

ゼロ・エネルギー・トイレ (ZET: Zero Energy Toilet)に関する研究

— トイレ内照明電力のゼロバランスを目指して —

株式会社LIXIL R&D本部 新事業研究センター

ゼロエネ建築グループ グループリーダー 石井 久史

1. 序

ゼロ・エネルギー・トイレ(ZET: Zero Energy Toilet)は、災害時などの非常時において、地域防災拠点や事務所ビルでの業務継続を円滑にすると同時に、建築におけるゼロエネ化にも対応することを目的とした研究である。本研究は、東北大学大学院工学研究科の石田壽一教授、小林光准教授らと共同で進めており、非常時業務継続性への寄与とゼロエネ化の双方を成立させる上で、常時BCP(Business Continuous Planning)を提唱している。常時BCPとは、常時非常時を問わず、所定の機能と快適性を保持して使用できることである。また、ここでいうゼロエネとは、消費分を創出分(発電、蓄電)で賄う正味のエネルギー収支ゼロを指す。

ゼロバランスを考える上で最初に取り組むべきことは、現状把握である。トイレには、図1に示すような様々な設備機器が設けられている。これらの設備は、トイレでの快適な運用を行う上で必要なものであると同時にエネルギー消費の影響要因でもある。



図1 トイレにおけるエネルギー消費部位

本研究では、最終的なゴールとして全てのエネルギーが賄えることを目指しているが、まずは、非常時に必要最低限のものが機能していればよいという思想のもと、目的にあわせ合理的に絞り込む必要がある。例えば、創エネ(未利用エネルギー回収も含む)では、ビル用太陽光発電(BIPV: Building Integrated Photovoltaics)¹⁾や太陽熱温水器などが想定されるが、これらの機器が、ファサードやエンベロープに設置されていないケースがほとんどであり、そのために、別

の創エネ設備が必要となることは容易に想像がつく。

そこで、著者らは、普段の水道圧を水力発電によってエネルギー変換する既往の技術(旧INAX、現LIXILが世界で初めて開発した)²⁾に着目した。水力発電機アクエナジーならば、未利用エネルギーを容易に回収でき、それを効率的に蓄え運用するシステムが構築できれば、身近な領域での自己完結が可能となり、建築内での親和性も高まると考えた。

一方、非常時における防災拠点建物などでの関心事は、基幹システム(情報通信機器など含む)を動かす電源にあり、照明は最低限の運用とされることが多い。そのため、非常時におけるトイレの視環境の悪化が懸念される。既報²⁾では、災害時に建物内トイレの衛生環境が極めて厳しい状況にあると報告されている。もちろん、非常時に衛生環境が悪化する要因は種々に考えられるが、被対象部の明るさ感不足は、衛生環境の安定性に影響を与える要因ではないかという仮説を立てた(洗浄水は、備蓄水の利用や外部からの手作業で供給されることで解決したという先の経験を踏まえた)。そこで、本研究では、防災拠点として機能性維持の一助となるであろう非常時におけるトイレでの衛生環境維持に必要な照明電源に着眼した。

ここで対象とする非常時とは、以下の状態を指す。

上下水道が使える状況(損傷が小)でありながら電源復旧の遅れや計画停電によりトイレの使用に支障をきたす状態。

自家発電設備は稼働しているが基幹電源だけに供給され、トイレの照明用電源にまでは供給されず、トイレの使用が困難となる状態。

どちらも上下水道に大規模損壊がなく、事業継続が可能でありながら、トイレ内の視環境として不便な状態を想定したものである。

以上より、既往の技術を拡張することで水道圧から発電した電力を蓄え、非常時72時間の照明電源や常時ゼロバランスに向けたシステムを構築するために実証研究を東北大学大学院工学研究棟で試みた。本報では、既報^{3)~5)}において現在実証しているゼロエネトイレの照明システムについて簡単に紹介する。

