

AHSES (Adjusting to Human Smart Energy System) の開発 その1 開発概要と実証試験

森 一顕^{*1}・宮川忠明^{*1}・村石辰徳^{*1}・岩本吉隆^{*1}

スマート化技術に注目が集まるなか、建物へのエネルギー供給を効率的に行い省エネルギー、ZEB化を推進するスマートエネルギーシステムとして「AHSES」の開発に取り組んだ。本報ではその概要および実証試験結果の一部について報告した。実証試験は、安藤ハザマ技術研究所本館に太陽光発電設備、蓄電池を設置し実施した。電力需要量と太陽光発電量を予測した上でピークカットを最適に実施する目的に対し、設置機器能力を十分活かした上で、概ね想定どおり17%のピークカット効果が得られた。一方需要予測や太陽光発電量予測の精度や、予測精度が得られない際に備えた冗長性の確保などの課題が明らかとなった。

キーワード：AHSES、電力需要予測、太陽光発電量予測、最適化

1. はじめに

情報通信技術、センシング技術、情報処理技術の高度化により、様々な社会課題を解決する「スマート化技術」への期待が高まりつつある。自動車の自動運転技術などはその一例であり一部実用化されている。建築における課題の一つとしてZEB¹⁾(Zero Energy Building)化が挙げられる。この実現にあたっては、建物自体の省エネルギー化、設備機器の省エネルギー化、再生可能エネルギーの最大活用とあわせ、設備機器の高効率運用が必要となる。

機器類の高効率運用にあたっては、時々刻々の再生可能エネルギー量や建物のエネルギー需要量を事前に予測し、最適な運用計画を立案する仕掛け、つまりスマートなエネルギーマネジメントシステムが不可欠である。

以上の課題に鑑み、機械学習手法等のAI(人工知能)、クラウドサービスに代表される外部サーバーによる制御などを見据えた次世代型エネルギーマネジメントシステム「AHSES(アーセス)」の開発に取り組んでいる。本報では、現在までに実施した太陽光発電設備と蓄電池との組み合わせにおける最適制御に関する実証試験の結果を報告する。

2. AHSESの構成および特長

AHSESは現状、建物にて利用するエネルギーの中でもまずは「電力」に特化し、その供給を最適化するシステムとして構築している。図-1に構成概要を示す。①再生可能エネルギー等の創エネルギーデバイス、②蓄電池等の蓄エネルギーデバイス、③インバーター・コンバータをはじ

めとするエネルギー変換デバイス、④実際に機器への指令を担う制御プログラム・デバイス、⑤これらの動作を最適化する運転計画プログラムらによって構成される。運転計画プログラム部分については、更に2つの部位にて構成される。再生可能エネルギー供給量および建物のエネルギー需要量の予測を行う部分と、それら予測に基づき、目的とする変数(たとえばランニングコスト)が最小となる運転計画を立てる部分とである。

