

ZEBの実施事例（改修，新築）と 実証研究について

Introduction of Renovated and New-constructed ZEB, and Measurement Results of ZEB Prototype

佐竹 晃*

はじめに

ZEBの実現、普及が世界的に推進され、建築物の環境認証やESG評価の動向も活発化している。オーナー、テナント、投資家が求める建築物の要件にZEBがなり始め、ZEB設計技術の重要性が高まっている。

当社では、新築に加えて改修を含む『W（ダブル）ZEB』の実現に向けた活動及び技術開発を推進してきた。本報では改修と新築のZEB実施事例として、コンサルティング・設計をした『光が丘「J.CITYビル」ZEB Ready化総合改修事業』¹⁾²⁾と、設計・施工をした『ICIラボ エクスチェンジ棟新築工事』（自社新技術研究所）を紹介し、また当社旧技術研究所の一部をZEB総合改修し、実証研究した成果³⁾⁴⁾を併せて紹介したい。

1. 光が丘「J.CITYビル」ZEB Ready化総合改修事業

高層オフィス、ホテル、スポーツ施設からなる本大規模複合施設（図-1）は、中央式熱源を含む各種

設備の大規模修繕期を迎えていた。また年々高まる省CO₂規制対応や東日本大震災以降続く節電運用に伴い、快適性や労働環境に影響が出ており改善が求められていた。

本案件に対し、現状調査、データ解析、計画、設計に亘り参画し、当初計画されていた単なる設備機器の「更新改修」ではなく、機能・性能（施設価値）、省エネ、改修費、光熱費の何れのニーズも満足する総合的な「価値回復改修」のグランドデザインを策定した（図-2）。主な導入技術を以下に記し1.3節に詳細を記す。

- ①建物熱負荷削減と空調熱源再設計
- ②既存蓄熱槽を活用したBCP力強化
- ③省CO₂+αのコベネフィット型改修

本計画の策定にあたっては、大型建築物のストック改修において国内屈指の省CO₂性能と言える「ZEB Ready」化（運用エネルギーを一般比50%以下）をコンセプトに掲げ、高層オフィス棟のほぼ全フロアにおける照明LED化と窓ガラス高断熱化による空調負荷の削減と中央式熱源の高効率化・再設計を複合的に行う等の総合的手法を採用した。



図-1 施設概要（鳥瞰写真）

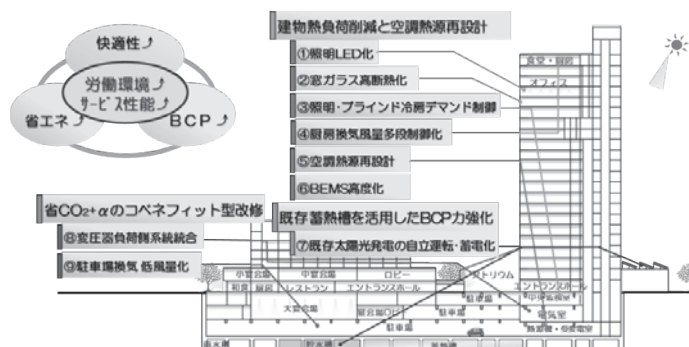


図-2 省エネ総合改修事業の全体像

* 前田建設工業株式会社

本総合改修による効果には、室内の温熱・光環境の改善による快適性や働きやすさの向上、既存蓄熱槽の一部を大災害時用の雑排水槽として転用するBCP力強化、設備容量縮小による室内静音化等の省エネルギー以外の多様なコベネフィットも期待される。竣工後には各技術の省CO₂性に加え、ノンエナジー・ベネフィットの調査も行い、他物件への波及も目指している。

