

エネルギー自立型サステナブル研究施設 －ZWB 化の取り組みと試算評価－※

大迫孝輔・柴田克彦・田中健太*1・大塚雅之*1

Planning and Evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center - Efforts toward ZWB and Estimated Evaluation -

Kosuke Osako・Katsuhiko Shibata・Kenta Tanaka・Masayuki Otsuka

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、今後の建築はZEBだけでなく、Zero Water Building（以降、ZWBと記す）評価も含めたオペレーショナルカーボンの削減を考慮した総合的な取り組みが必要である。高砂熱学イノベーションセンターは、その実現に向け取り組んでいる施設である。本建物はエネルギー収支の実績においてネットゼロを達成しており、導入している井水を有効活用した水利用システムはその実現に貢献している。本報では、このような本建物においてZWB達成に向けた水利用の改善技術を事前に検討し導入した。設備運用の改善により地下水使用量の削減に取り組み、加えて既存の雨水貯留浸透槽を改造し雨水を地下浸透させた。雨水浸透量の把握には、雨水貯留浸透槽内の水位を実測する新たな浸透量の推定方法を検討した。一定期間の運用における実測データに基づいて試算した結果、ZWB評価値が大幅に改善されることを確認した。

1. はじめに

従来からの節水や水のリサイクルに加えて、近年では上下水道インフラへの負荷低減を考慮した新たな水資源自立循環型建物としてZWBへの関心が高まっている¹⁾²⁾。建物のカーボンニュートラル実現に向け、今後はZEBだけでなく、ZWB評価も含めたオペレーショナルカーボンの削減を考慮した総合的な取り組みが必要である。高砂熱学イノベーションセンター（以下、本建物）は、再生可能エネルギーによるエネルギーの自立を目指し計画された研究施設であり、導入した地下水を有効活用した水利用システムは、ネットゼロエネルギーの達成に貢献している。既報⁴⁾において、米国グリーンビルディング協会が提唱するLEED Zero Water（以降、LEED-ZWと記す）認証のZWB定義に基づき、本建物に導入可能なZWB達成に向けた改善技術の効果を試算し、ZWB達成の可能性を確認した。本報では、前報で試算した改善技術を実際に本建物に導入して検証した結果について述べる。

2. ZWB 化の取り組み

2.1 除鉄除マンガン装置逆洗排水量の削減

本建物では、揚水した地下水を無薬注ろ過方式の除鉄除マンガン装置により処理をしている。この装置の維持管理のために逆洗工程（以降、逆洗と記す）があり、その排水は下水放流している。この逆洗排水量は、本建物の下水量の約54%を占めており⁵⁾、これを削減できれば、ZWB化への効果は大きい。そこで、

※ 本論文は、2025年度空気調和衛生工学会講演論文³⁾を加筆修正したものである。

*1 関東学院大学

除鉄除マンガン装置の逆洗水量削減へ向け、以下の2種類について取り組んだ。

- 1) 逆洗回数および逆洗時間の低減
逆洗回数および逆洗時間の低減について、本建物の実設備により検証した。
- 2) 逆洗排水を地下浸透させ還元水とし下水量を低減
小型浸透槽により、逆洗排水の地下浸透の際に、不具合がないか検証した。
なお、今回の逆洗排水の地下浸透については、事前に行政から了解を得て実施した。

(1) 除鉄除マンガン装置の概要

図1に本建物の除鉄除マンガン装置のフロー図を示す。通常運転では、ろ過塔内に充填された担体で、地下水中の鉄・マンガンを除去する。逆流洗浄では、通常運転の逆方向から通水するだけで、除去した鉄・マンガンが逆洗排水と一緒に放出され、次の後洗浄工程では、逆流洗浄による塔内の残留物を洗い流す。

