証温室の環境やエネルギー消費量の計測を行い、一次エネルギー消費量や CO₂ 排出量を評価する。ZEG の普及に向けた外皮性能・設備の要求水準を定量的に明確化することを目指す。

2. 主な研究成果

本年度は、①温室の年間一次エネルギー消費量や CO₂ 排出量を計算するシミュレータの開発、②三重県いなべ市に実際に建設された ZEG 仕様温室を対象とした冬季のエネルギー計測に基づく ZEG 評価を主に行った。本報では②の成果について報告する。

2.1 測定概要

図 1 に ZEG 仕様温室および対照温室の外観と内観を示す。両温室とも、規模は 43.2 m × 50.0 m、棟高 4.6 m、軒高 2.3 m の南北棟である。両ハウスは 2024 年 9 月 25 日から運用を開始し、12 月以降、室温に基づく制御による暖房運転が確認された。

ZEG 仕様温室および対照温室では、イチゴを栽培しており、ZEG 仕様温室では紅ほっぺ、対照温室では紅ほっぺおよびスターナイトを栽培していた。本報では、2025 年 1 月 10 日から 3 月 2 日までを測定期間とし、エネルギー消費量などを評価した。

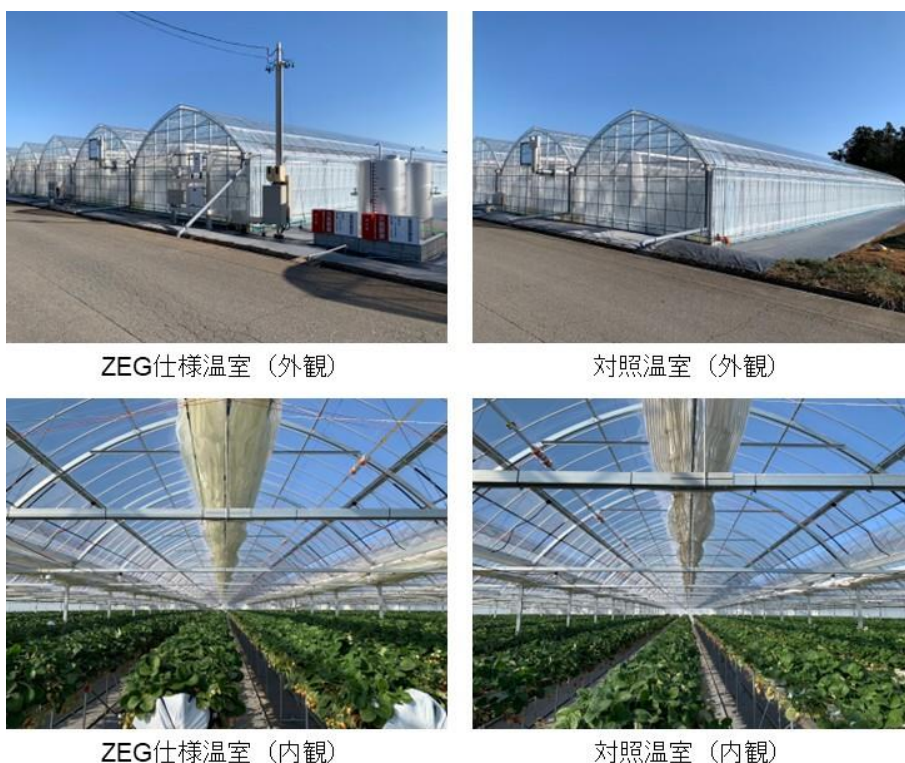


図 1 ZEG 仕様温室と対照温室の外観と内観

2.1.1 導入設備

両温室の被覆資材はともに P0 フィルム（厚さ 0.15 mm）であり、側面には気泡型農 P0 フィルムが内張りされている。また、PET・PE 製で遮光率約 50%の遮光・保温用内張りカーテンが 1 層備えられていた。ZEG 仕様温室では、これに加えて、保温カーテンのさらに内側に波長選択型積層フィルムのカーテンが 1 層設置されていた。波長選択型積層フィルムとは、光合成に必要な 400～700nm の波長帯の透過率が高く、近赤外線や遠赤外線の透過率を低くすることで、冬季の保温性能と夏季の遮熱性能を両立する資材である。暖房機について、対照温室にはネポン製の重油式暖房機 HK4030TCV が 2 台設置されていた。一方、ZEG 仕様温室には対照温室よりも容量の小さいネポン製の重油式暖房機 HK3030TCV が 2 台に加え、地下水熱源を利用したネポン製のヒートポンプ暖房機 NGP109T-NJ が 2 台設置されていた。両温室には共通して、ネポン製の CO₂施用機（CG-554T2）が 2 台、および日農工業株式会社製の循環扇（風来望Ⅱ）が 6 台設置されていた。したがって、両温室の設備の違いは暖房機の種類と波長選択型積層フィルムの有無のみである。