なお、本改修事業は2016～18年度の3年間の工期で進められており、近く完成予定である。

1.1 施設の概要

本施設は全電化施設で、ダブルバンドル式を含む3つのヒートポンプ熱源機（全てターボ冷凍機、以下HP）と地下躯体利用水蓄熱槽（冷・温・切替槽、計4,400m³）からなる中央熱源方式であった。また低層スポーツ棟屋上には太陽光発電システム20kWが設置される等、当時としては先駆的な設備計画がなされていた。一方、窓は単板ガラス、外壁断熱厚は15mm、オフィス照明は蛍光灯と当時の一般的な仕様であった。

所在地：東京都練馬区

建物用途：オフィス、ホテル、スポーツ、駐車場

面積：敷地16,287.07m²、延床62,995.34m²

階数：地上24階、地下3階

竣工：1993年12月

1.2 エネルギー消費の改修前実績

(1) 施設全体のエネルギー変遷と改修目標

本施設全体の床面積あたりの一次エネルギーの需要の変遷を図-3に示す。改修前2012～14年度平均が1,595MJ/m²・年であった。これは同規模・同用途施設の一般値2,590MJ/m²・年の約60%、また東京都条例の基準年度2002～04年度の2,181MJ/m²・年より27%削減され相当の省エネ化が進んでいた。しかし、この現状には東日本大震災後から続く照明間引き点灯や空調温度緩和等の節電効果が含まれていた。

本総合改修計画では、室内環境の改善を図りながらも、1,120MJ/m²・年（一般値比約43%）までの削減を図るZEB Ready化を事業目標とした。なお、改修前時点で既に、都の削減義務の第1期間（2010～14年度）の8%減はもとより、第2期間（2015～19年度）の17%減までもクリアしていたが、将来の2030年基準（30～38%減のとなる可能性）をも満足する性能を視野に入れた。

(2) 空調・給湯消費熱量の改修前実績

改修前の年間の日積算消費熱量の解析により、冷

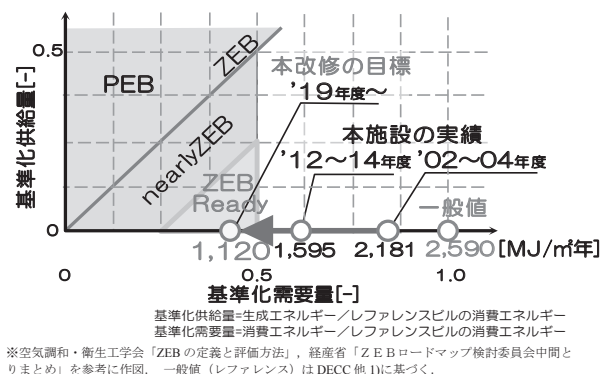


図-3 エネルギー需要・供給量の現状と目標

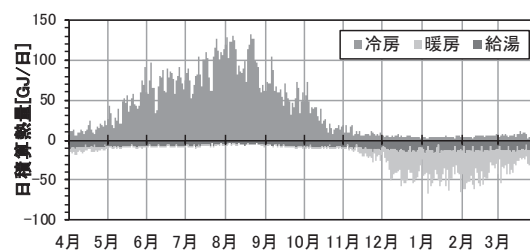


図-4 日積算消費熱量の年推移（2014年度）

・温熱のバランスが釣り合う期間は4、11月の約2ヶ月と短くかつ熱量も少なく（図-4）、既設のダブルバンドルHPの能力が過大で1/3程度に縮小（図-8）するのが適正と計算される等の、各種設計材料を得た。

1.3 「①建物熱負荷削減と空調熱源再設計」について

(1) 建物熱負荷削減のための建物改修

照明電力自体の削減に加え、熱源機のダウンサイジングを図るべく、オフィス棟を主体に照明LED化と窓を高断熱化する建物改修を計画した。オフィス棟のLED照明は専用部、共用廊下共に調光型とし、専用部の窓辺には明るさ調光制御を加え、机上面照度500lx時の消費電力が3.2W/m²まで削減される効果を検証した（図-5）。窓はLow-Eガラスを内付け・複層化した結果、冬期ガラス表面温度が3℃上昇し、省エネ、結露解消、窓付近の熱環境改善の効果を検証した（図-6）。

