

博士論文概要

論文題目

自家消費を向上させるゼロ・エネルギーハウスの効率的設備運用に関する研究
Efficient Facility Operation Measures for Zero Energy House to Improve Self-consumption

申請者

金 延玟

Jung min KIM

建築学専攻 建築環境研究

2019年12月

日本の民生部門におけるエネルギー消費量は近年増加しており、省エネルギーや再生可能エネルギーの有効利用が進められている。2014年4月には「第4次エネルギー基本計画」が閣議決定され、「住宅については2020年までに標準的な新築住宅で、2030年までに新築住宅の平均でネット・ゼロ・エネルギー・ハウスの実現を目指す」という政策目標が設定された。また、2018年には「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定され、再生可能エネルギーの主力電源化が目標とされた。住宅部門ではゼロ・エネルギーハウス（Zero Energy House：以下 ZEH）を中心に太陽光パネルの導入が進んでいる。住宅における固定価格買取制度（Feed-in Tariff: 以下 FIT）が2019年11月から順次終了するため、自家消費を向上させる運用方法を検討することが必要とされている。また、太陽光パネルが大量に導入された際の余剰電力の系統への逆流が問題となっている。ダックカーブ問題は地域全体のエネルギー消費構造にも影響を及ぼす。そのため、デマンドレスポンス（Demand Response: 以下 DR）やバーチャルパワープラント（Virtual Power Plant: VPP）による制御により、グリッド全体での電力潮流量の調整やピークの平準化が求められている。本論文では、ZEHの自家消費を向上させるために効率的な設備運用の提案を行うことを目的としている。実験住宅にて太陽光発電電力の有効利用に関する実験を行うとともに、数値計算を用いてヒートポンプ給湯器（HP給湯器）の昼間運転やダブル発電の有効性に関する研究を行った。

本論文は6章で構成されており、各章の要旨は以下の通りである。

第1章では、本研究の目的を述べるとともに、研究背景及び既往研究について概観した。

第2章では、本研究で扱う対象住宅の概要について述べた。対象住宅はエネマネハウス2014の際に早稲田大学が計画・建設したZEHである。外断熱式を採用し、内装にALCを利用しているため、熱容量が比較的大きな、高断熱住宅である。導入設備としては、太陽光発電システム（Photovoltaic: 以下 PV）、蓄電池システム（Storage Battery: 以下 BT）、固体酸化物形燃料電池システム（Solid Oxide Fuel Cell: 以下 SOFC）、自然換気窓、断熱ブラインド、日射遮蔽ブラインド、高性能エアコン、ヒートポンプ式放射冷暖房（床冷暖房・ラジエーター）、HP給湯器、全熱交換器、有機LED照明がある。また、窓やブラインド等の建築設備とエアコン等の電気設備を連携制御するため、対象住宅では、ホーム・エネルギー・マネジメント・システム（Home Energy Management System: HEMS）を導入した。2018年度はECHONET Liteに対応したHP給湯器を新規に導入した。

第3章では、夏季と冬季の予冷熱運転がPV発電の自家消費率及び熱的快適性に与える影響の把握を目的として、熱容量が比較的大きく高断熱な対象住宅において空調運用条件の異なる11条件で物理環境・電力量・サーマルマネキンを用いた温冷感予測の実験を行った。また、発電量などの実験データを用いてHP給

湯器の昼間運転に関してシミュレーションを行い比較・分析を行った。温熱環境に関しては、予冷・予熱運転により、帰宅時と夜在宅時の予想平均温冷感申告（Predicted Mean Vote: 以下 PMV）が快適範囲内で安定した。また、空調方式で比較すると、放射冷暖房の方が予冷・予熱運転共に PMV が快適範囲内で安定した。さらに、3 時間稼働条件よりも 6 時間稼働条件の方が、蓄熱効果が長く持続し、非空調時間帯の快適性を向上できることがわかった。また、サーマルマネキンを用いた計測値により、放射による冷暖房は温度ムラが発生しにくいことを確認した。エネルギーについては、放射冷暖房を用いた予冷・予熱運転を行うことで夜在宅時及び、朝在宅時のエアコン PMV 制御による冷房・暖房の電力消費が削減できた。さらに、放射冷房より放射暖房の方が蓄熱効果が高く、在宅時間帯の電力消費がないことが確認できた。放射冷暖房による予冷熱運転によって、快適性を向上しながらエネルギーシフトを実現し、売買電力量の削減と自家消費率の向上を実現した。HP 給湯器の昼間運転によるエネルギー評価により、HP 給湯器を夜間運転から昼間運転へ切り替えることで PV 発電の自家消費率が向上することを確認した。予冷熱運転と併用することで冬季の放射 6 時間予熱運転条件では宅内で発電した電力を全て使うことができた。これらの結果より、熱容量が比較的大きな高断熱住宅における予冷・予熱運転は、快適性を向上しながら、売買電力量の削減と自家消費率の向上を実現できることを示した。季節によって異なる PV 発電を予測し、予冷・予熱運転や、HP 給湯器、蓄電池などを併用しながら調整することで、快適性の向上と、さらなる売買電力量の削減、自家消費率の向上を実現できる。

