

海外の環境配慮型建築

EHS&S 研究センター長 大島 一夫
EHS&S 研究センター研究主任 兼 環境技術部主任 海藤 俊介

Keyword : ZEB, CASBEE, 再生可能エネルギー, 省資源, 制御

1. はじめに

地球環境問題への対応、エネルギー安全保障の観点等から、各国でエネルギー消費抑制、再生可能エネルギー利用への取り組みが行われている。住宅・非住宅建築物に関しても、エネルギー消費を抑制する法規制が実施され、環境配慮建築物の認証を受けた建物、ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の実施例も増加している。本稿では世界の業務他部門のエネルギー消費動向、海外の環境配慮型建築の例を紹介する。

2. 業務他部門のエネルギー消費動向

2016年の世界の最終消費エネルギー消費量は40万PJ（ペタジュール、 10^{15} J）で、20年間に44%増加し（図1）、今後も開発途上国の経済成長等に伴ってエネルギー消費量が増加していく見通しである。

この中で、オフィス等の非住宅建築物が分類される業務他部門（非住宅建築物）のエネルギー消費量は、8%を占めている。

各国の業務他部門の最終エネルギー消費量を図2に示す。2016年の日本の最終エネルギー消費量は2,200PJで、20年間で25%増加しており、建築物の省エネルギーが求められている。中国では2.5倍、インドでは2.3倍になっており、これらの国々での省エネルギーが重要になっている。また米国の伸びは16%であるが、増加量は1,200PJであり、その影響は大きい。