オフィス棟の改修仕様別の空調負荷年間シミュレーションの結果を図-7に示す。照明LED化のみ時は冷房が30%減る一方で暖房が倍増すること、窓高断熱化のみ時は暖房が殆ど無くなるが冷房が増加すること、両者の同時実施により冷暖共に減少でき計0.7倍になると算定された。そして、両者の同時実施時の空調負荷であれば、蓄熱槽を縮小（切替槽の廃止）でき、熱源機能力も縮小できることが別

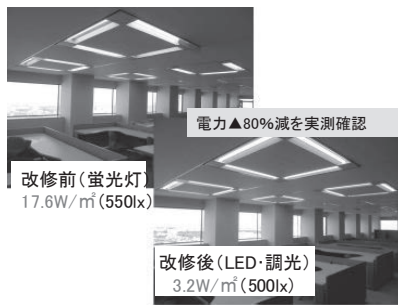


図-5 照明LED化改修前後の状況
（オフィス棟 概全フロア，その他
スポーツ棟，ホテルレストラン他）

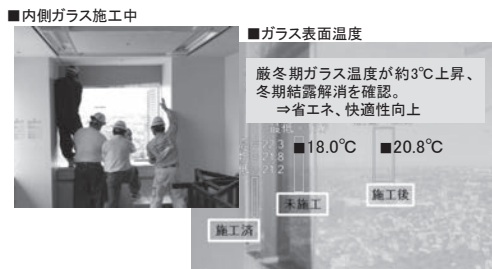


図-6 「②ガラス高断熱化」後の状況
（オフィス棟 概全フロア）

途計算で導かれ，省エネ，室外機スペース抑制，工事費抑制等ができる総合的メリットが大きい手法と判定された。

(2) 空調熱源再設計

前記熱負荷削減効果を踏まえた蓄熱運転シミュレーション結果に基づき，熱源機の構成変更とダウンサイジング（23%縮小）が可能になり，現状の室外機スペースに収まり，効率を高め，改修費を抑える熱源システムを計画した。また，空調制御の高機能・オープン化や電力見える化等のBEMS改修をし，省CO₂性の長期継続運用をサポートするようにした。