第 4 章では、住宅における調整力として夏季のエアコンによる予冷運用に着目した。夏季日中の DR を想定した予冷運用による電力需要のシフト効果と、予冷運用に合わせた居住者行動が予冷時や空調停止時における快適性や健康性に及ぼす影響の把握を目的に対象住宅で実験を行った。温熱環境評価に関しては、実験結果と数シミュレーションにより考察を行った。その結果、DR 終了時に PMV が 0.5 程度、WBGT（Wet Bulb Globe Temperature）も熱中症に警戒が必要な 25°C より低く、今回の条件では DR 時にエアコンを停止しても予冷運用によって快適性・健康性が維持できる可能性が示された。エアコンの電力消費量に関しては、25°C 一定で稼働した予冷なし条件に比べ、予冷条件は DR 時間帯にエアコンを停止したため約 400Wh 削減できたが、予冷時と DR 後のエアコン再稼働時に約 1200Wh 増加した。DR 時間帯に設定温度を 27°C に上げた予冷条件では、DR 時間帯の電力需要は微増したが、再稼働後の電力消費量を抑制できる可能性が示された。予冷運用の居住者行動に関する主観申告を用いた評価より、DR 時の温熱環境に対する快不快感申告は DR 適応を目指した居住者行動を行った条件の方が有意に快適側になることが示された。また、家事を予冷時間帯に合わせて行う

ことで DR 時に快適に過ごせるエアコン停止時間が 35 分延長した。予冷運用時の居住者行動に関する生理量を用いた評価より、LF/HF（ストレス指標）に関しては、室内温度が比較的高い 27°C であっても、家事を予冷時間帯に合わせて行う居住者行動の工夫がある場合は有意に数値が低く、工夫がない場合はストレスに注意が必要とされる 2 を超えた。予冷に合わせた居住者行動で室温上昇によるストレスが抑制される可能性が示された。予冷運用の導入の際にはエアコン設定温度を上げる手法などを用いることで、DR 時の需要量はやや増大するものの、熱中症リスクを回避できる可能性がある。

第 5 章では、PV と SOFC のダブル発電に与えるライフスタイルの影響を把握するために、PV・SOFC・BT などの家庭用分散型エネルギーシステムのシミュレーションモデルを作成した。ライフスタイルの違いがエネルギー消費量へ及ぼす影響やゼロ・エネルギー達成のための設備機器容量や発電方法に着目し、複数の生活パターンにおける設備導入効果及び経済性評価を行った。売買電力量に関して、シングル発電は 2 人世帯と 4 人世帯の両条件ともに PV 発電量の増加に伴い、売電量は増加し、買電量は減少した。自家消費率に関して、シングル発電とダブル発電ともに PV 容量の増加に伴い、自家消費率が低下する傾向がみられた。一方、ダブル発電の場合は PV と SOFC により発電をするため、シングル発電に比べ自家消費率が低い結果となった。一次エネルギー削減率に関して、平均一次エネルギー削減量はシングル発電で 17%、PV の余剰電力のみを売る条件のダブル発電で 37%、PV と SOFC の余剰電量を売る条件のダブル発電で 56%となった。ダブル発電の場合は PV と SOFC の余剰電量を売ることで、一次エネルギー削減率が平均 19%改善された。また、シングル発電とダブル発電ともに PV 容量の増加に伴い、ゼロ・エネルギー達成率は向上した。年間コストに関して、PV 発電の余剰電力のみを売る場合はシングル発電に比べ、ダブル発電の方が約 2.4 万円削減できた。また、PV と SOFC 発電の余剰電力を売る場合はシングル発電よりダブル発電の方が約 11.8 万円削減でき、シングル発電よりダブル発電の方が経済的に有利であることが確認できた。本研究では、BT の容量を 7.2kWh と固定し、さらに PV と SOFC の設備容量及び価格、系統との売電・買電価格などを限られた範囲でのみ検討したため、今後は他の BT 容量や SOFC の発電モードなどを考慮した設備の組み合わせによる評価を行う必要がある。