現状、AHSESでは創エネルギーデバイスとして太陽光発電装置を、蓄エネルギーデバイスとして蓄電池を対象としている。

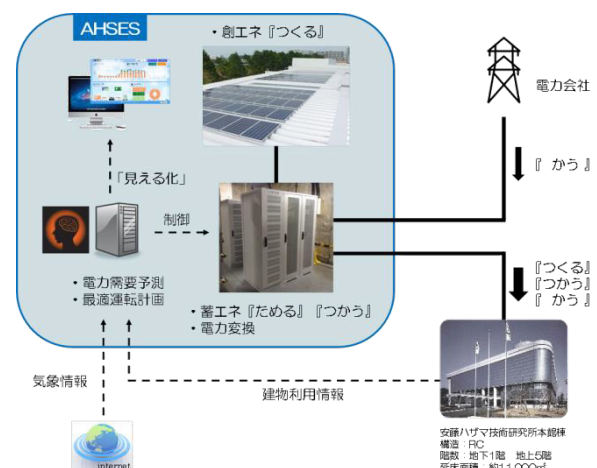


図-1 機器構成概要

3. 需要予測手法と最適化手法

本章では、本システムの根幹である需要予測と最適運転計画の手法について述べる。需要予測手法については、現状実装し制御に供する手法と並行し、幾つかの手法を

*1 先端・環境研究部

実際の予測に供し、その精度や計算負荷等について比較検討しており、それらについて概要を説明する。また最適化手法については実装している線形計画法について概説する。

3.1 需要予測手法

3.1.1. 時間大別平均手法

現在もっとも普及しているといわれる手法である。一般には式(1)にて表現できる。

$$y_{day}^{time} = (\sum_{n=1}^N y_{day-n}^{time}) / N \quad (1)$$

ここで、

y_{day}^{time} : 有る時限における需要量予測

N : 逆り日数

簡便で明快であり、計算負荷も小さい点で優れる。一方当該式を単純に適用すると、たとえば休平日の別などが反映されず、全体的に鈍った予測となる場合が多いといわれる。そのため適宜これらを分けて予測するなど、多少の改良をして利用されることもある。

3.1.2. 自己回帰手法

自己回帰モデルは、一般に(2)式となる。

$$y_t = a_1 y_{t-1} + \dots + a_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (2)$$

ここで

y_t : 時刻 t までの時系列需要

a : AR 係数

ε_t : 白色雑音

類似する検討法である多変量自己回帰モデルでは、外気温湿度や在籍者数など、需要実績以外の説明変数を利用し、同様式にて需要を導出する手法もある。利用する説明変数については、経験則により事前に定める。

自己回帰モデルでは一意にパラメーターを定める手法と、実績蓄積に応じて適時パラメーターを変更する手法とがある。現状 AHSES に実装するのは、後者に類する手法であるが詳細は割愛する。

3.1.3. ディープラーニング手法

ここまで述べた手法は、いずれも経験則等により予め計算モデルを定めて予測を行うため、想定確かさ、例外的状況の有無により大きな誤差を生じることがあると

言われる。これに対し、予め因果の有無を想定せず計測された値を入力し、予測値との誤差が最小となるパラメーターを自動的に学習する手法として、ディープラーニングと呼ばれる手法がある。センサーの低廉化や IOT (Internet Of Things) の進展により、今後データ取得が容易となると考えられる。想定外に消費電力との因果を持つ情報がある場合には、当該手法の優位性が高い。現状当該手法についても構築し実証中である。過去電力需要実績と外気温湿度等の気象情報のみを入力情報として与えたケースにおいても、他のケースより高い精度が得られている。今後更に検証を進めていく予定である。

3.2 最適化手法

需要予測により想定される負荷に対して、ある変数を最小化・最大化する手法、つまり最適化手法は様々な手法が提案されている。ここではそのうち主たる2種の方法について概説する。ケーススタディーによる方法と数理モデルによる方法とである。

ケーススタディーによる方法では、予め機器の運転方法を複数想定し、一般的なシステムシミュレーションツールによる順的な解析により、各々の運転方法における目的変数を導出する。これらを比較し目的変数が最適(最大若しくは最小)となる運転方法を選択するといった手法である。消費電力やランニングコストを目的関数とする場合には、計算ツールが一般普及していることから、ケーススタディー実施も比較的容易に実施可能である。但し非連続的な検討に限られる点が課題である。

AHSES に実装している、数理モデルを用いる方法について概説する。機器の動作特性や各種制約条件を等式・不等式の形で表現し、これら条件を満たす変数の組み合わせのうち目的変数を最適化する組み合わせを探索する手法である。もっとも簡便な手法である線形計画法については以下式(3)(4)のように表現できる。(3)が目的関数、(4)が制約条件をそれぞれ示している。

$$f(x) = c_1 x_1 + \dots + c_n x_n + \dots + c_{n+m} x_{n+m} \rightarrow \text{MAX} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{11}x_{11} + \dots + a_{1n}x_n + x_{n+1} &= b_1 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n + x_{n+m} &= b_m \\ x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+m} &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、

x : スラック変数

たとえば電力コストを目的関数とする場合、まずはシステム全体における各ポイントの電力移動量をスラック変数と定める。電力料金体系や蓄電池の能力等を制約条件として(4)式のように記述して目的関数を満たす電力移動量を導出する、といった手続きとなる。

数理モデルを用いる方法では、計算負荷が小さく、連続的な問題に対しても解を得られる点で優れる。非線形性が強い制約条件の再現や、機器発停など不連続な問題を扱うにあたっては、非線形数理モデルや整数混合線形数理モデル等の手法もある。汎用プログラム等が整備されているが、建築にかかる設備機器のモデル等について整備が不十分である点が課題となる。