2. 実証サイト

実証サイトは、東日本大震災により被災した建物の復旧改築を行った東北大学工学研究科人間・環境系建物(2014年竣工)の5階男女トイレを対象とした(図2)。対象のトイレは、同フロアの研究室や教職員室の職員・学生および来客者などによる日常的な利用が行われ、一般的な文教施設における実測データを得ることができる環境にある。

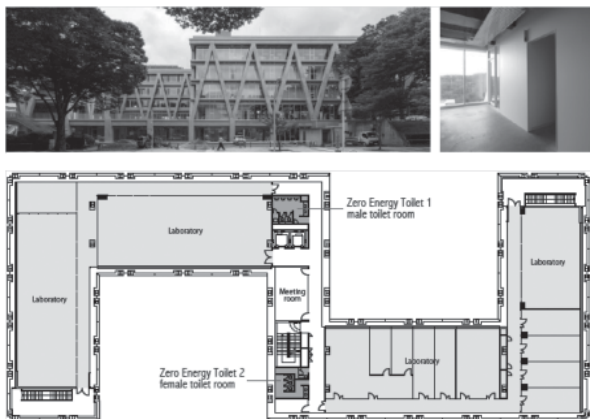


図2 実証サイト配置⁵⁾

男子トイレは、大便器2台、小便器4台、手洗器2台、LED照明7ヶ所および各便器の給水側に設置された水力発電機で構成(図3)され、手洗器は将来的な発電機増設に対処可能な仕様としている。また、平面計画上、男子トイレは無窓であるため、基本的には昼夜問わず照明点灯を要する環境にある。ただし、日中は全面開口となっている廊下からの間接光が男子トイレ内に到達し、小便器が設置されている部分でも僅かな明かりが得られている状況にある。

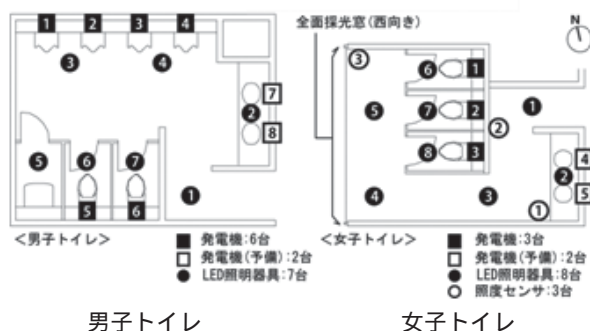


図3 男女トイレに設置された機器類⁵⁾

女子トイレは、大便器3台、手洗器2台、LED照明8カ所および各便器の給水側に設置された水力発電機で構成される(図3)。女子トイレの西側には、床から天井に至る全面がフロストガラスによる採光窓となっているため、昼光利用による効果検証を行う上で制御用照度センサを3カ所設置している。また、その照度センサは、ZETモード起動の閾値を決定する役割を果たす。

3. ゼロエネトイレ照明システム

本システムは、水力発電ユニット、発電した電力を蓄えて制御するバッテリー内蔵のZET基盤(制御基盤)および人感センサ付き暗所視モード(非常時および常時の節約:DC電源)と明所視モード(常時:AC電源)の切り替え可能なLED照明から構成される。LED照明機器は、低電力による暗所視モードと通常電力による明所視モードを一体化したハイブリッドシステムとしている。本システムの概略を図4に示す。