改修後の熱源システムの年間シミュレーションの結果，年間消費電力が37%減（図-9），年間システムCOPが3.4から4.8に向上し（図略），高レベル

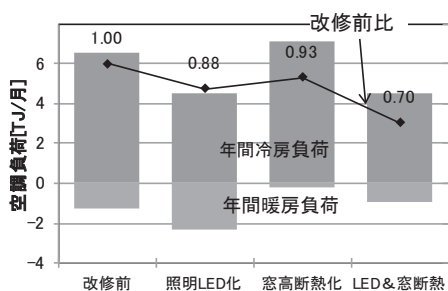


図-7 オフィス棟改修仕様別の年積算空調負荷解析結果

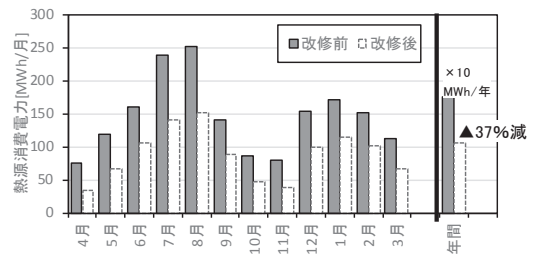


図-9 改修前後の熱源システム消費電力推計

の省エネ性能となることを事前確認した。

また，蓄熱槽においては，切替槽の廃止に加え，温水槽天井スラブの断熱強化改修も計画し，両者の効果により蓄熱損失負荷の大幅削減も図った（図-10）。

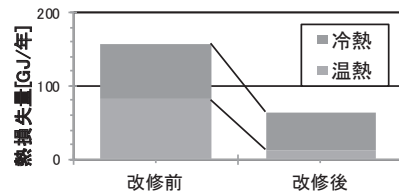


図-10 蓄熱槽の熱損失量削減効果の推計

1.4 「②既存蓄熱槽を活用したBCP力強化」の詳細

空調負荷削減改修に伴い生まれた遊休水槽（切替槽）は雑排水槽に転用。また既設太陽光発電設備に自立運転機能と蓄電機能を付加して，アトリウムのコンセント利用ができるようにすることで，大規模災害時の入居者や近隣住民のためのトイレ用水と携帯端末充電用の電源確保を図った（図-11）。

1.5 「③省CO₂ + αのコベネフィット型改修」の詳細

(1) 変圧器の無負荷損失の削減

節電対策やOA機器の省エネ化に伴い，施設内全54台の変圧器の大半は負荷率0.1以下と低かったた

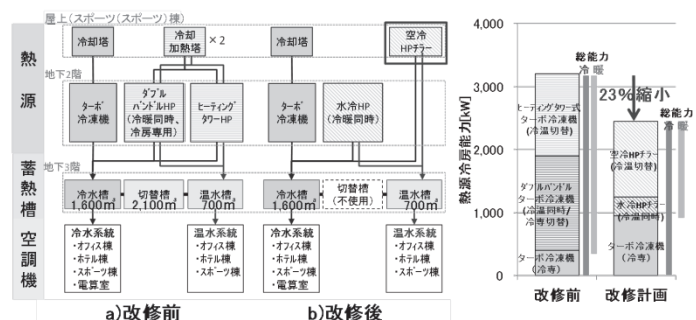


図-8 改修前後の熱源システムの構成・能力

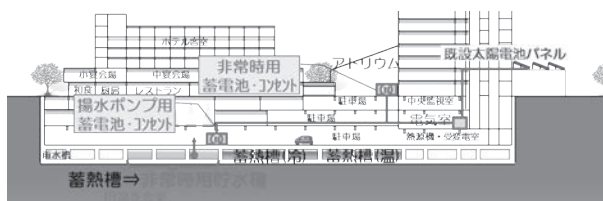


図-11 太陽光発電自立運転化による既存蓄熱槽活用概要

め、施設全電力量の4%もの変圧損失があり、これは電気室における冷房負荷にもなっていた。そこで、負荷側システムの回路集約をし概半数の変圧器を停止する統廃合により変圧損失量を半減させ（図-12）、電力を快適性に直結する空調・照明に有効に使えるよう図った。

本改修は費用対省CO₂効果が高い上に、変圧器の更新期延伸のノンエネジー・ベネフィットも期待される。

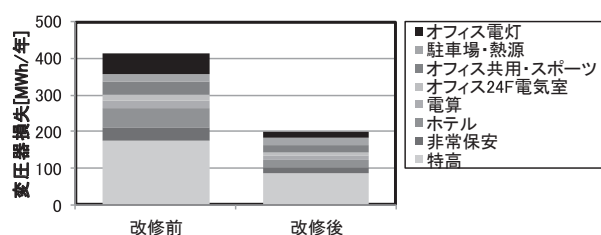


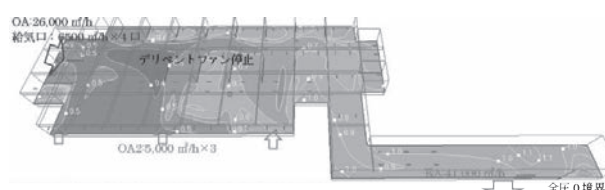
図-12 変圧器統合による節電効果の推計

(2) 地下駐車場の換気量の削減

地下駐車場の換気ファンの運転時間率が低く（CO濃度制御下で約20%）、法定風量の改定も考慮し、風量を約25%のファンに更新した。さらに既設デリバントファンの運転有/無を条件とした気流シミュレーションを行い（図-13）、殆どを停止しても空気齢に悪影響しないことを確認の上、必要機のみ更新をする計画とし、換気電力量と更新・維持費の削減を図った。