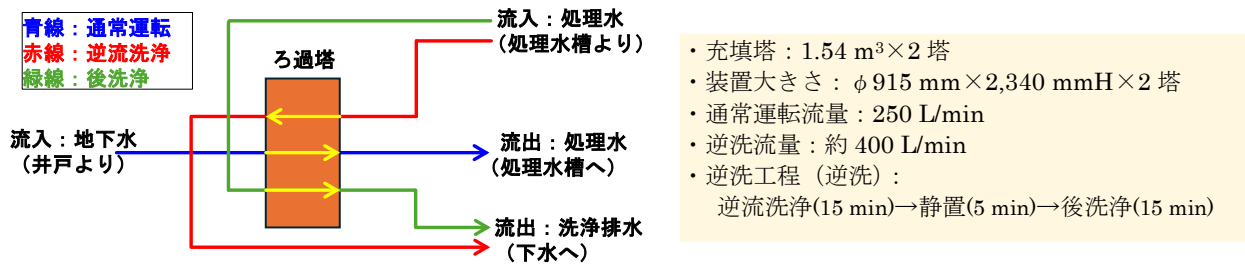


図1 除鉄除マンガン装置フロー図

(2) 除鉄除マンガン装置の逆洗水量削減の取り組み

1) 逆洗回数および逆洗時間の短縮

当初は、メーカー指定の一般的な条件（装置稼働日は逆洗実施）に基づき5回/週の逆洗を行っていた。逆洗回数低減の検証では、この逆洗頻度を5→1回/週に段階的に低減し評価した。通常運転時の装置出入口の差圧と水質（鉄、マンガン）の評価結果を図2、図3に示す。図2の差圧については、逆洗頻度に関わらず一定であった。図3に示す除鉄除マンガン装置の入口（地下水）と出口（処理水）の水質については、鉄の出口濃度は入口濃度0.02~0.17 mg/Lに対して約0.02 mg/L付近で一定に分布していた。同様に、マンガンも、入口濃度0.03~0.042 mg/Lに対して、出口濃度は0.01 mg/L未満で安定していた。逆洗回数を低減しても、差圧上昇や出口（処理水）濃度に水質劣化が見られないことから、除去性能には影響がないことが分かった。

一方、逆洗洗浄中の逆洗排水の鉄濃度の変化を図4に示す。夏期は、冷熱利用のため地下水汲み上げ量が多い。そのため、1回/週の逆洗では、開始15minの逆流洗浄工程で鉄成分をとり切れない期間があった（例：図4の9/19）。一方、夏期以外の時期は、逆洗終了時に鉄成分を取り切れていた（例：図4の10/17）。このため、日常管理のしやすさと水質の安全を考え、地下水汲み上げ量が多い春期夏期(4~9月)は2回/週、汲み上げ量が少ない秋期冬期(10~3月)は1回/週という逆洗回数とした。

次に、逆洗時間の短縮について検証した。図1に示すように、逆洗工程は、1塔あたり、逆流洗浄(15min)→静置(5min)→後洗浄(15min)といった時間がかかるが、このとき逆洗排水の水質から逆洗時間を短縮できないか検討した。図4に示すように、後洗浄の水が非常に綺麗なため、後洗浄時間を短縮しても水質的には問題がないと考えられた。後洗浄時間を15分間から5分間〜10分短縮しても、塔内の残留物を洗い流す後洗浄の目的を損なわないと判断した。