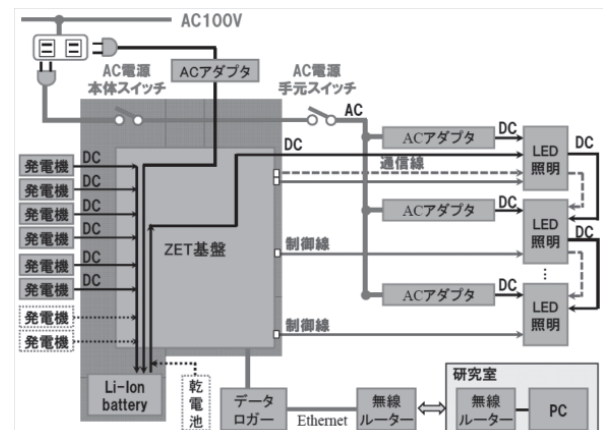


図4 ゼロエネトイレ照明システム概要⁴⁾

本システムのメカニズムは、小便器や大便器の給水管に設置された水力発電機によって、便器使用時と定期清掃時の流水により発電を行い、その電力をZET基盤に内蔵されているLi-Ion電池に蓄える。蓄えられた電力は、人感センサによって制御されるLED照明などの電源として活用する。また、発電や蓄電不足時には、乾電池により外部からの供給が可能となる回路設計としており、さらに常用としてはAC電源による急速充電機能を設けることでフェイルセーフとエネルギー削減にも貢献できる仕組みとしている。

4. 機器の開発

4.1 開発概要

本システムの実証にあたっては、既往の水力発電機の応用と制御基盤の高効率化に向けた見直しを実施した。また、LED照明は、必要波長領域における絶対視感度の向上により、明るさ感を損なうことなく消費電力を極限まで下げる目的で、LED素子のブレンドも含めた調整を行い、新たなLED照明を開発した。これらの内容について以下で詳述する。