業務他部門では最終エネルギー消費量に占める電気エネルギーの割合が

増えており（図3）、電気エネルギーを使用する設備・機器の高効率化が求められている。

3. 環境配慮型建築の技術・課題

表1に示す海外の環境配慮型建築例9ビル^{1~7)}に用いられている技術およびそこで発生している課題等について、CASBEE-建築（新築）の採点基準の項目を参考

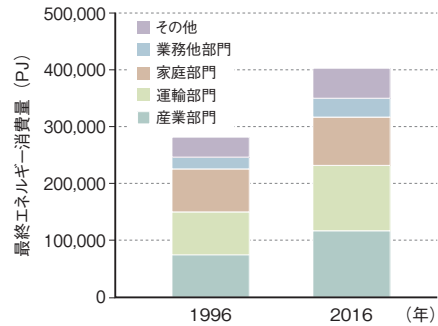


図1 世界の最終エネルギー消費量
IEA資料を基に作成

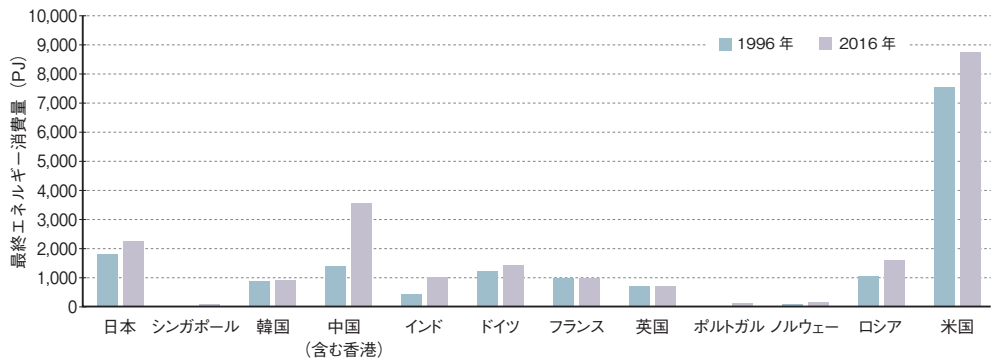


図2 各国の業務他部門の最終エネルギー消費量
IEA資料を基に作成

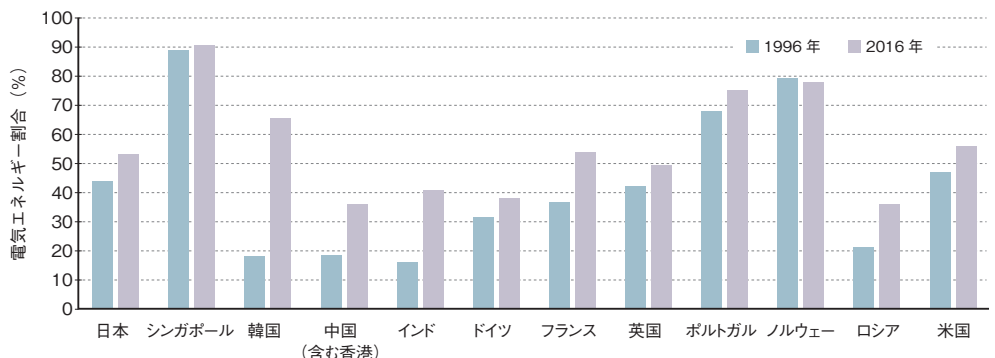


図3 各国の業務他部門の電気エネルギー割合
IEA資料を基に作成

表1 海外の環境配慮型建築例

建物名 (略称)	Research Support Facility (RSF)	David & Lucile Packard Foundation Headquarters (DLP)	Rocky Mountain Institute Innovation Center (RMI)	435 Indio Way (IW)	Georgia Tech Engineered Biomass Building (GT)	Powerhouse Kjørbo (PHK)	SOLAR XXI (XXI)	Zero Energy Building (SI)	Elithis Tower (ET)
所在地	米国 コロラド州 ゴールデン	米国 カリフォルニア州 ロスアルトス	米国 コロラド州 ベソルト	米国 カリフォルニア州 サニーベール	米国 ジョージア州	ノルウェー サンドヴィカ	ポルトガル リスボン	シンガポール	フランス ディージョン
竣工年	2010年	2012年	2015年	1973年	2014年	1980年代	2006年	2009年	2009年
改修年	—	—	—	2013年	—	2014年	—	2018年	—
用途	事務所・ データセンター	事務所	事務所	事務所	研究施設	事務所	事務所	事務所・ 研修施設	事務所
延床面積 (m ²)	20,624	4,552	1,450	2,950	20,334	5,180	1,500	4,500	4,500
階数(階)	3~4	2	2	1	6	3~4	3	3	
認定評価	LEEDプラチナ	LEEDプラチナ nZEB	LEEDプラチナ nZEB		LEEDプラチナ	BREEAM-NOR outstanding		BCA Green Mark プラチナ	
エネルギー消費量 EUI (kWh/(m ² ・年))	104	77 (実測)	50	42.5 (実測)	569	19	43	41	96 (実測)
再生可能エネルギー量 RPI (kWh/(m ² ・年))	110	92 (実測)	54	90.5 (実測)	2.5	41	36(含む太陽熱)	45	40
余剰電力		逆潮流				近隣水素ステーションに供給			
太陽光発電容量 (kW)	1,600	285	83	113	43	211	30	171	PVパネル面積 500m ²
太陽熱利用	外壁に多孔金属パネルを設け外気の昇温に利用			0.17 (kWh/m ² /年)	太陽熱給湯システム		外壁に太陽熱集熱機能を兼ねたPVを設置CPC(複合パラボラ)型太陽熱集熱器16m ²		
地中熱利用						あり (ヒートポンプ熱源)	あり (外気昇温)		