以上の取り組みにより、年間を通して3,600 m³/年だった逆洗水量は、逆洗頻度の低減と後洗浄時間の短縮により1,240 m³/年になると試算された。

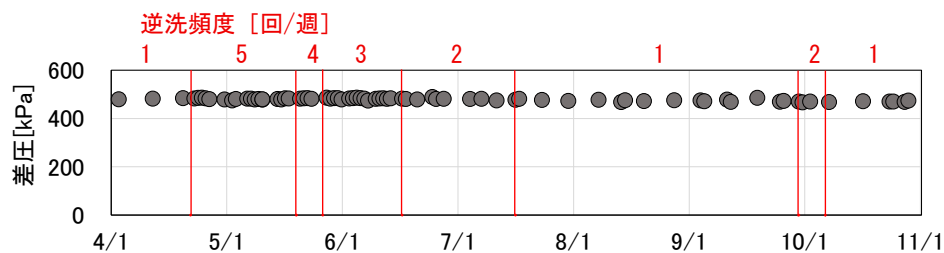


図2 除鉄除マンガン装置前後の差圧

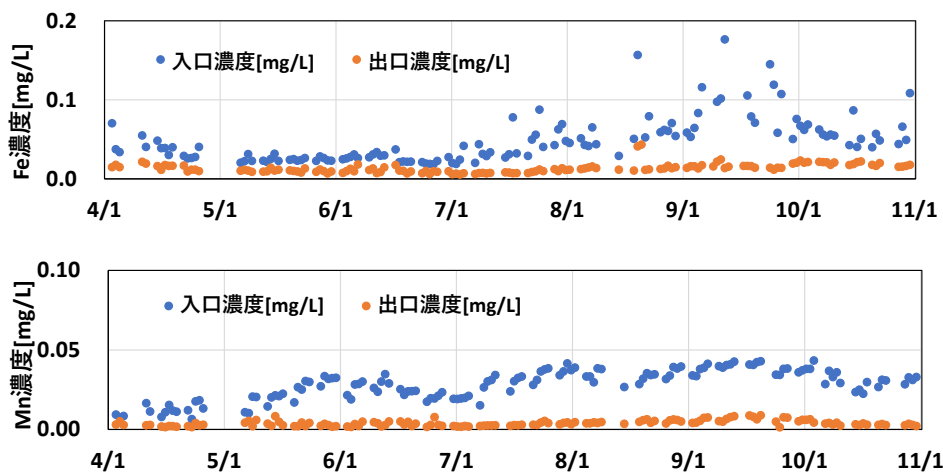


図3 除鉄除マンガン処理前後の水質(Fe, Mn)変化

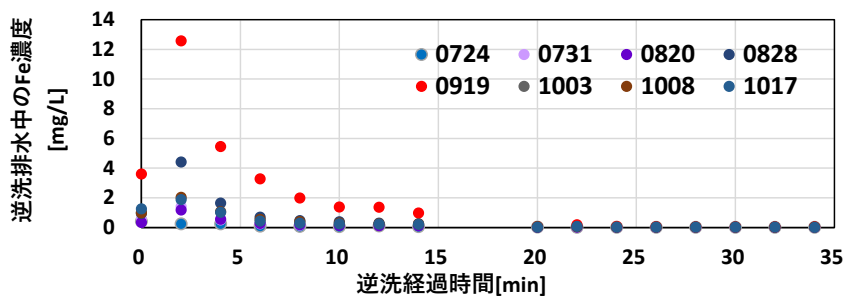


図4 除鉄除マンガン装置逆洗排水の水質変化

2) 逆洗排水の地下浸透

次に逆洗排水を地下に浸透させて還元水とすることで下水排水をゼロにできるか検証した。試験は、敷地内に新たに設置した小型の逆洗水浸透槽で行い、逆洗排水を投入して浸透速度を計測し浸透能力を確認した。図5に逆洗排水の浸透速度を示す。計測期間では、浸透速度が低下する傾向がわずかに見られた。これは水温が低くなると粘性が高くなり透水速度が低下するためであり、槽内の閉塞による速度低下はみられなかった。ただし、本件は引続き検証を行い水温との関係を明らかにし、一年を通じて問題がないか、引き続き検証する予定である。