図 2 に、太陽光パネル、蓄電池、パワーコンディショナーを示す。農場内には温室に電力を供給する太陽光発電パネルが設置されており、ZEG 仕様温室と対照温室には計 26 枚のモジュール（LX-525W/M10-132、合計 13.65 kW）が接続されている。パネルは垂直型で、東西面に受光面を持つものが 18 枚、南北面に受光面を持つものが 8 枚であった。また、5 kWh の蓄電池（LUNA2000-5-NHS0, HUAWEI）が備えられている。



太陽光パネル

蓄電池と
パワーコンディショナー

図 2 太陽光パネルと蓄電池、パワーコンディショナー

2.1.2 設備の運用

暖房機は室温のモニタリングに基づき、両温室とも同じ制御ロジックで運転されていた。特に冬季は、果実への同化産物の転流を促進するため、設定温度は時期に応じて $6\sim 7^{\circ}\text{C}$ とし、ZEG 仕様温室ではヒートポンプ式暖房機が優先的に稼働するように制御された。ここで、ZEG 仕様温室のヒートポンプ式暖房機と対照温室の燃油暖房機の設定温度を揃え、ZEG 仕様温室の燃油暖房機の設定温度はヒートポンプ式暖房機よりも $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 程度下げることで、ヒートポンプ式暖房機が優先稼働する設定とした。この制御により、2 温室の室温および暖房負荷に大きな差が生じないように暖房機が運転されていた。

保温カーテンは、両温室とも 17:00～7:00 に展張するように制御されており、ZEG 仕様温室の波長選択型積層フィルムのカーテンは 16:00～9:30 に展張するように制御された。また、室温が時間帯ごとに設定された上限温度を超えた場合、天窓が自動的に開放される制御が行われている。

2.1.3 測定項目

表 1 に室内環境およびエネルギー消費量の測定項目を示す。測定は 2025 年 1 月 10 日から開始し、継続的にデータを取得した。主に空気温度や相対湿度、各エネルギー消費の用途ごとの電流量、燃油暖房機で使用される A 重油の流量を計測した。いずれも測定間隔は 1 分とした。CO₂ 施用機で消費される灯油の使用量は、概ね月ごとの購入量を記録した。

表 1 室内環境およびエネルギー消費量の測定項目

項目	測定機器	測定間隔	測定精度
空気温度	RTR507BL (T&D Corporation, Japan)	1 min	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
相対湿度	RTR507BL (T&D Corporation, Japan)	1 min	$\pm 2.5\%$
各種機器の電流量	RTR505BL / VIM-3010 (T&D Corporation, Japan) CTT-24-CLS-CV250 (U.R.D. Co., Ltd., Japan)	1 min	$\pm (0.5 \text{ mV} + 0.3\% \text{ of the reading})$, The output ripple is within 5% of the output
A 重油流量	RTR505BL / VIM-3010 (T&D Corporation, Japan) RE10LF (NITTOSEIKO Co., Ltd., Japan)	1 min	$\pm 1.0\%$

2.2 測定結果

図 3 に代表期間における ZEG 仕様温室と対照温室の気温の実測値を示す。両温室とも、夜間から明け方にかけて約 7°C 、夕方に約 12°C に室温が保たれるように暖房がなされていた。測定期間中に関して、両温室とも概ね同様の気温の推移を示し、同等の室内環境品質であることを確認した。