EUI:Energy Use Intensity, RPI:Renewable Production Intensity

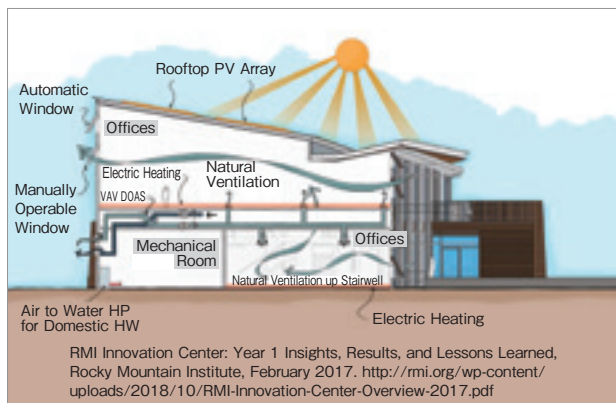


図4 Rocky Mountain Institute Innovation Centerの建物概念図

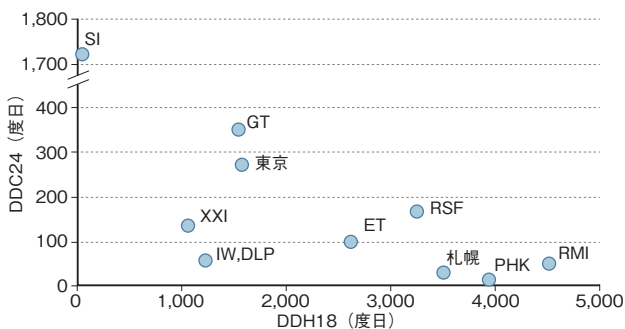


図5 建物の立地地域デグリーデー (2014~2018年)

にして分類した。各文章の末尾の()内は建物名の略称(略称は表1参照)を示す。これらの建物の多くは、BREEAM、LEEDの最高レベルの認証を受け、ZEBを達成し、環境に配慮した建物になっている。この中のRocky Mountain Institute Innovation Centerの建物概念図を図4に示す。また、これらの環境配慮型建築が立地する地域および東京、札幌の18℃基準の暖房デグリーデー(DDH18)と24℃基準の冷房デグリーデー(DDC24)を図5に示す。

3.1 室内環境

1) 音環境

オープンオフィスの採用により、電話、会話が気になるため、音環境の改善の検討が必要になっている(RMI)。従業員入口の利用頻度が想定より多く、隣接したワークステーションに音の問題が生じたため、ガラス製パーティションを設置している。また個室からオープンオフィスに移ったスタッフから、ワークステーション内の会話のプライバシーや騒音に関する苦情が出ている(DLP)。

2) 温熱環境

(1) 室温制御

冬期は予熱を行い、執務時間になると暖房を停止し、人体と機器からの発熱により室温を保つようにしている(DLP)。

空調・照明設備などのデフォルトモードは、停止またはセットバックした状態とし、自動的には起動しないようにしている。設備を稼働させたい場合は、執務者が起動させる必要がある。また、消し忘れた場合は自動的に停止または不在者モードにするようにしている（RSF）。

室温制御の不感帯を大きくして空調機の起動を抑え、省エネルギーを図っている（GT）。

外壁は、U値が0.11～0.45 (W/(m²・K)) と高断熱にしている。CASBEE-建築（新築）のレベル5（最高水準）で、U値は1 (W/(m²・K)) である。

窓には3層ガラス、2層ガラス+フィルムを採用している場合が多く、U値は0.8～1.1 (W/(m²・K)) である。これらの中には中空層に空気よりも熱伝導率の小さいアルゴンガスを充填したものもある。0℃、1気圧での熱伝導率は空気が0.0241(W/(m・K))、アルゴンが0.0164(W/(m・K)) で、アルゴンは空気の68%になる。CASBEE-建築（新築）のレベル5で窓のU値は3 (W/(m²・K)) 程度である。

窓枠の断熱性などまだ発展途上にあるという指摘がされている。

(2) 空調方式

アンビエント空調として、チルドビーム、天井放射、置換空調など気流速度、上下温度差に配慮した省エネルギーが図れる空調方式が採用されている。

外気を100%AHUに取り込み、除塵・除湿してチルドビームを介してインテリアゾーンに供給している（DLP）。

天井放射による冷暖房を採用したオフィスの換気を床下から行っている。これによりファン動力を削減している（RSF）。

排気やサーバーから熱回収を行う際、その熱回収効率を高めるようにしている（PHK）。

アクティブな冷房システムを設けずに、ナイトパージで対処している（XXI）。

アンビエント暖房用に、床に小型の電気ヒーターを分散配置している（RMI）。

アンビエント空調を補うためのタスク空調が採用され、冷却空気を二重床からダクトで机上に吹出したり（SI）、ファンとヒーターを内蔵した椅子を用意している（RMI）。

天井ファンを利用している（RMI）。

(3) その他

従業員や来館者に対するドレスコードを定めたり、好みのデスク位置を選べるようにして、省エネルギーを図りながら温熱環境を快適にできるようにしている。

3) 光・視環境

(1) グレア対策

日光によるグレアを避けるために、庇（ライトシェルフを兼ねている場合もある）を設けたり、屋内側あるいは

は屋外側に自動ブラインドを設けている。

エレクトロクロミック（Electrochromic：電界により変色する材料）、サーモクロミック（Thermochromic、加熱または冷却により変色する材料）を利用したガラスにより、日射や熱取得の制御やその試験を行っている（RSF, IW, SI）。