4.2 水力発電機

水力発電機は、従来品の改良で発電量の向上に努めた。ただし、発電能力向上と圧力損失は相反関係にあり、適宜調整を要する。そこで、小便器用と大便器用

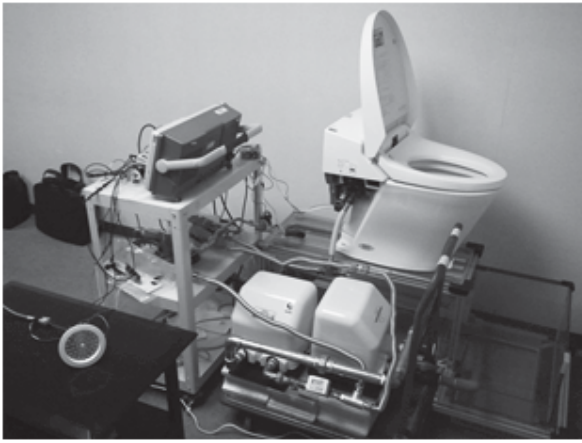


図5 疑似トイレによる基礎実験

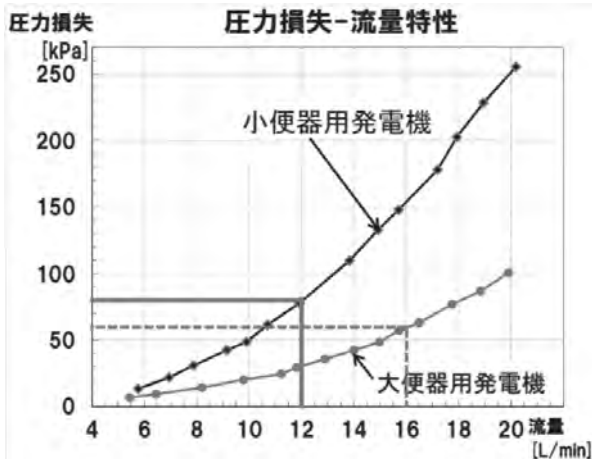


図6 圧力損失-流量特性曲線⁴⁾

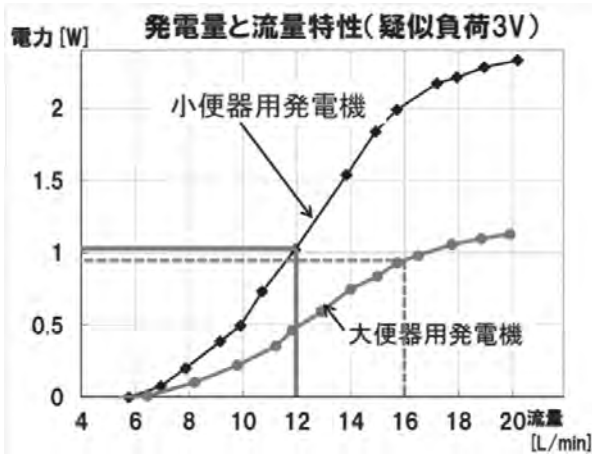


図7 電力量-流量特性曲線⁴⁾

表1 簡易実験測定結果一覧⁴⁾

種類	小便器		大便器		
	1台	4台	1台	2台	3台
測定項目					
差圧 Q (MPa)	0.079	-	0.059	-	-
電圧 E (V)	4.235	16.937	4.234	8.468	12.701
電流 I (A)	0.255	1.022	0.237	0.478	0.718
電力 P (W)	1.030	4.120	0.949	1.899	2.849

ユニットにおける圧力損失と流量特性ならびに疑似負荷電圧を3Vとした際の流量と発電特性を把握する目的で疑似トイレによる基礎実験を実施した(図5)。その結果等を図6、7および表1に示す。

図6中の縦軸は、発電機による圧力損失を示し、横軸は流量を示す。小便器、大便器の所定流量時における圧力損失値は0.070MPa(12L/min)、0.059MPa(16L/min)であった。今回設置した東北大学工学研究棟5階の当該給水圧力は、0.16MPa程度が見込まれるため発電機による圧力損失がこの値を下回り、かつ残余圧力と適正流量で排泄物を処理する必要がある。そこで、基礎実験結果を基に確認を実施した。男子大便器および女子トイレ便器は、発電機の圧力損失が0.059MPaであり、機器の損失0.070MPaを加えた後の残余圧力は0.031MPaとなる。また、男子トイレの小便器では、圧力損失が0.079MPaであり、これに機器の損失分0.050MPaを加えても0.16MPa以下となる。これらの結果を踏まえ、大学に設置した男女トイレの実機において、同時使用下でも円滑に流れることを確認した。

一方、発電能力は、図7に示す電力と流量特性の関係から小便器では1.030W(12L/min)、大便器では0.949W(16L/min)の発電能力が基礎実験結果から得られている。これを踏まえ、回路効率や充放電効率などを加味して全体のエネルギー収支を計画した。また、表1の網掛け部は基礎実験結果であり、それ以外は基礎実験結果を設置台数倍した数値である。

4.3 ZET基盤(制御基盤)

ZET基盤は、便器により発電した直流電流を一括して集め、内蔵された市販のLi-Ionバッテリー(3,400mA)に効率的に蓄電できるように回路上の工夫を施した。また、水力発電時以外は、マイコンの待機電流をスリープ運用とするなどして、従来品と比較して2倍以上の充放電回路効率を得た。

4.4 LED照明

一般的な照明システムは、消費電力を抑えればシステムとしてのエネルギー収支は向上するが、出力が小さいと十分な視環境は得られない。そこで、本研究では、極力消費電力を抑えながら使用に支障をきたさない明るさ感が確保できる方法を模索した。

明るさ感は、演色性や彩度などが有効と考えたが、あまり効果が無いことから、人間の目の特性に着眼する。人間の目は、明るさに応じて使われる視細胞(明所は錐体で色を判別でき、暗所は桿体で明るさを判別できる)が異なる。特に暗所におけるプルキンエ効果は、よく知られている。そこで、最小の消費エネルギーで明るさ感を得るためにプルキンエ効果を活用した新たなLEDを開発した。プルキンエ効果とは、明所視、薄