本改修は費用対省CO₂効果が高い上に、静音化等のノンエネジー・ベネフィットも期待される。

なお、本事業は国土交通省「平成28年度サステナブル建築物等先導事業（省CO₂先導型）」として

図-13 地下3階駐車場CFD解析結果
（デリバントファン停止時、H1.5mの空気齢）

実施した。

2. ICIラボ エクスチェンジ棟 新築『ZEB』計画

当社の創業100周年記念事業として建設され2019年2月開業予定の新技术研究施設「ICIラボ」の管理中枢機能を担う「エクスチェンジ棟」（図-14）は、『建設地の恵まれた自然環境と高効率機器を最大限活用した「ZEBと知的生産性向上」を実現する次世代オフィス』をコンセプトとして設計・施工された。



図-14 ICIラボエクスチェンジ棟 南側外観パース

所在地：茨城県取手市

建物用途：オフィス

建築面積：983.94m² 延床面積：2,122.2m²

階数・構造：地上3階、RC-S造 免震構造

竣工：2018年9月

2.1 環境配慮計画の概要

自社施設であることから、実験的システムを含む多様な技術を導入した。主要技術を以下に紹介する。

・高断熱外皮：

外壁・屋上断熱：厚み100mm

ガラス：Low-E 複層（Low-E + A12 + FL）

・風を捉える自然換気システム（図-15）

・内外電動制御ブラインドによる日射制御（図-16）

・水冷HPチラー（井水熱源）と天井放射空調を主体としたタスク&アンビエント空調（図-17）

・免震階をクールピットとして利用した空調室外機の高効率運転

・画像センサー人員検知連動の空調・照明制御

・太陽光発電（屋上110.7kW、南壁21.6kW（図-14））

2.2 エネルギー設計値

多様な環境技術を実装する事により一次エネルギー消費量414MJ/m²年と、一般的なオフィスビル比で77%減の国内トップレベルの省エネルギー計

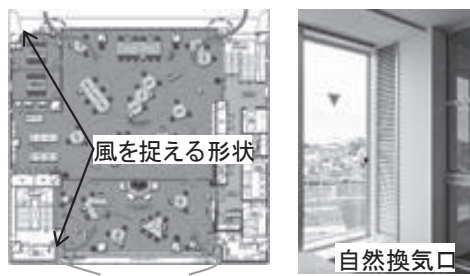


図-15 自然換気システム

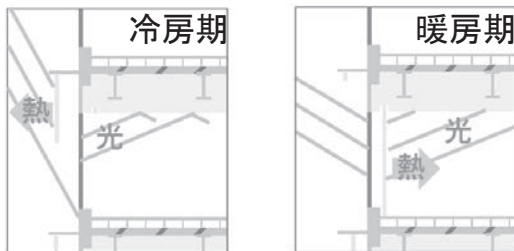


図-16 内外電動ブラインドによる季節別日射制御

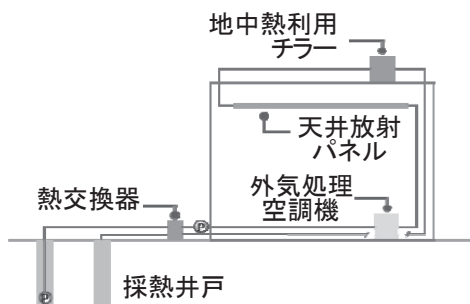


図-17 地中熱利用熱源・空調フロー（井水利用）

画をした上で、太陽光発電による創エネルギー約 665MJ/m^2 の計画により ZEB 実現を図った（図-18）。

設計性能評価としては、BELS 制度の「☆☆☆☆」 & 『ZEB』 の最高ランクの認証（図-14）や、CASBEE 認証制度の S ランク評価を取得した。

運用時におけるエネルギー実績の検証に加えて、室内環境評価、チューニングによる更なる省エネ性向上を図り、検証した技術やデータは、様々な建物の省エネルギーや環境負荷低減、知的生産性向上のために活用していく予定である。