日光による直接グレアを避けるように設計しても、天井のブライトスポット、照明器具、明るい背景などによる間接的なグレアの問題があり、このグレアを和らげるために、モニター画面の明るさや角度の変更、窓面への光拡散フィルムの貼付、光拡散のための植物の配置、ワークステーションの壁へのスクリーン設置などを奨励している（RSF）。

自動ブラインドの調整が適切に行われていなかったためグレアの問題が発生し、ブラインドが正しい時刻に動作するように調整し直している。窓枠とブラインドの間で生じる細長いグレアを解決するために、山形鋼を付加して対策を行っている（DLP）。

(2) 照度

日光や天井照明が不足する場合に利用できるように、多くの建物でLEDのタスクライトが配備されている。

(3) 照明制御

日光による照度を計測し、日光が十分な場合は、人工光の照明を完全消灯あるいは電力消費量を大幅に低下させている。

3.2 サービス性能

1) 機能性（機能性、心理性、快適性など）

細長の建物にしてオフィスからの眺望を確保できるようにしている。

CLT（Cross-laminated timber）の床を採用し、CLTの間に情報・機械・電気のインフラを収容して、階高を高くせずに1階の天井高さを高くし、眺望を確保している（RMI）。

キッチンにレンジやオープンを備え、標準的なオフィスより調理をやすくしている（RMI）。

2) 耐久性・信頼性

外壁は保守費が低減できる石張りや金属パネル、室内仕上げは耐久性のある材料（コンクリート床、交換が容易なタイルカーペット、塗装壁、吸音生地仕上げの壁）にしている（RMI）。

3.3 室外環境

敷地の緑化に地元産の植物を使用し、最小限の水やりや施肥で済むように配慮し、生物の生息環境も提供している。

3.4 エネルギー

1) 自然エネルギー利用 (直接利用)

(1) 昼光利用

建物形状を、昼光や太陽熱が利用しやすいように (自然換気もしやすくなる)、細長の建物にしている。

建物の内部まで昼光を導くために、ライトシェルフ、高反射ルーバーを設けている。室内の壁と天井は反射率の高い塗装を行い、家具やローパーティションを明るい色にして反射率を高めている。昼光導入の妨げにならないようにパーティションを高くしないようにしている (RSF)。

建物内部の採光に、天窗を利用している (IW)。

屋根に取り付けられた鏡から光パイプを通してインテリア部に昼光を導いている。鏡は回転式と固定式を採用し比較を行っている (SI)。

外壁に光コレクタを設けて天頂光を集光し、高反射材を利用したミラーダクトにより室内に導き、天井の多孔から室内に供給している (SI)。

窓は効果的な断熱をする北面より南面を大きくして、多くの昼光や熱を取り入れている例や、反対に北面のソフトな拡散光はグレアを起ささないため、北面の窓を南面より少しだけ大きめにしている例がある。

(2) 自然通風

窓は手動あるいは自動で開閉できるようにして、自然換気が行えるようにしている。自動開閉窓はナイトパーズに利用される。

金属屋根とその上の太陽光発電パネルとの間に隙間を設け、ここで暖められた空気を煙突から排気する際に生じる浮力効果で室の空気を誘引して自然換気を行っている (SI)。

煙突効果と横風を利用した自然換気を行うために、ファサードと天窗に開口を設けたり、オフィスのドアに設けた調節可能な換気口とファサードの開口を利用して屋内外の通風を行っている (XXI)。