4. AHSES の実証概要

最適制御の実現性と効果を確認するため、実建物に適用し試験を行っている。表-1に建物概要を写真-1に建物外観を示す。当該建物は1992年に竣工し主に事務用途で利用される。付随設備として会議室、応接室、講堂、食堂等の施設を有する。設備機器の特徴としては中央熱源方式が採用され、地下に蓄熱槽を有する。各階に2箇所機械室を有しエアハンドリングユニットにより各室に空調空気が搬送される。ペリメーターについてはファンコイルユニットにより処理されている。照明については蛍光灯による一般照明であるが、一部間引きされ、机上面照度は300lx程度となっている。

本実証では、まずは電力コストの最小化を目的関数と定め、いわゆるピークカット・ピークシフトを実施することとした。その狙いを図-2, 3に示す。一般的なピークカット手法として、ピークカット時間帯を予め想定し、蓄電池容量を按分して各時刻一律に放電させることが想定される。その場合、ピーク時刻以外にも蓄電池より放電がなされるため、その有効性が低くピークカット量が小さい。一方予め電力需要および太陽光発電量を予測するAHSESを適用すれば、電力需要量に応じて蓄電池出力量を制御可能になるため、ピークカット可能量は増加する。当初想定においては、後述する機器能力において1.5倍程度ピークカット量が増加することが見込まれた。なお、既述のとおり当該建物には蓄熱槽が設置されており、実態では既にピークシフトがなされている。以降示される結果は、本試験の目的に鑑み、熱源の電力を除いた電力量を対象としている点に注意されたい。

当該建物に適用した、現状のAHSESの構成について、図-4に示す。以下の機器能力については、これまでの需要実績を元に、ピークカット15%を目標としている。再生可能エネルギーとして太陽光発電設備を設置した。ただ

し当該建物屋上メンテナンス等の状況から、実際には、模擬的に別棟屋上設置となっている。状況を写真-2に示す。蓄電池および電力変換装置(インバーター・コンバーター類)については本館棟地下機械室に写真-3, 4の通り設置した。蓄電池および電力変換装置はラック9台に格納されている。なお、電力変換装置については、太陽光発電設備、蓄電池、系統連系インバーター間を高圧の直流電流にて連系している。太陽光発電電力を交流変換し再度直流変換してバッテリーに蓄電する場合と比較し変換ロスが少ない点や各々の電位を設定することで、入出力電力量を容易に制御可能な点に鑑みて採用している。また建物内の需要の多くが最終的に直流電流を利用している点(インバーター制御をされる交流機器類も周波数変換の際に一度直流電流としている点では同類と言える)から、今後建物への電力供給の一部に直流電源を利用する可能性も大きいと考えている。将来的なそれらの実証への適用可能性も本実証で採用の一因である。

需要予測・最適化手法については3.にて示した手法を適用し、需要予測については48時間先までの予測を30分ごとに実施し、その需要に対する最適運転計画についても30分ごとに立案している。

なお、当該システムは非常時の電源設備として特定負荷への電力供給も可能なシステムであるが、本旨より逸れるため詳述は避ける。

表-1 建物概要

名称	安藤ハザマ技術研究所 本館
階数	地下1階, 地上5階(塔屋含)
構造	RC造
延べ床面積	約11,000㎡



写真-1 対象建物

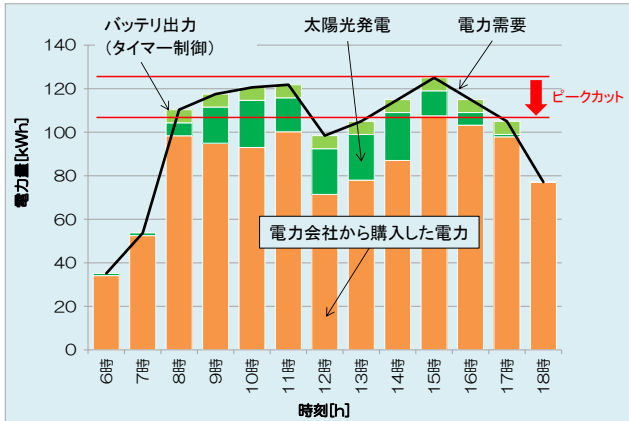


図-2 ピークカット制御例 (一般)