なお、本事業は経済産業省「平成 28 年度 ネット・ゼロ・エネルギー・ビル実証事業」に採択された。

3. ZEB 設計技術に関する開発研究

室内環境を確保しながら消費エネルギーの極小化を図る ZEB 設計には、実証的研究により室内環境、建築外皮や窓の熱・光特性、設備機器の運転・エネルギー特性の詳細等を把握し、設計技術やエネル

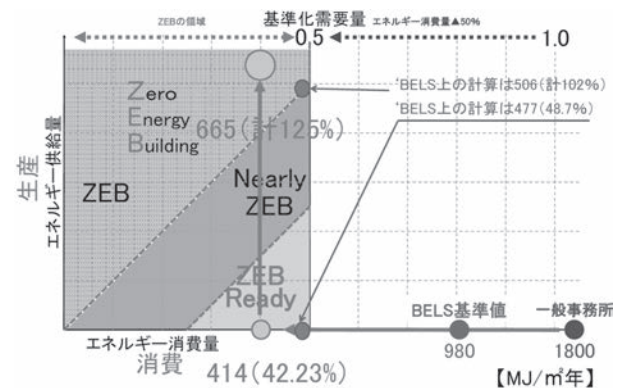


図-18 エクスチェンジ棟エネルギー設計値（自社推計値）

ギー計算技術を高度化していくことが求められる。本研究では、既存の自社建物の事務室を、窓ガラス、ブラインド、床・天井、照明、換気、空調、BEMS に渡り ZEB 仕様に総合改修し、実運用下での検証を行った。

3.1 ZEB 化改修の概要

3階建て建物の南棟2階（中間階）の、全周が外壁で南北面に窓がある床面積 353m^2 の事務室（座席数約 60 席）を改修対象室とした（図-19）。断熱性、日射・昼光の取得・遮蔽性、自然換気機能（電動窓）を高める窓周り改修により建物の空調・照明負荷を削減した上で、高効率設備と BEMS を導入する環境建築計画の原則に則った総合改修を行った。

外皮は、窓ガラスを透明単板から真空断熱 Low-E 複層に交換し、南側は電動ブラインドを内と外に併設、北側は既設の手動ブラインドとした。ガラスは、南側は冬の直達日射取得を図る目的で日射取得型とし、北側は日射遮蔽型とした。

一部のエリアは、天井を傾斜折上げ形状として天井の高い開放的な空間にして採光性を高め、桁行方向の露出大梁は間接照明の照射面として空間の明るさを高めた。天井水平部は膜天井として地震時安全性を高めると共に天井内を通過する冷暖房給気の放熱面とする空気式天井放射空調とした（図-19 左上図）。

窓の3箇所は室内外温度に応じて自動開閉する電動窓とし、中間期に自然換気による外気冷房を行う。

照明、空調方式はエリア別に異なる方式とし、室負荷処理は潜・顕熱分離空調に対応できる高顕熱型ビル用マルチエアコンで行い、外気処理はパッケージエアコンとデシカント方式の除・加湿装置で温湿度調整した空気を対象室の各室内機に供給する方式とした。