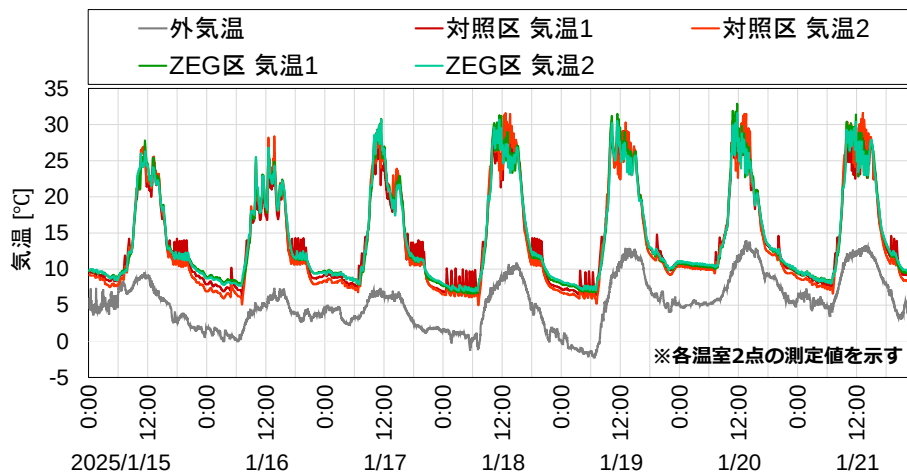


図 3 ZEG 仕様温室と対照温室の気温の推移
(2025 年 1 月 15 日～1 月 21 日)

図 4 に各温室での代表日における電力・A 重油消費量の推移を示す。2025 年 1 月 18 日の測定値を示した。対照温室では重油式暖房機の送風電力が ZEG 区の約 2 倍を推移していた。これは、対照温室の重油式暖房機に搭載された送風機が 2 台であったのに対し、ZEG 仕様温室では 1 台のみであったためであり、ZEG 仕様温室ではヒートポンプ式暖房機を併用することで温風暖房機の熱出力を抑えられる設計となっていたことに起因している。HP 暖房機の消費電力は 2 台の合計で 11kW 程度であった。

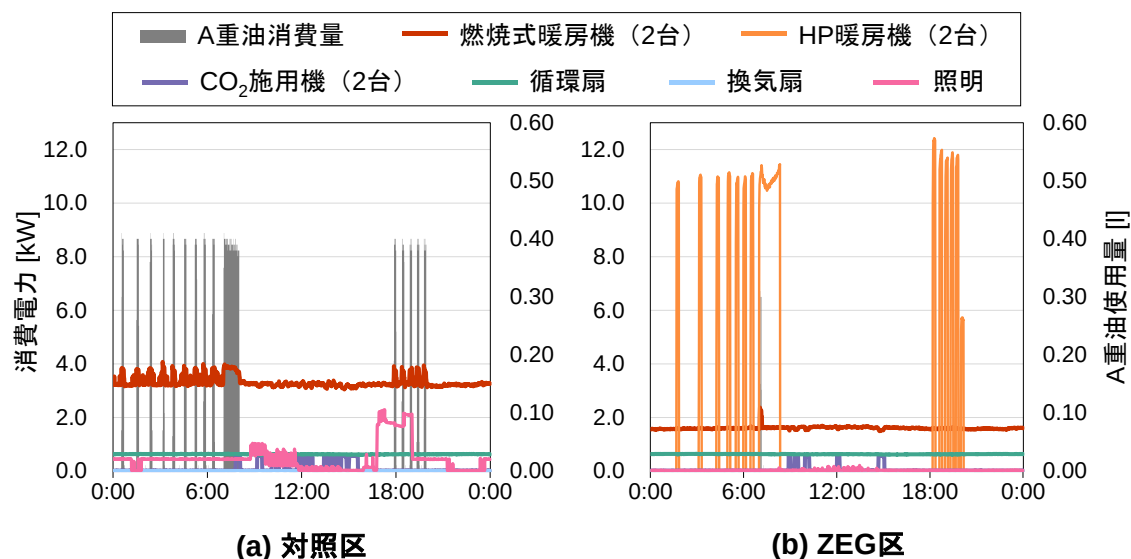


図 4 各温室での代表日における電力・A 重油消費量の推移
(2025 年 1 月 18 日)