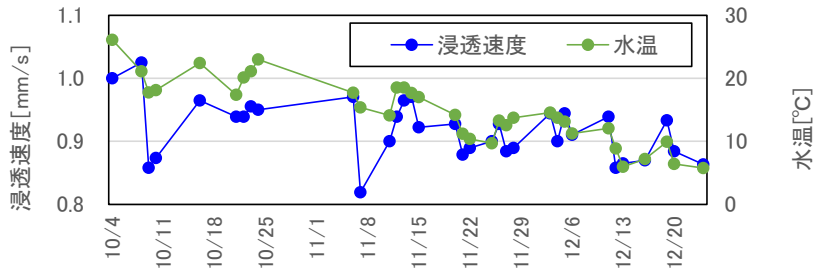


図5 逆洗水の浸透速度

2.2 改造した雨水貯留浸透槽による雨水の地下浸透

本建物の敷地内には、雨水の許容放流量を満たすための雨水流出抑制施設として、雨水貯留浸透槽が2槽ある。A槽は275 m³、B槽は211 m³の容積がある。本雨水貯留浸透槽は地下浸透性能を有しているが、雨水流出を抑制する目的で設置されていたため、浸透機能が十分に活かされていない。そこで、浸透機能を活かした還元水量への貢献を目的に改造し、雨水の地下浸透水量（還元水量）の増加を試みた。

(1) 浸透槽の改造の概要

雨水貯留浸透槽Bの改造した放流接続管を図6に示す。放流接続管の先を900 mm立ち上げることで浸透槽内に雨水が貯留するように工夫した。また、浸透槽内の水位は2箇所計測した。浸透槽Aについても同様に改造し水位計を設置した。また、敷地内に設置した雨量計で降雨量を計測した。これら計測値から改修雨水貯留浸透槽A、Bによって見込まれる年間雨水浸透量を試算した。

(2) 再現モデル式

雨量及び雨水貯留浸透槽の水位より、雨水貯留浸透槽の雨水の地下浸透量を以下のモデル式により算出した。

$$\frac{dH}{dt}(t) = \frac{Q_i(t) - Q_o(t) - Q_g(t)}{\lambda WL} \quad (1)$$

$$Q_i(t) = \frac{fA}{360} \left[\frac{R(t) - R(t - 60t_c)}{t_c/60} \right] \quad (2)$$

$$Q_o(t) = C \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2g \left[H(t) - H_0 - \frac{D}{2} \right]} \quad (3)$$

$$Q_g(t) = \alpha \lambda WLH(t) \quad (4)$$

H : 水深 [m]、 t : 時間 [s]、 Q_i : 流入量 [m³/s]、 Q_o : 放流量 [m³/s]、 Q_g : 浸透量 [m³/s]、 λ : 貯留槽の空隙率、 W : 貯留浸透槽の短辺長 [m]、 L : 貯留浸透槽の長辺長 [m]、 f : 流出係数、 A : 集水面積 [ha]、 t_c : 洪水到達時間 [min]、 R : 累加雨量 [mm]、 D : 放流接続管の管径 [m]、 C : 放流接続管の流量係数（標準値0.6）、 g : 重力加速度(=9.8) [m/s²]、 H_0 : 放流接続管の立上高さ [m]、 α : 浸透能力係数 [s⁻¹]

式(1)は平方根の演算を含む式(3)より非線形微分方程式になるため、数値計算によって近似解を解いた。流入量 Q_i の式には、小流域の雨水流入モデルとして標準的に使用されている「合理式合成法」⁹⁾を用いた。放流量 Q_o の式は、オリフィスの流量公式をもとに作成した。浸透量 Q_g の式は、浸透槽内の水深の計測値から得られる浸透能力係数(α)を用いて作成した。流出係数は増水時の水深に着目した試行を繰り返して決定した。計算に供した雨量データは2024年7月1日0:00から2024年11月2日9:30までとし、起算時の水深はゼロとした。

図7に、降水量と浸透槽の水位の関係を示す。降水量に対応して貯留槽の水位の変動が確認できた。これらの計測値を再現モデル式に適用し再現計算を行った結果、図8に示すように、降水量から雨水貯留浸透槽の水位を計算で再現できることを確認した。上記再現モデル式から、浸透槽A、Bにおける年間の浸透量を算出した。2015年から2024年までの10年分の降雨データから1年ごとに浸透量を算出し、その平均値を年間の浸透量とした。敷地内に設置した雨量計は設置1年未満で年間データがないため、降水量は本建物に最寄りの気象庁つくば観測所(館野観測所)の10分雨量より与えた。計算の結果、雨水浸透量は、A槽では4,109 m³/年、B槽では3,991 m³/年、合計8,100 m³/年と算出された。