屋上の太陽光発電は対象室の分電盤に連系し、太

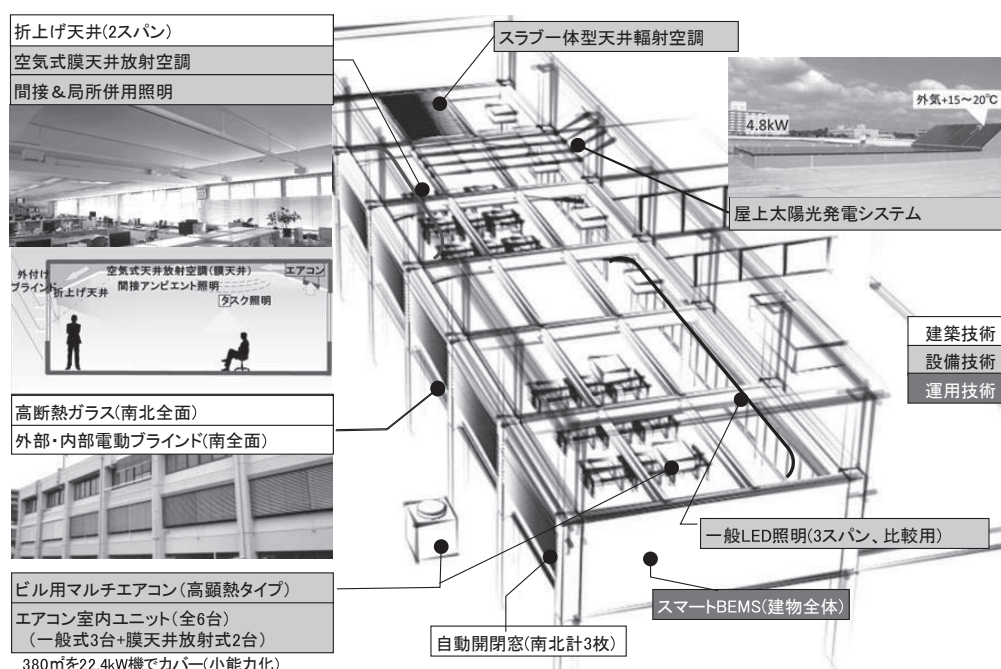


図-19 ZEB 化改修の概要

陽電池裏面熱を空気式集熱する構造として、前記外気の冬期予熱と夏期のデシカント材再生に利用する。

導入技術は、各種 ZEB 計画での活用を視野に入れ、汎用・経済的な建材・機器を主体に選定・構成した。

3.2 一次エネルギー消費量の設計値

対象室の BPI⁵⁾ は、窓の高断熱化等により改修前の 1.19 から 1.00 に減少させ省エネ基準に適合させた。BEI⁵⁾ は、改修前で既に 0.68 と省エネ基準を相当に下回っていたものを、太陽光発電分を含め 0.23 と大幅削減する改修計画と評価された(図-20)。

3.3 導入技術の実測評価

(1) 南面窓の内外ブラインド別の日射熱取得率

日射熱取得率の平均値は、内ブラインド 0.36 が外ブラインドで 0.17 に抑えられ、季節による切替えが、熱源容量や空調電力の削減に有効なことを検証した。

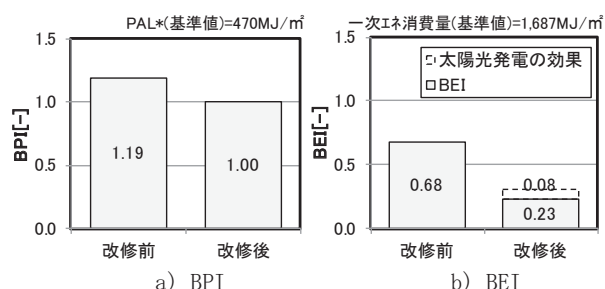


図-20 対象室のエネルギー消費性能計算結果

(2) 照明電力

改修後の照明電力が日中平均 $3.1\text{W}/\text{m}^2$ まで削減することを検証した。また、ノート PC と外付け液晶モニター主体で利用された本事務室におけるコンセント電力は $2.9\text{W}/\text{m}^2$ であることも併せて検証され、今後の ZEB の空調設計用内部負荷の参照値を得た。