図 5 に ZEG 仕様温室と対照温室の電力消費量および燃油使用量を示す。2025 年 1 月 10 日～3 月 2 日の積算値を示した。対照温室のみ単相 100V 電源の照明用電力が多く消費されていることが確認された。これは、対照温室のみスターナイトの生育補助のために補光を行ったためである。この補光用照明の消費電力を除いた場合、電力消費量は対照温室と ZEG 仕様温室で同等であった。また、ZEG 仕様温室では、燃烧式暖房機の稼働が少なかったため、A 重油消費量は対照温室と比較して約 90%の削減が確認された。また、灯油の消費量も 29%削減されていた。これは、ZEG 区のみ波長選択フィルムを朝 9 時 30 分まで展張し、CO₂ 供給効率が上がったためである。

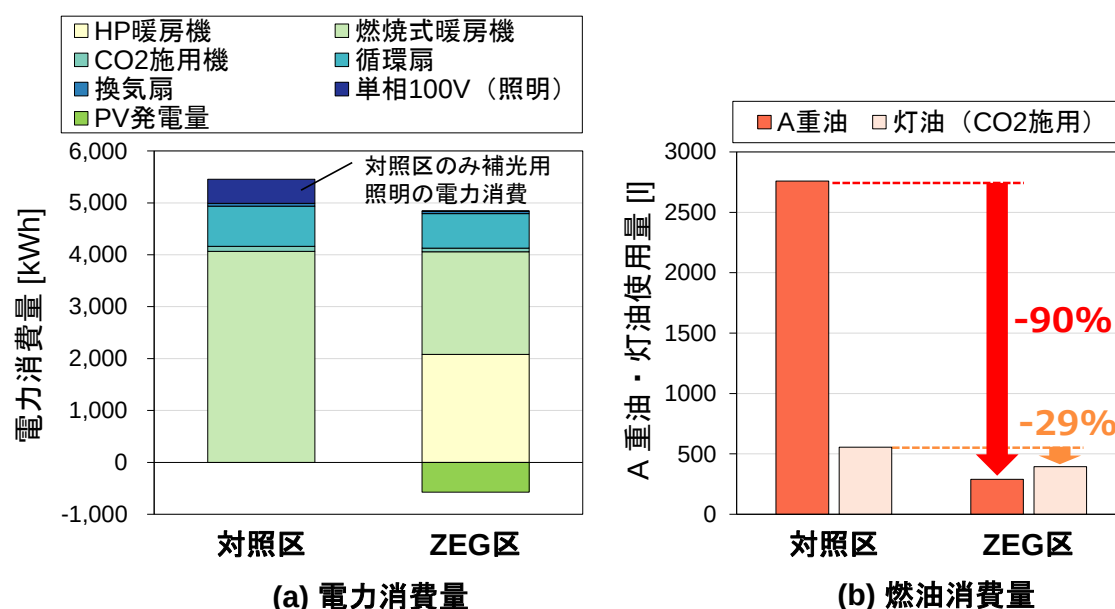


図 5 ZEG 仕様温室と対照温室の電力消費量および燃油使用量
(2025 年 1 月 10 日～3 月 2 日の積算値)

図6に代表期間におけるパワーコンディショナーでモニタリングされた太陽光発電量の推移および2温室での合計消費電力量および合計買電電力量を示す。発電量は、ZEG仕様温室と対照温室に接続された26枚のパネルの発電量の合計値を示している。東西面を向いたパネルも敷設されていたため、朝や夕方に発電量が多い日も確認される。2025年1月10日～3月1日の総発電量は1147 kWhであった。