明視および暗所視と変化する際に視感度のピークが短波長側に移動する現象である(図8)。

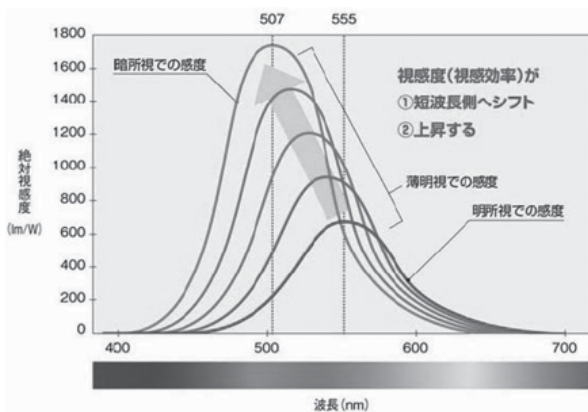


図8 プルキンエ効果イメージ(暗所、明所の視感度)⁶⁾

図中、明所の絶対視感度(1 m/W)ピークは555nmにあり、暗所では507nmがピークとなる。適用される視環境に応じてこれらのピークに近づけられれば、低消費電力でありながら明るさ感は維持されるはずである。このコンセプトに基づき開発したLED照明を図9に示す。

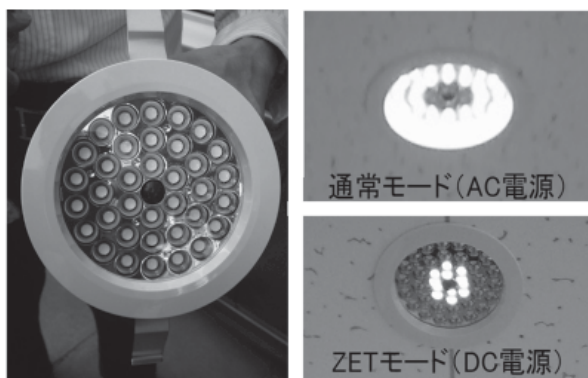


図9 LED照明

開発したLED照明は、中央に人感センサ、その外周部にプルキンエ効果を活用した暗所視用LEDを6素子配置し、さらにその外周にはAC電源用のLEDを30素子配置することで暗所視と明所視を使い分けられるハイブリッドな構成とした。暗所視における出力は0.15Wである。この開発したLED照明(紫色7,000K)と従来LEDとを比較すると、概ね全ての波長領域で従来品を上回っている(図10)。特に暗所視のピークである507nmでは、その差が顕著である。また、従来品と開発品のLED素子を同一条件で暗所視照度計による測定をした結果、従来品が7.2 lxに対し開発品は8.9 lxと20%性能が向上した。図11、12には男子トイレと女子トイレにおける点灯の比較を示す。従来型のLED照明が4~10W程度であるのに対して、1/30程度の消費電力でも図に示すくらいの明るさ感が得られており、使用感に全く支障がないことを確認している。

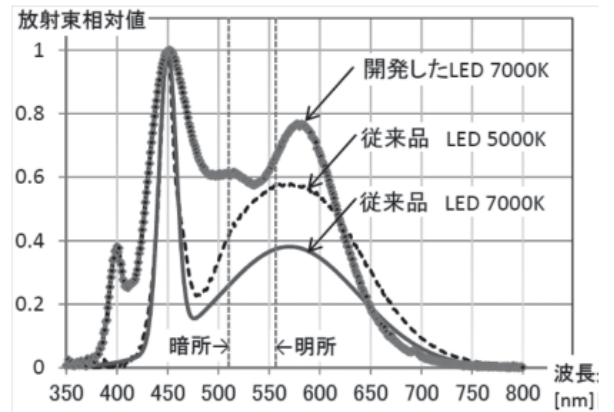


図10 放射束相対値(絶対視感度)⁴⁾



図11 男子トイレでの比較(夜間)



図12 女子トイレでの比較(夜間)