本取り組みにより、雨水貯留浸透槽の地下浸透量は、浸透槽の浸透能力係数 α により推定可能ということを示した。これは設計計画時に実施する現地浸透試験で得られる浸透能力係数を用いて、従来よりも精度の高い雨水貯留浸透施設を設計できる可能性があることを示している。今後も様々な建物についてデータを蓄積していきたい。

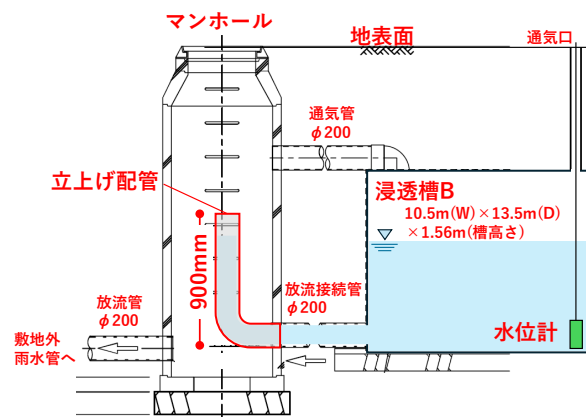


図6 放流接続管の改造

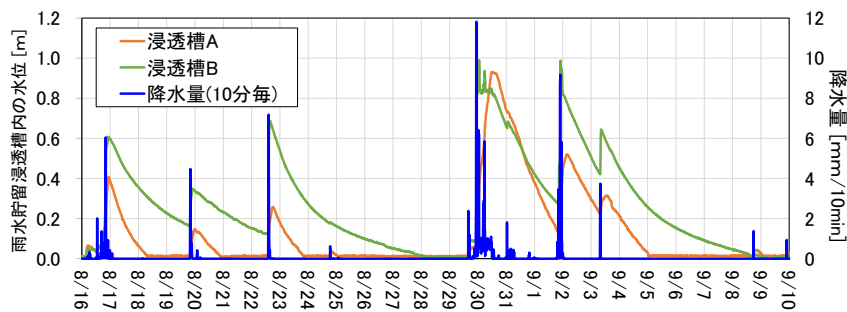


図7 降水量と浸透槽の水位変化

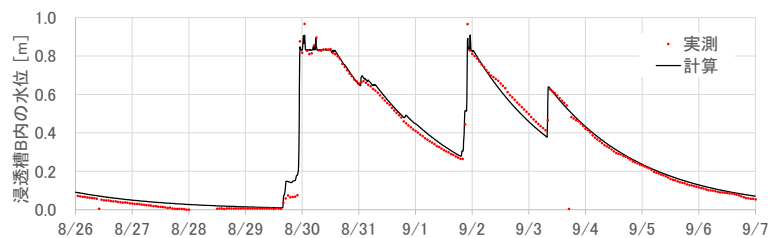


図8 再現モデルによる計算例(B槽)

3. ZWB 評価

本章では、LEED Zero Water が提示している ZWB 評価方法に基づいて、本建物における ZWB 化の検討前と検討後について試算した。

3.1 ZWB の試算方法

前報⁴⁾と同様に LEED Zero Program Guide⁷⁾の ZWB に関する定義をベースに試算を行った。LEED-ZW の雨水浸透量は「Rainwater Management」⁸⁾に記載されている不浸透面からの雨水流出量に基づき計算されるが、本報では降水量と浸透槽内水位の実測値から得られた再現モデル式より算出した浸透量を用いた。