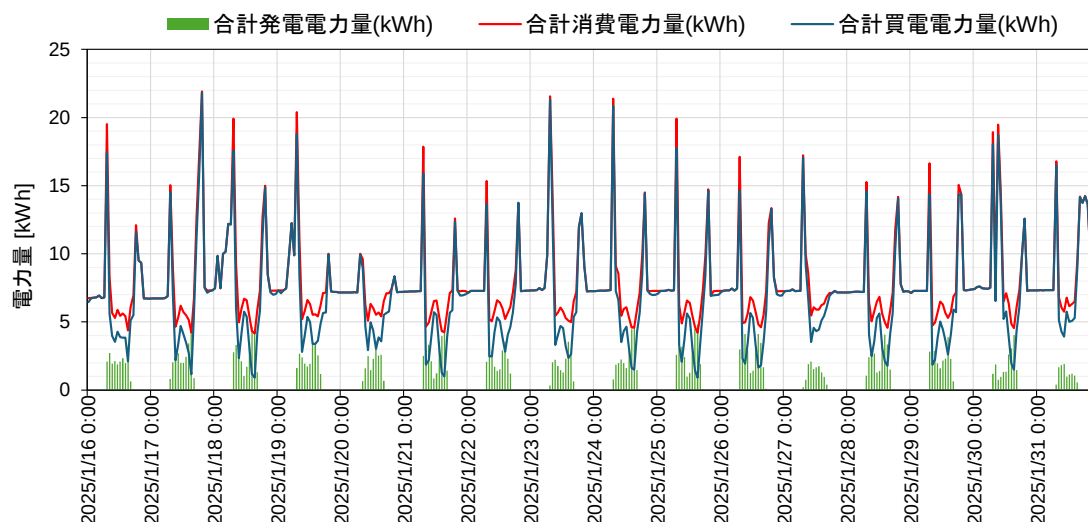


図6 代表期間（2025年1月16日～31日）における太陽光発電量の推移

2.3 一次エネルギー消費量およびCO₂排出量の評価

図7に測定期間における各温室の一次エネルギー消費量およびCO₂消費量を示す。電力の1次エネルギー換算係数を9.76 MJ/kWh、CO₂排出係数0.438 kg-CO₂/kWh、A重油の高位発熱量39.1 MJ/L、CO₂排出係数2.71 kg/L、灯油の発熱量36.7 MJ/L、CO₂排出係数2.49 kg/Lとして計算した。ここで、対照区のみで生じた照明電力は除いたうえで（单相100Vの消費電力がZEG仕様温室と等しかったと仮定して）評価した。評価期間は2025年1月10日から3月2日とした。

対照温室の一次エネルギー消費量は、A重油由来が電力由来よりも高い割合を占めた。電力、A重油および灯油による一次エネルギー消費量の合計は、評価期間で約177 GJとなった。一方、ZEG仕様温室ではA重油の消費量が少なく、電力由来の一次エネルギー消費量が半分以上を占め、合計約68 GJとなった。その結果、対照温室と比較して約59%の一次エネルギー消費量削減が確認され、ZEG化の効果（2.1 GJ/日・温室）が示された。

また、太陽光発電電力が対照温室とZEG仕様温室に按分して供給されたと仮定すると、その一次エネルギー供給量はZEG仕様温室の一次エネルギー消費量の約8%であった。評価期間におけるZEG仕様温室のCO₂排出量は約3.9 tと算出され、約11.1 tの対照温室よりも約65%の削減（0.14 t-CO₂/日・温室）が認められた。

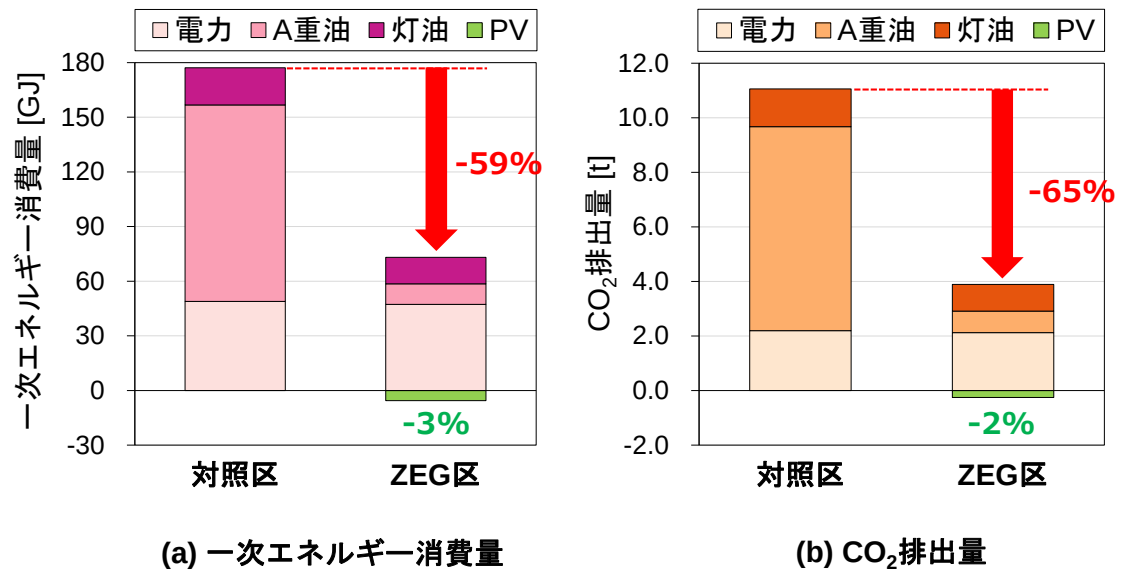


図7 ZEG仕様温室と対照温室の一次エネルギー消費量およびCO₂排出量
(2025年1月10日～3月2日の積算値)