第 6 章では、各章の研究結果を総括した。

本論文では、住宅における予冷・予熱運転や HP 給湯器の昼間運転による太陽光発電電力の有効利用に関して評価した。さらに、電力需要のシフトや電力ピークの平準化を目指し、予冷運転と居住者行動による DR やライフスタイル別にダブル発電の有効性に関する評価を行い、ZEH における自家消費を向上させる効率的設備運用方法を提案した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 金 姫玖 印

(2020年 2月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文○	<p>秋元瑞穂、<u>金ジョンミン</u>、常岡優吾、大木玲奈、田辺新一、林泰弘、森戸直美、電気自動車の利用を考慮したゼロ・エネルギー住宅の自家消費運用手法の提案、日本建築学会環境系論文集、一般社団法人日本建築学会、Vol.85、No.770、2020.04</p> <p><u>金ジョンミン</u>、大木玲奈、常岡優吾、田辺新一、林泰弘、森戸直美、住宅における予冷運転によるデマンドレスポンスへの適応を目指した実証研究、本建築学会環境系論文集、一般社団法人日本建築学会、Vol.85、No.769、2020.03</p> <p><u>金ジョンミン</u>、徐天舒、常岡優吾、田辺新一、林泰弘、森戸直美、住宅における予冷予熱運転による太陽光発電電力の有効利用に関する実証研究、日本建築学会環境系論文集、一般社団法人日本建築学会、Vol.84、No.755、pp.73-81、2019.01</p>
論文 韓国語	<p><u>JungminKIM</u>, MyunghoKIM, A Study on the Correlation Analysis of EEG and Vibration due to Auditory and Olfactory Stimulation, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.16, No.6, pp.4291-4297, 2015</p> <p><u>JungminKIM</u>, KwangsooSEO, MyunghoKIM, A Study on the Multi-sensory Stimulation of Aroma and Color Temperature effects on Neuro-energy, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.16, No.5, pp.3579-3586, 2015</p> <p><u>JungminKIM</u>, MyunghoKIM, A Study on the Indoor Temperature effects on Neuro-energy, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.15, No.4, pp.2436-2442, 2014</p> <p><u>JungminKIM</u>, MyunghoKIM, Sound Service Modeling for the Improvement of Amenity in Disamenity Environmental Space, The Transactions of the Korea Institute of Electrical Engineers, Vol.62P, No.2, pp.103-109, 2013</p> <p>MyunghoKIM, <u>JungminKIM</u>, A Study on the Variation of Physiology Signals based on EEG with Humidity, The Transactions of the Korea Institute of Electrical Engineers, Vol.62P, No.1, pp.50-55, 2013</p>
論文 SCOPUS	<p><u>JungminKIM</u>, MyunghoKIM, Development of the Multi-sensory Augmented DDC (Direct Digital Control) to Improve the Cognitive Characteristic of the Nursery Facilities, International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562, Vol.11, No.2, pp.1243-1246, 2016</p> <p>DongsikKANG, <u>JungminKIM</u>, MyunghoKIM, A Study about Multi-sensory Stimulation of Fluctuation and Color Temperature effects on Neuro-energy, International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562, Vol.11, No.2, pp.1247-1250, 2016</p> <p><u>JungminKIM</u>, MyunghoKIM, Construction of the Multi-sensory Service Space to Increase the Neuro-energy, International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4562, Vol.10, No.11, pp.27569-27574, 2015</p>
講演 国際学会	<p><u>Jungmin KIM</u>, Tianshu Xu, Yuka Maruyama, Yugo Tsuneoka, Shingo Yamaguchi, Shin-ichi Tanabe, Yasuhiro Hayashi, Naomi Morito, Verification of thermal comfort and PV generation self-consumption operation effect under precooling operation, Indoor Air 2018</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 国際学会	<p>Jungmin KIM, Ayane Shibutani, Yuka Maruyama, Tianshu Xu, Yugo Tsuneoka, Junta Fujisawa, Maho Ichikawa, Naomi Morito, Shin-ichi Tanabe, Verification of thermal comfort and self-consumption operation effect under preheating operation, Healthy Buildings 2017 Asia</p> <p>JungminKIM, MyunghoKIM, A Study about Multi-sensory Stimulation effects on Cognitive Characteristic of the Nursery Facilities, Advanced science and technology, 2016</p> <p>DongsikKANG, JungminKIM, JongminKIM, MyunghoKIM, A Study about Multi-sensory Stimulation of Fluctuation and Color Temperature effects on Amenity and Physical Stability, Advanced science and technology, 2016</p> <p>JungminKIM, MyunghoKIM, Design of the Multi-sensory Stimulation Space to improve the Neuro-energy, International conference on advanced science and technology, 2015</p>