(3) 地中熱利用

地中に採熱チューブを水平に敷設し、チューブを通過する際に地中温度に近くなった取り入れ外気を、自然換気あるいは小型ファンによりオフィスに供給している (XXI)。

地中熱採熱パイプを設け、これに接続されたヒートポンプを利用して冷暖房を行っている。この地中熱は夏のフリークーリングにも使用される (PHK)。

(4) その他

外壁の外側に暗色の多孔金属パネル (太陽熱コレクタ) を設け、この多孔から空気を吸い込み、パネル裏面で暖められた空気を暖房に利用している (RSF)。

南向きのファサードに取り付けられたPVの裏面で暖まった空気を室内に導いて暖房に利用している (XXI)。

2) 設備システムの高効率化 (自然エネルギーの変換利用)

(1) 太陽光発電 (PV)

PVを屋上 (屋根)、敷地内の駐車場屋根に設置し、夏の余剰電力は、EVの充電、近隣の水素ステーションでの利用、系統への逆潮流等が行われている。

(2) 太陽熱利用

太陽熱集熱器にCPC型 (複合パラボラ型) を採用している (XXI)。

3) 効率的運用

(1) 蓄熱

植物由来の蠟 (WAX) を使用した相変化材料 (PCM) を、ライトシェルフや壁に組み込んで蓄熱に利用している (RMI)。

地下に迷路構造を設け、外壁に設けた太陽熱コレクタで暖められた空気をこの迷路構造に送り込んで蓄熱し、取り入れ外気を昇温 (予熱) している (RSF)。

中間期は、夜間に冷水を冷却塔によるフリークーリングにより冷却し、地下タンク2基 (合計190m³) に蓄熱し、日中にチルドビームに供給している (DLP)。

(2) 蓄電

購入電力の最大デマンドを下げて、電力料金を低減するために、蓄電池を設置している。この蓄電池を用いて、電気自動車 (EV) 充電を含めた建物のピークエネルギー消費を契約電力以下にしている。将来は、系統停電時の重要設備への蓄電池からの給電 (単独運転)、異なるデマンドリスポンスシナリオの試験、複数台の双方向EV充放電ステーションとの統合、直流負荷への供給などが計画されている (RMI)。

(3) 在館者との連携

窓やドアを開けた方が良い場合には、壁面に設けられたダッシュボードやPCにその旨が表示され、自然換気を行いエネルギー消費量の低減を図っている (DLP, RSF)。

空調・照明・PVなどの設備の状態を示すダッシュボードがあり、設備に異常がある場合にはその原因が示される (RSF)。

照明は執務者自らスイッチのON/OFFを行うよう奨励し、これが行われない場合にセンサーによる消灯を行っている。照明は、マニュアルスイッチ、照度センサー、人感センサーのいずれかにより消点灯できる (RSF)。

机上の機器の電源が切られていないため、夜間のコンセント負荷が小さくなっていない。このためテーブルタップを設け、出勤するとこれをONにする運用を行っている。

省電力のために、PCにはタワー型ではなくラップトップ型を使用するようにしている。複合機、冷蔵庫、コーヒポット、タスクライトの数量やタイプをガイドラインで示している (RSF)。ソリッドステートドライブ

(SSD) 利用のPC, タブレットPC, 低消費電力のチップを利用した電話の採用によりコンセント負荷を減らしている (DLP)。

建物にかかわる広範囲にわたる入居前研修, 建物にかかわる意見を収集するための定例ミーティング, コンタクトポイントを設けて建物にかかわる質問等への対応を行っている (RMI)。

清掃は, 天井照明を点灯させなくても良いように昼間に行うようにしている (RSF)。

在館者が建物全体の制御を理解せずにマニュアルで変更するため (例えば屋外の自動日射遮蔽装置を熱取得の制御ではなく, グレアの制御のために使うなど), 必ずしも省エネルギー制御になっていない。このような場合の対応として, 人工知能が使える大きな可能性がある。あらかじめプログラムされ硬直化した制御シーケンスの代わりに, 過去の性能を学習して制御を行うシステムが登場しつつある (RMI)。

(4) システム間の連携

人感センサーによるファン・照明制御, 照度センサーによる調光, CO₂センサーによる換気ファン制御を行っている (SI)。

各ワークスペースの人感センサーにより不在を検知すると, 照明を自動的に消灯すると共に, PCとモニターをスリープモードにしている (DLP)。

テレビ会議システムは, 夕方に自動停止させている (RMI)。

BEMSを利用して, ブラインド, コンセント負荷, 照明, 暖房・換気システム, 電気自動車充電ステーションの監視, 制御, 問題分析を行っている (DLP)。