2.4 まとめ

三重県いなべ市に建設されたZEG仕様温室を対象に、環境・エネルギーの計測を実施した。評価期間（2025年1月10日～3月2日）において、保温カーテン一層の対照温室と比較してZEG仕様温室では、一次エネルギー消費量は約60%（2.1 GJ/日・温室）、CO₂排出量は約65%（0.14 t-CO₂/日・温室）削減されていることを確認した。本温室に導入された地下水熱源式ヒートポンプや波長選択型積層フィルムの効果が実証された。

3. 共同研究者

田辺 新一（創造理工学部建築学科 教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文（MS 明朝体、11 ポイント）

- 1) Soma Sugano, Yu Fujimoto, Yuto Ihara, Masataka Mitsuoka, Shin-ichi Tanabe, Yasuhiro Hayashi, Quantifying spatio-temporal carbon intensity within a city using large-scale smart meter data: Unveiling the impact of behind-the-meter generation, Applied Energy, Volume 383, 2025
- 2) Soma Sugano, Masahisa Ishii, Shin-ichi Tanabe, Adaptation of indoor ornamental plants to various lighting levels in growth chambers simulating workplace environments. Sci Rep 14, 17424, 2024
- 3) Nami Akamatsu, Soma Sugano, Kanta Amada, Naho Tomita, Hidetaka Iwaizumi, Yuki Takeda, Pawel Wargocki, Bjarne W. Olesen, Shin-ichi Tanabe, Effects of a gas-phase air cleaner in removing human bioeffluents and improving perceived air quality, Building and Environment, Volume 257, 2024

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

- 1) 菅野颯馬, 石森貴也, 石井 雅久, 藤本悠, 林泰弘, 田辺新一, 温室および農場のゼロ・エネルギー化に関する研究 第 3 報 ZEG 評価に向けた温室のエネルギーシミュレータの開発, 空気調和・衛生工学会大会, 佐賀, 2024
- 2) 石森貴也, 菅野颯馬, 藤本悠, 石井 雅久, 林泰弘, 田辺新一, 施設園芸における暖房機器設備設計による省エネルギー性と経済性の分析, 空気調和・衛生工学会大会, 佐賀, 2024
- 3) 岩泉秀隆, 赤松奈美, 富田奈歩, 竹田雄紀, 天田侃汰, 菅野颯馬, 金炫兌, 森本正一, 田辺新一, 活性炭を利用した空気清浄機が生体発散物質の除去および知覚空気質に与える影響（第 1 報）被験者を用いた生体発散物質の測定とにおい袋法による臭気評価, 空気調和・衛生工学会大会, 佐賀, 2024
- 4) 赤松奈美, 岩泉秀隆, 富田奈歩, 竹田雄紀, 天田侃汰, 菅野颯馬, 金炫兌, 森本正一, 田辺新一, 活性炭を利用した空気清浄機が生体発散物質の除去および知覚空気質に与える影響（第 2 報）直接嗅ぎ法を用いた異なる温熱環境条件下での実験, 空気調和・衛生工学会大会, 佐賀, 2024
- 5) 堀野桜子, 松尾和弥, 菅野颯馬, 兒玉花朋, 下山千明, 仲野潤平, 高野智希, 石井雅久, 田辺新一, 屋内植物の蒸散量の推定手法に関する研究（第 1 報）室内環境計測に基づく算出手法の検討, 空気調和・衛生工学会大会, 佐賀, 2024
- 6) 松尾和弥, 堀野桜子, 菅野颯馬, 兒玉花朋, 下山千明, 仲野潤平, 高野智希, 石井雅久, 田