講演 国内学会	<p>森戸直美、金ジョンミン、大木玲奈、菅野颯馬、秋元瑞穂、田辺新一、林泰弘、デマンドレスポンス適用を目指した予冷運用および居住者行動の効果検証（その1） 温熱環境および電力需要の評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.301-304、2019</p> <p>大木玲奈、金ジョンミン、菅野颯馬、秋元瑞穂、田辺新一、林泰弘、森戸直美、デマンドレスポンス適用を目指した予冷運用および居住者行動の効果検証（その2）居住者行動の違いによる快適性・健康性評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.305-308、2019</p> <p>森戸直美、金ジョンミン、常岡優吾、大木玲奈、菅野颯馬、秋元瑞穂、田辺新一、林泰弘、デマンドレスポンス適用を目指した予冷運用に関する研究（その1）温熱環境及び電力需要の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.621-622、2019</p> <p>大木玲奈、金ジョンミン、常岡優吾、菅野颯馬、秋元瑞穂、田辺新一、林泰弘、森戸直美、デマンドレスポンス適用を目指した予冷運用に関する研究（その2）居住者行動が快適性へ及ぼす影響についての被験者実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.623-624、2019</p> <p>金ジョンミン、大木玲奈、常岡優吾、菅野颯馬、秋元瑞穂、田辺新一、林泰弘、森戸直美、デマンドレスポンス適用を目指した予冷運用に関する研究（その3）居住者行動の違いによる快適性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.625-626、2019</p> <p>常岡優吾、金ジョンミン、山口真吾、田辺新一、林泰弘、住宅における暖房の予熱運用を用いた太陽光発電の自家消費効果に関する研究（その1）サーマルマネキンを用いた温熱環境評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.109-112、2018</p> <p>金ジョンミン、常岡優吾、山口真吾、田辺新一、林泰弘、住宅における暖房の予熱運用を用いた太陽光発電の自家消費効果に関する研究（その2）太陽光発電の自家消費運用に関するエネルギー評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.113-116、2018</p> <p>森戸直美、金ジョンミン、徐天舒、丸山由香、常岡優吾、山口真吾、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究（その8）予冷運転による快適性及び自家消費運用効果の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.557-558、2018</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 国内学会	<p><u>金ジョンミン</u>、徐天舒、丸山由香、常岡優吾、山口真吾、田辺新一、森戸直美、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究（その9）空調方式による予熱運転の快適性及びPV自家消費運用効果の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.559-560、2018</p> <p><u>金ジョンミン</u>、丸山由香、徐天舒、常岡優吾、森戸直美、田辺新一、温熱快適性に配慮した太陽光発電の自家消費に関する研究、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.289-292、2017</p> <p><u>金ジョンミン</u>、渋谷彩音、丸山由香、徐天舒、常岡優吾、藤澤順太、市川真帆、森戸直美、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究（その7）予熱運転による快適性及び自家消費運用効果の検証、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.551-552、2017</p>
講演 国内学会 韓国語	<p><u>JungminKIM</u>, DongsikKANG, MyunghoKIM, A Study on the Auditory Stimulus of Educational Facilities Effects on Characteristic of Sense, Recognition, and Behavior, Korean society for emotion and sensibility, Academic conference, pp.238-241, 2015</p> <p><u>JungminKIM</u>, YoungjoYOO, MyunghoKIM, JongminKIM, A Study on Analysis of Human's Neuro-energy due to the Indoor Temperature Variation, Journal of the korea academia-industrial cooperation society, Academic conference, pp.238-241, 2014</p> <p>YoungjoYOO, <u>JungminKIM</u>, MyunghoKIM, JongminKIM, A Study on efficiency improvement of productivity using the 'a' index of sound source, Journal of the korea academia-industrial cooperation society, Academic conference, pp.337-339, 2014</p> <p><u>JungminKIM</u>, JongminKIM, YoungjoYOO, MyunghoKIM, Multi-sensory Stimulation Modeling for Energy Saving, The society of air-conditioning and refrigerating engineers of korea, Academic conference, pp.251-254, 2013</p>
その他 セミナー	<p><u>金ジョンミン</u>、大木玲奈、田辺新一、次世代住宅 / 床暖房 / ZEH」、ACROSS ハイレベルセミナー2 ポスターセッション、早稲田大学日早稲田キャンパス 63号館 2階 03-05室、2019.10.15</p>
ワークシ ョップ	<p><u>Jungmin Kim</u>, Reina Oki, Shin-ichi Tanabe, Thermal comfort and health evaluation of pre-cooling operation in house, 2019 JST-NSF-RCN Workshop on Distributed Energy Management Systems, Bellesalle Roppongi, Tokyo, Japan, 2019.6.20-21</p>