3.2 本建物の ZWB 化の検討と達成の可能性

図 9 に 2023 年度に改修した時の水使用の試算値、図 10 に改修前後の本建物の LEED-ZW 試算値を示す。前述の 2.1 の除鉄除マンガン装置逆洗排水の削減実施で、改修前 2023 年度の逆洗排水量 3,600 m³/年から 1,240 m³/年に低減し、さらにそれを地下浸透させることで、還元水量 1,240 m³/年（図 10 では-1,240 m³/年）となった。雨水浸透の取り組みでは、改造した雨水貯留槽によって、雨水集水量 8,100 m³/年（図 10 では-8,100 m³/年）の地下浸透が可能と算出された。

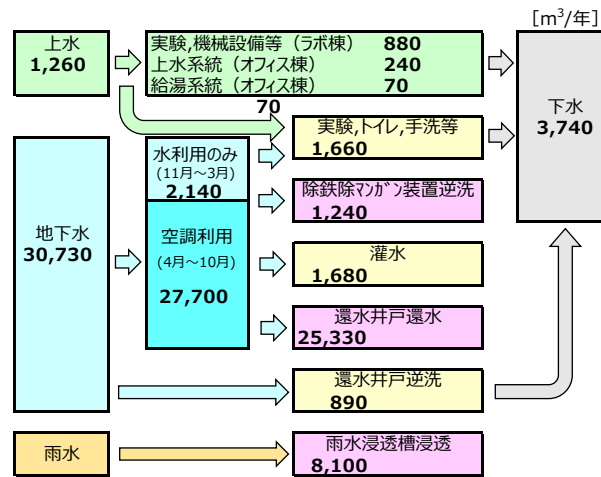


図 9 水使用の試算値(2023 年度)

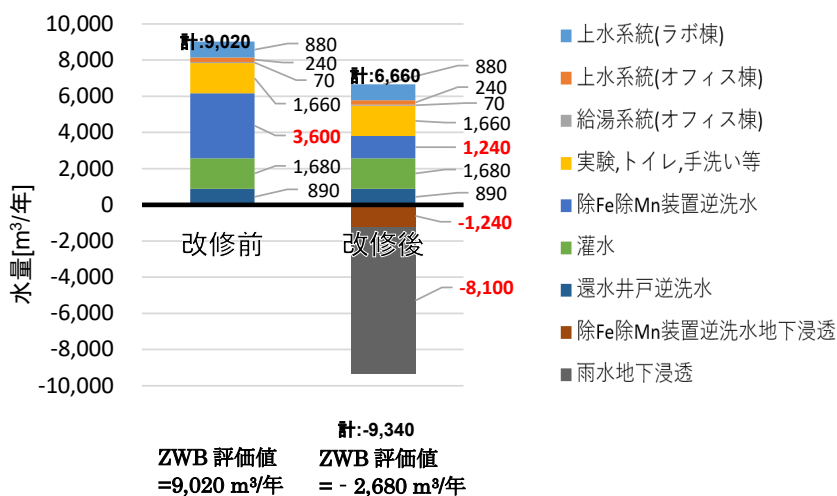


図 10 ZWB 化改修前後の試算結果(2023 年度)

図 10 に示すように、改修前の LEED-ZW の評価結果は、本建物の総使用水量 9,020 m³/年であったが、代替水および還元水については該当する水の利用がなかったため、ZWB 評価値は 9,020 m³/年であった。一方、前述した除鉄除マンガン装置の逆洗水量低減及び改修した雨水浸透槽による雨水地下浸透を行った場合、ZWB 評価値は-2,680 m³/年（=6,660-9,340）となり大きく改善が見られ、ZWB の条件を満たす結果となった。

以上より、本建物において逆洗排水量低減や逆洗排水及び雨水を地下浸透することにより ZWB への改修が可能で、よりサステナブルな建物に改善できる可能性を示した。その一方で、敷地が広く雨水の還元水量を確保しやすいことが ZWB 達成に大きく寄与したと考えられ、水資源の循環利用が目的の、ZWB の趣旨を十分に満足してはいない。現指標では、敷地が広いと還元水の評価が高水準になることがあり、特に郊外の大学キャンパス等では、容易に ZWB を達成できる可能性があるとの指摘がある。敷地サイズごとにカテゴリー分けし、適切な評価をするなど対策が必要と考える。