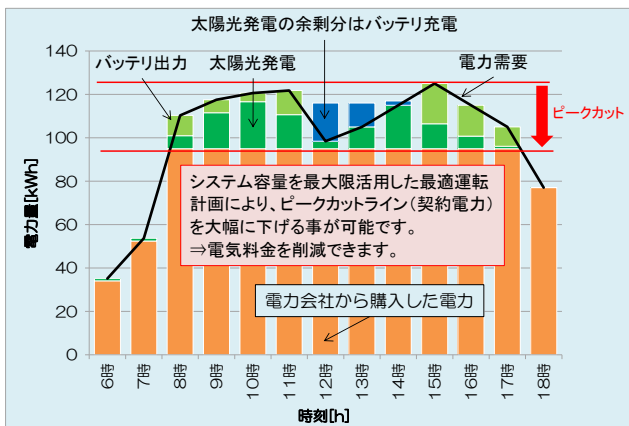


図-3 ピークカット例 (AHSES 適用)

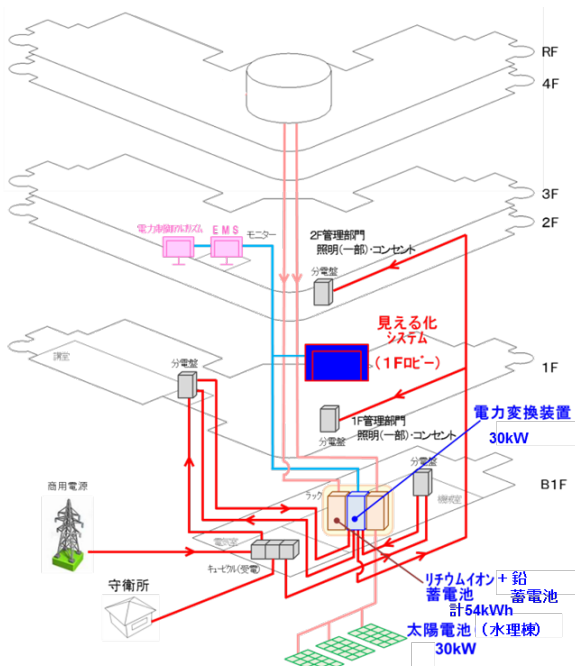


図-4 AHSES 構成概要

表-2 太陽光発電装置概要

種別	多結晶シリコン
寸法	W992×H1650×D40 (mm) ×140 枚
実行変換効率	15.5%

表-3 蓄電池概要

種別	設置容量
リチウムイオン蓄電池	44kWh
鉛蓄電池	10kWh

表-4 電力変換装置

設置容量	10kW × 3 システム
------	---------------



写真-2 太陽光発電設備設置状況



写真-3 蓄電池・電力変換装置設置状況



写真-4 蓄電池・電力変換装置設置状況

5. AHSES 実証結果

実証結果として2016年9月2日の例を示す。図-5に需要予測と実績の比較を示す。夜間から朝8:00までの予測と実績との誤差は比較的小さく、8:00以降16:00までは、昼休み時間帯を除きやや実績が大きく、以降では予測が大きい。全般的には良好な予測が行われている。ピークは9:00に生じており、124.9kWであった。

図-6に太陽光発電量の予測と実績を示す。当該地域の気象予報のうちの水平面日射量を外部より取得し、太陽光発電設備の設置角度、および発電効率等から算出している。朝夕にやや誤差が大きい結果となっている。外部情報として得られる日射量予測の精度、周辺樹木や建物による陰の発生状況などの予測への反映如何が原因と考えられる。特に後者について、樹木の成長や周辺建物状況の変化に対応可能な様に今後改変を行う予定である。図-7に買電電力量の経時変化を、図-8に蓄電池残量の経時変化をそれぞれ示す。ピークカットを目的とした場合には、買電電力量がピーク時間帯に一樣になり、且つピーク時間帯終了時に蓄電池残量が下限となること、最適制御が成されたこととなる。買電電力量は、8:00から16:00の時間帯において、100kW程度にて推移しており、計画値と実績値はほぼ一致している。但し15:00より実績がやや上昇し、ここでピーク電力103.9kWを記録した。前述の電力需要について実績が予測を上回り、想定より早く蓄電池が放電してしまったことが一因と考えられる。以上結果より、電力需要最大値124.9kWに対し、買電電力量最大値103.9kWとなり、17%のピークカットが確認できた。一方、予測精度の更なる向上や、予測精度が得られなかった際、かえって結果が悪くなる可能性などの課題が明らかとなった。改善を図りつつ実証を継続している。