- 辺新一, 屋内植物の蒸散量の推定手法に関する研究 (第 2 報) 3D モデルと光環境解析を用いた手法の検討, 空気調和・衛生工学会大会, 佐賀, 2024
- 7) 山野井瞳, 高野智希, 小池潤, 渡邊百花, 菅野颯馬, 鵜飼真成, 田辺新一, 音環境改善手法としてのマスキング音が個人の知的作業と複数人会議に与える影響, 空気調和・衛生工学会大会, 佐賀, 2024
 - 8) 石森貴也, 菅野颯馬, 藤本悠, 石井 雅久, 田辺新一, 林泰弘, 施設園芸の低炭素化に向けた暖房設備の設計要件の検討・農業のエネルギーマネジメントシステムに向けて-, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 2024
 - 9) 中野はるか, 藤本悠, 金子奈々恵, 菅野颯馬, 井原雄人, YANG Wei-hsiang, 林泰弘, 都市の太陽光地域余剰電力活用と運行の低炭素化を目的とした電気バス充電計画法の検討, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 2024
 - 10) 兒玉花朋, 菅野颯馬, 高橋好斗, 下山千明, 高野智希, 仲野潤平, 松尾和弥, 佐々木真人, 田辺新一, 超高層オフィスビルにおける植物のための室内環境計画に関する研究, 日本建築学会大会 (東京), 2024
 - 11) 堀野桜子, 松尾和弥, 菅野颯馬, 兒玉花朋, 下山千明, 高野智希, 仲野潤平, 田辺新一, 室内における観葉植物の蒸散量の測定, 日本建築学会大会 (東京), 2024
 - 12) 岩泉秀隆, 富田奈歩, 赤松奈美, 竹田雄紀, 天田侃汰, 菅野颯馬, 金炫兌, 森本正一, 田邊新一, 活性炭を利用した空気清浄機が生体発散物質の除去および知覚空気質に与える影響 (第 1 報) 実験概要と化学物質分析の結果, 日本建築学会大会 (東京), 2024
 - 13) 富田奈歩, 岩泉秀隆, 赤松奈美, 竹田雄紀, 天田侃汰, 菅野颯馬, 金炫兌, 森本正一, 田邊新一, 活性炭を利用した空気清浄機が生体発散物質の除去および知覚空気質に与える影響 (第 2 報) 被験者実験による臭気評価結果, 日本建築学会大会 (東京), 2024
 - 14) 山野井瞳, 高野智希, 小池潤, 渡邊百花, 菅野颯馬, 鵜飼真成, 田辺新一, 個人の知的作業と複数人会議が共存するワークプレイスにおけるマスキング音の影響 その 1: 心理評価に基づくマスキング音の選定, 日本建築学会大会 (東京), 2024
 - 15) 高野智希, 山野井瞳, 小池潤, 渡邊百花, 菅野颯馬, 鵜飼真成, 田辺新一, 個人の知的作業と複数人会議が共存するワークプレイスにおけるマスキング音の影響 その 21: マスキング音が個人の知的作業と会議の活性化に及ぼす影響, 日本建築学会大会 (東京), 2024
 - 16) 山野井瞳, 高野智希, 浅野顕光, 晝間大夢, 堀野桜子, 吉森優菜, 松本維心, 鵜飼真成, 菅野颯馬, 森角香奈子, 國井麻菜美, 西垣向陽, 田辺新一, 無人受付での BGM が企業の印象や来訪者の心理に与える影響, 日本音楽知覚認知学会 2024 年度秋季研究発表会 (神戸), 2024
 - 17) Kaho Kodama, Soma Sugano, Shin-ichi Tanabe, Effects of Growth Media in an Active Plant System on Indoor Thermal Environment and Air Quality, 18th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate INDOOR AIR 2024
 - 18) Haruka Nakano, Yu Fujimoto, Nanae Kaneko, Soma Sugano, Wei-Hsiang Yang, Yuto Ihara, Yasuhiro Hayashi, A Low-Carbon Charging Operation Planning Approach for Electric Buses, 2024 13th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)

5. 研究活動の課題と展望

次年度は 2024 年度までに開発したシミュレータを用い、温室の外皮・設備性能、気象データ、栽培管理温度などを変数とし、ZEG を実現可能な設備の条件を探索的に分析する。これにより、ZEG の普及に向けた外皮性能・設備の要求水準を定量的に明確化する。また、実証温室での測定を継続し、年間を通じて取得したデータに基づく ZEG 達成度の評価を行う。国際学会や査読付き論文等での成果発表を予定している。