スマートビル技術に焦点をおいた改修を計画し, この中で, 在館者検知, パーソナル環境設定, コンセント負荷制御などのユーザーレベルの技術を導入する。オフィススペースには現在の3倍, 1,000個以上のセンサーやモニタリングデバイスを備え, 在館者の行動をBEMSにリアルタイムにフィードバックする。これにより在館者にスマートで健康的な環境も提供する計画をしている (SI)。

快適性を実現するために制御対象が増え, 制御と運用が指数関数的に複雑になっているが, プラットフォームが本来のオープンシステムになっていないために対応が難しくなっている (RMI)。

3.5 資源・マテリアル

1) 水資源保護

雨水や雪解け水を敷地内の池に貯水し, 散水に使用している (RMI)。

屋上緑化と樋を用いて雨水を集水し, トイレ洗浄, 散水に利用している (トイレ洗浄に必要な水の90%をまか

なっている) (DLP)。

植物に対しては, 滴下方式により必要な時, 必要な場所への散水をスマート制御で行い, 水使用量を大幅に削減している (DLP)。

トイレ, 流し, シャワーには, マーケットにある最も効率の高い器具を使用し節水を行っている (RMI)。

浴槽, 流し, シャワーからの排水を処理し, トイレ洗浄水に使用している (RMI)。

水をほとんど必要としない乾燥に強い地元の植物と, わずかの芝 (芝は大量の水を必要とする) による景観デザインにしている (RMI)。

2) 非再生性資源の使用量削減

既存建物から材料をリサイクルし, 建設に伴う廃棄物の最少化を図っている (DLP)。

既存建物の構造を残し, ガラスやコンクリートは再利用している。例えば外壁に使われていた窓ガラスは, 室内のドアや壁に再利用している (PHK)。

半径800km (500マイル) 以内にあるFSC認証木材を使用している (DLP, GT)。またコスト, 内包エネルギー基準で地元材の使用割合を高めている (GT)。

建物のライフサイクル (材料製造, 運用, 改修, 廃棄) で, 再生可能エネルギー量が建物の消費エネルギーを上回るように計画している (PHK)。

ファサードには低内包エネルギーの環境調和型の材料である, 熱処理した木材を使用している (PHK)。

配管の曲がり角を従来の90°ではなく130°として, 配管使用量を削減 (ポンプ搬送エネルギーも削減) している (DLP)。

階段を利用して排気を行い, 排気用ダクトを設けていない (PHK)。

天井放射による冷暖房空間で, 換気のみをファンで行いファンを小型化している (RSF)。

100%外気のチルドビーム顕熱冷却により送風量を減らして, ベントハウス, シャフトスペースを小さくしている。水平方向の風量分配用スペースを減らして階高を低くしている (GT)。

地中熱採熱, 地中熱利用ヒートポンプ, 太陽熱蓄熱タンク暖房等を取り止めて, これにかかわる設備や設備機械室面積も削減している (RMI)。

3層ガラス窓の採用により, ペリメータ用の4管式冷暖房システムを取り止めることができた (DLP)。

駐車台数を見直して地下駐車場を取り止めて, 資源の節約を図っている (これにかかわる内包エネルギーも減らしている) (DLP)。

ビデオ会議の導入により, 航空機利用の出張を減らしている (DLP)。

3.6 レジリエンス

ネット・ゼロ・エネルギーは、電気料金の不安定リスクを低減できる。オープンオフィスは、進化するワークスタイルと技術に柔軟に適合する。床・壁内の予備電線管は、将来のICTや直流給電の進展に安価に対応できる。モジュラー化された暖房・冷房システムは、気候変動に対応して容易に拡張できる。敷地は、気候変動による洪水を避けるため、500年洪水確率より30 cm (1 フィート) 以上高くしている (RMI)。