5. エネルギー収支予測

ここでは、本システムのエネルギー収支予測について概算的に定量化する。工学研究棟5階の機器数は、男64人、女21人を基に決定されている。その機器数に対し、自社で測定した男子トイレの平均使用頻度5.3回/人・日(日中の12時間)から、男子トイレの暗所視モード(常時の節約)における1日あたりのエネルギー収支を式(1)にて確認する。表2には実使用を想定した計算条件を示す。男子トイレは前述の通り無窓であり、昼夜を問わず暗い環境であるが、日中は男子トイレの入口から外光が得られる。そのため、実情は小便器使用に限定すれば日中に照明を使わなくても良い。そこで、本計算では日中における小便器近傍のLED照明による消費電力を除く形式で計算を試みた。

$$\sum P_b = P_b \times t \times N \times \eta_c \cong \sum P_c = P_L \times (\eta_b \times \eta_d)^{-1} \times \sum T + \sum S \dots (1)$$

Pb : 1日の総充電電力量(Wh)

- Pb : 取出し電力(W/台)
 t : 使用時間(h/台)
 N : 使用回数×台数
 c : コンバータ効率
 Pc : 1日の総消費電力量(Wh)
 PL : 発光電力(W/台)
 T : 夜間等全台数点灯予測時間(h・台)
 b : LED回路駆動効率
 S : センサ、基板などの1日の総待機電力量(Wh)
 d : 放電効率

表2 計算条件⁴⁾

小便器	使用頻度は5.3回/人・日、来客含む人員計画は64人の2割増 昼間人員は76人、夜間は来客なしで半数の32人、頻度は同上 洗浄時間は7秒(前洗浄2秒、後5秒)、保護洗浄2回/台・日
	点灯時間6秒で夜間のみ、歩行中の他照明点灯も含め36秒
大便器	計画人員64人が1回/日の使用とし、来客数も含め1.1倍とした 1回使用(13秒)につき2回洗浄(使用前と使用后)と仮定
	男子トイレは無窓で外光が得られず、ブースは昼夜問わず点 灯滞在時間は300秒/回(空調調和衛生工学会)

各項目の上段は発電に関する条件、下段は消費に関する条件

暗所視モードでの節約対応によるエネルギー収支予測は、 $P_b=1.484$ (Wh) $P_c=1.479$ (Wh)となり、発電量で消費量を賄える結果が得られた。しかしながら、災害時における収支を想定するには、利用状況が異なるため、非常時増分を考慮した運用制御等が必要となる。また、基礎実験で得た結果よりも実際に得られている発電量の方が大きな値を示しているため、さらに向上できると考える。

6. 結

本報では、ゼロエネトイレに向けたゼロエネトイレ照明システムの概要を報告した。また、本システムのエネルギー収支を概算的に定量化した結果、男子トイレでは、照明電力においてゼロバランスする可能性がある結果を得た。今後は、実証実験により運用ロジックの確立を目指し、安定的なシステムを構築したい。

謝辞

本研究にご協力頂いた熊谷力也氏、安尾貴司氏、松田宏氏、山崎晴生氏およびLED照明等の開発にご協力頂いた大平雅寛氏、今朋哉氏、児玉崇一氏ならびに関係諸兄に謝意を表す。

参考文献

- 1) 太陽エネルギーデザイン研究会：BIPVって何？太陽エネルギーを纏う建築、テツアド・出版、2015
- 2) 加藤他：震災時の避難所等のトイレ・衛生対策、保健医療科学Vol.59, No.2,2010
- 3) 石田壽一他：東北大学におけるゼロ・エネルギー・トイレ/ZET全体構成 について(その5)日本建築学会大会学術講演梗概集2015
- 4) 石井久史他：東北大学におけるゼロ・エネルギー・トイレ/ZET整備について、(その6)日本建築学会大会学術講演梗概集2015
- 5) 藤山真美子他：東北大学におけるゼロ・エネルギー・トイレ/ZET実証サイトの整備について、(その7)日本建築学会大会学術講演梗概集2015
- 6) パナソニック：設計資料/照明設計資料、波長制御技術