また、現状の ZWB 評価は水の使用量に関する指標であり、雨水利用や排水再利用に必要なエネルギーについては検討されておらず、多量のエネルギーで多量の水を代替、還元しても ZWB を達成することが出来る。カーボンニュートラル社会の実現を目指す現在においては、水利用だけでなく省エネルギーや脱炭素、快適性や生産性向上なども含めて多元化して評価することがより重要になると考える。例えば、空調の冷熱源として利用した地下水は、水の使用量に加算されない。多様な水の利用方法を持つ施設⁹⁾¹⁰⁾が今後さらに増えていくと考えられ、従来の給排水衛生での水使用量のみで評価するのではなく、水の熱利用などの資源としての利活用要素も加えつつ、日本の特質に合致した ZWB の定義について早急の議論が必要と考えられる。

4. おわりに

再生可能エネルギーによるエネルギー自立を目指す本建物における ZWB 化に向けた取り組みと試算評価から、以下の知見を得た。

- 1) 除鉄除マンガン装置の逆洗排水低減の取り組みにより、逆洗水量は 1,240 m³/年と試算された。
- 2) 小型浸透槽による除鉄除マンガン装置の逆洗排水の浸透試験では、地下浸透の可能性が示された。
- 3) 降水量と雨水貯留浸透槽の実測水位により作成した水位再現モデル式から、地下浸透量は 8,100 m³/年と試算された。
- 4) 除鉄除マンガン装置の逆洗水量低減と雨水浸透槽改修を行った場合、LEED-ZW で試算すると、水収支の値は-2,680 m³/年と試算され、ZWB 達成の可能性が示された。
- 5) 日本の特質に合致した多面的に評価できる ZWB の定義について早急の議論が必要と考えられた。

文 献

- 1) 長谷川 巖：ゼロ・ウォータービルと環境配慮に関する最近の動向，空気調和・衛生工学会誌，92，pp.799-805，2018.
- 2) 大塚ら：特集「ネット・ゼロ・ウォーター」，空気調和・衛生工学会誌，99，pp.365-407，2025.
- 3) 大迫ら：自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価（第 38 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.225-228，2025.
- 4) 大迫ら：同上（第 33 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.113-116，2024.
- 5) 大迫ら：同上（第 29 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.173-176，2023.
- 6) 高島 英二郎：雨水流出に関する時間と空間のセンス(合理式を題材に)，下水道協会誌，Vol.55,No.663，pp.95-99，2018.
- 7) U.S. Green Building Council：LEED Zero Program Guide April 2020.
- 8) U.S. Green Building Council：LEED v4 Sustainable Sites credit Rainwater Management.
- 9) 桐山ら：RC 構造物における屋根散水システムの熱的効果に関する実測研究，空気調和・衛生工学会論文集 No.166，pp.11-18，2011.

- 10) 中曾ら：高性能大容量帯水層蓄熱システムの開発（その1）揚水・環水切換型熱源井の開発意義と運用実績，日本地下水学会秋季講演会講演予稿，pp.138-143，2022.

ABSTRACT

To achieve carbon neutrality by 2050, future buildings must engage in comprehensive efforts that consider both the goal of achieving a zero energy building (also known as ZEB) status and operational carbon reduction, including zero water building (ZWB) assessments and achieving a ZWB status. The Takasago Thermal Innovation Center is working toward this goal. It has achieved a net-zero goal in energy performance and has established a water utilization system that effectively uses well water. This entails that water usage improvement technologies aimed at achieving ZWB were pre-evaluated and implemented in this building. Efforts were made to reduce groundwater usage through improved facility operations, while existing rainwater storage infiltration tanks have been modified to allow rainwater to infiltrate underground. To measure infiltration volume, a new estimation method was applied based on actual water-level measurements placed within the rainwater storage infiltration tanks. Calculations based on actual measured data over a fixed operational period confirmed a significant improvement in the ZWB assessment value.