4. おわりに

オフィスビル等の非住宅建築物が分類される業務他部門の各国のエネルギー消費量、米国・欧州・アジアの環境配慮型建築9ビルで用いられている技術と課題について報告した。

世界全体の最終エネルギー消費量に占める業務他部門の割合は8%で、この20年間に45%増加している。このため非住宅建築物の省エネルギーへの取り組みが重要になっている。

このような状況の中、ZEBや最高ランクのラベリングを目指して建設された環境配慮型建築では、外皮(壁、窓、屋根等)を高断熱にしたうえで、昼光の取り入れ、自然換気、蓄熱等を行えるようにしている。これらを効果的に実行するための各種センサーや高度な制御プログラムが実装されている。ライフサイクルでのエネルギー使用量や資源を削減するために、建築材料のリサイクルや、空調負荷が減った分の設備や設備機械室を減らしている。在館者に省エネルギーへの協力をしてもらうためのICTを利用した仕組みを用意したり、建物の使用方法に関する研修、問合せ先(コンタクトポイント)の設置などを行って、在館者との連携による省エネルギーを図っている。

各国で、環境配慮やZEBのために意欲的な取り組みを行っており、今後もその動向の調査を継続する予定である。

[参考文献]

- 1) 大島一夫, 海藤俊介: ビルの省エネルギー, ZEBに向けた国内外の動向, NTTファシリティーズ総研レポート, No.25, pp.35~40, 2014.6
- 2) <https://www.rmi.org/wp-content/uploads/2018/10/RMI-Innovation-Center-Overview-2017.pdf>, 2019.2.27
- 3) <https://www.packard.org/about-the-foundation/our-green-headquarters/>, 2019.1.15
- 4) http://task47.iea-shc.org/Data/Sites/5/documents/events/seminar-2014-04-03/5_Office-building-Powerhouse-Kj%C3%B8rbo.Authen.pdf, 2019.1.15
- 5) https://www.bca.gov.sg/newsroom/others/RD_Congress_2017_300617.pdf, 2019.1.15
- 6) https://newbuildings.org/wp-content/uploads/2017/03/CPUC_435Indio.pdf, 2019.2.27
- 7) <https://www.aia.org/showcases/185541-georgia-tech-engineered-biosystems-building>, 2019.2.27



おおしま かずお
大島 一夫

EHS&S 研究センター長
環境・エネルギー、BCP等のコンサルティングに従事
博士(工学)、建築設備士、SHASE技術フェロー、
認定ファシリティマネージャー、エネルギー管理士
日本建築学会、空気調和・衛生工学会、計測自動
制御学会会員



かいどう しゅんすけ
海藤 俊介

EHS&S 研究センター研究主任 兼 環境技術部主任
環境・エネルギー等のコンサルティングに従事
博士(工学)
日本建築学会、空気調和・衛生工学会会員

Synopsis

Environmentally-friendly Architecture Overseas

Kazuo OSHIMA

Shunsuke KAIDO

To address issues such as global environmental problems and energy security, countries around the world are engaged in undertakings to reduce energy consumption and make use of renewable energy. Laws and regulations to reduce energy consumption by residential and non-residential buildings have been established and the number of examples of buildings certified as environmentally-friendly buildings and ZEB (Net Zero Energy Building) is on the increase. This paper introduces energy consumption trends of the commerce and public services sector around the world and examples of environmentally-friendly architecture overseas.

The commerce and public services sector accounts for 8% of final global energy consumption, a level that has increased by 45% over the last 20 years. Accordingly, initiatives to reduce the amount of energy consumed by non-residential buildings have taken on greater importance.

Against this background, constructed with the aim of acquiring ZEB certification and the highest labeling rank, the outer skins (e.g. walls, windows, roofs) of environmentally-friendly architectures are provided with high thermal insulation, enabling realization of benefits such as daylight intake, natural ventilation and thermal storage. Sensors, advanced control programs and other elements are installed to ensure that these benefits are effectively achieved. To reduce the amount of energy and resources used in the life cycle of the building, measures are being implemented such as recycling of construction materials and reduction of facilities such as equipment and machine rooms that have become redundant due to reduced air-conditioning loads. Approaches such as installing mechanisms that use ICT to encourage people in buildings to save energy, setting up training in methods of building usage and establishing contact points are being adopted to achieve energy conservation with the cooperation of building residents.