本実証試験はAHSESの有効性・可能性の検証の観点で進めている。現状の実態電力料金体系においては、年間の最大受電電力量にて基本料金が定まる。そのため本来は年に何度かのピークカット動作の実施で十分である。現状の需要予測は48時間先までとしており、年間を通じての電力予測を行わずに毎日ピークカットを行うシステムである。これでは充放電回数に依存するバッテリー寿命を無駄に消費することにもなりライフサイクルコストの面で疑問が残る。この点は今後の大きな課題として認識している。また、ダイナミックプライシングなどへの対応も可能なようシステム・プログラムを構築しているが、この実証も今後予定している。

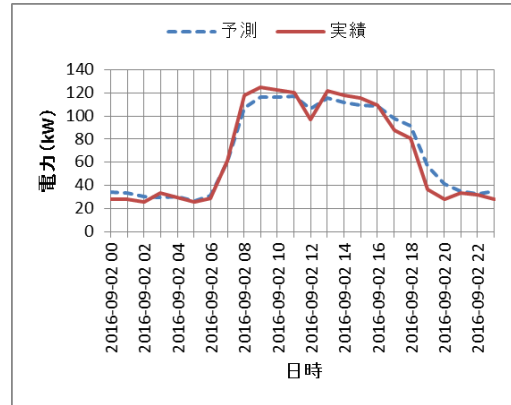


図-5 電力需要の予測と実績

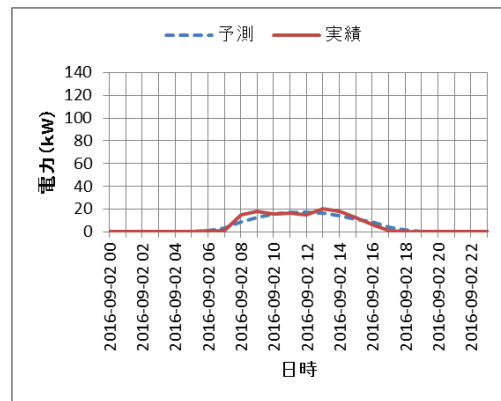


図-6 太陽光発電の予測と実績

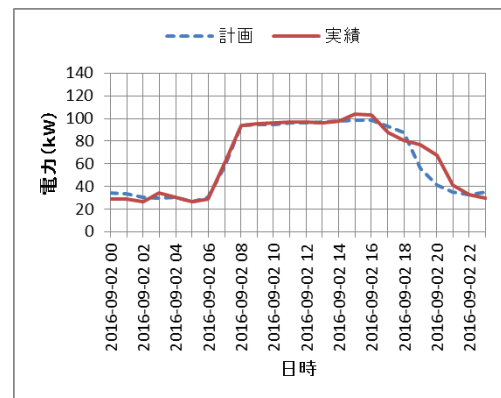


図-7 買電電力量の計画と実績

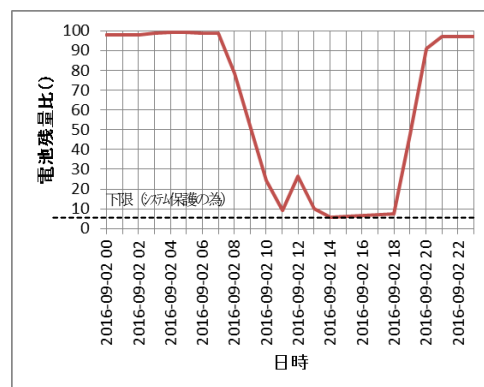


図-8 電池残量比実績

6. 今後の展望

1. にて述べたとおり、AHSES はエネルギー運用を最適化するスマートなエネルギーシステムとして 2013 年より開発に着手している。現状では電力運用の最適化を目的としているが、最適計画技術については、目的変数の設定如何によって、さまざまに拡張可能なものである。今後の社会状況に鑑み、数年間で「規模」「対象」の拡張の可能性を見据え開発に取り組んでいる。ここではその一端を紹介する。適用範囲の拡張に関するイメージを図-9 に示す。現状 AHSES は建築の ZEB 化, 更には系統電力から独立して動作する「オフグリッド」を実現するためのエネルギーシステムを目指し、建物単体向けのシステムとして構築している。一方で創エネルギーを蓄え利用しようとするれば、蓄電池等の容量が膨大となることが容易に想像される。そういった課題に対応すべく、エネルギーの面的利用が注目されつつある。エネルギー需要のピーク時間帯の異なる建物間で、熱を含めエネルギーを融通することで、機器の効率的な運用や、過剰な蓄エネルギー設備の導入を回避出来る。電力自由化、コンパクトシティ・スマートシティといった都市再編の動きに鑑みれば、こういった面的エネルギー融通も画餅では無いと考えられる。そうした観点から、AHSES についても熱・電気を建物間で融通しあうシステム、さらには街区等へ適用可能なシステムへの拡張を見込んでいる。

本来、建物内のエネルギー運用を最適化することを考えると、供給側のみでなく需要側も制御することが望ましい。この場合には、エネルギー消費量を最小化するという目的設定だけでなく、利用者の快適性も含む指標を目的関数として定めることが重要と考える。現状 AHSES の「E」は Energy をあらわすが、今後 Environment に拡張することを考えている。

7. おわりに

建物へのエネルギー供給を最適制御することを目的と

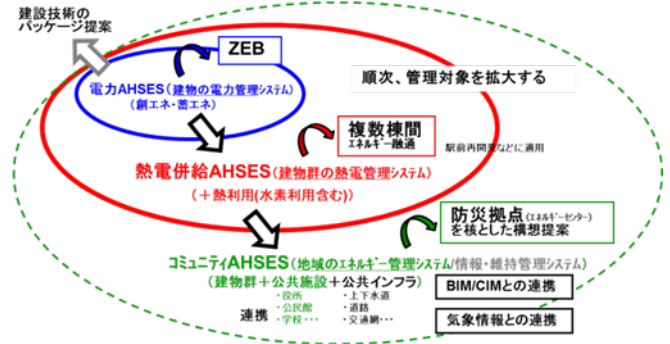


図-9 AHSES の適用範囲拡張のイメージ

して開発した AHSES について、その概要および実証試験結果を示した。安藤ハザマ技術研究所本館にて実施している実証試験において 17% のピークカットが実現され、想定以上の性能が得られたことが確認された。現状、国内の電力システムの動向が不透明な中ではあるが、再生可能エネルギーを含む電力調達を最適に実現する当該システムは大きな可能性を含むものと考え、今後も実証を進めていく。

謝辞：当該研究開発にあたり、株式会社 Mirror Life、株式会社サイテック・ジャパン、株式会社アバール長崎、株式会社ファーストリリーには多大なる協力を頂きました。また、社内関係各所にも多大なるご支援を頂きました。記して謝意を評します。また、本研究は 2016 年 5 月に急逝された竹内仁氏、2015 年 11 月に急逝された斉藤栄一氏によるところが非常に大きいものでありました。文末ではありますが、記して謝意を表すると共に、謹んで哀悼の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課：ZEB ロードマップ検討委員会 とりまとめ、2016 年 12 月
- 2) 木下栄蔵ら：ビル空調のエネルギー・環境・設備のための統計解析、2006 年 4 月

Development of AHSES (Adjusting to Human Smart Energy System) Part 1. Outline of AHSES and Demonstration

Kazuaki MORI, Tadaaki MIYAGAWA, Tatsunori MURAIISHI and Yoshitaka IWAMOTO

This paper describes the development of AHSES. This system aims for the smart use of energy. We applied this system to the main building of Hazama Ando Corporation Technical Research Institute. By using solar photovoltaics, and predicting electricity demand and optimum operation of batteries, we succeeded in leveling of the electric power of the 17%. We will continue to improve this system, and aim to apply this system to ZEB and smart cities.