(3) 空調方式別の室内温熱環境

独自開発した空気式膜天井放射空調方式の盛夏期冷房時の天井表面温度は 26°C で、一般天井の 28°C より 2°C 低く放射環境が優れることを検証した(図-23)。

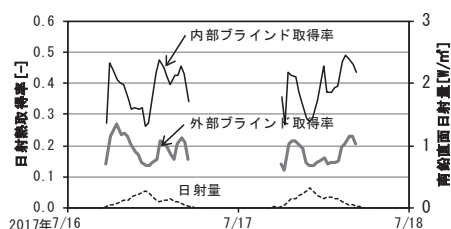


図-21 内/外ブラインド別の南面窓日射熱取得率

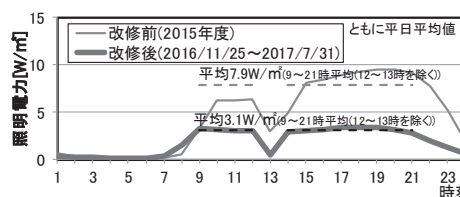


図-22 改修前後の単位床面積あたり照明電力の日推移

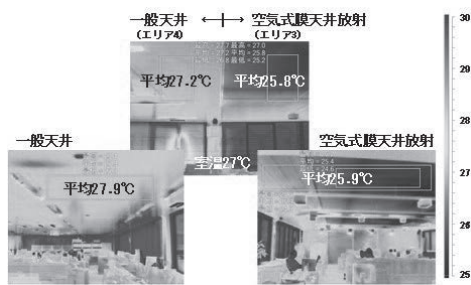


図-23 冷房時の天井表面温度の比較
(2016/8/9 14:30, 外気温 36.6℃)

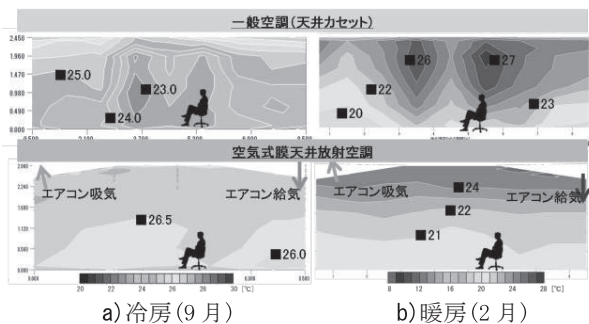


図-24 室内断面温度性状の比較

南北鉛直断面温度は、一般エアコン（2方向カセット形）では局所的な温度むらが大きく、暖房時着座時の頭部と足下の上下温度差が5℃以上あるのに対し、膜天井放射方式は温度むらが無く良好な熱環境で、さらに放射環境が優れるため室温が緩和できる可能性が示唆された（図-24）。またエリア全体で気流が感じられず、暖房時の乾燥感、冷房時の肌寒さが抑えられる効果が高いことを検証した。

(4) ビル用マルチエアコンの運転特性・年間電力

空調頭負荷削減効果を考慮し、室内処理用の空調熱源機容量を約 $60\text{W}/\text{m}^2$ と改修前の約 $1/3$ にまで大幅に縮小した結果、空調熱源機の負荷率が通常 0.4 程度以下に集中するのに対し、本改修後は 0.2～1.1 に分散したのが特徴的であった（図-25）。COP は冷暖房ともに負荷率 0.6 程度で最高となること、冷房時の高顕熱運転時は通常運転と比較し 1.4 倍程度 COP が向上する傾向等の設計用データを得た。

ZEB 改修後 1 年間のエアコン消費電力・処理熱量は、通常見られる 12 月や 7 月の急峻なピークが少なく、窓の日射制御（冬の取得、夏の遮蔽）の効果が見られた。月平均 COP は冷房 4.8～7.5、暖房 4.7～4.9 で推移した（図-26）、年間（APF）では 5.1 との高い効率（図略）を検証した。

3.4 一次エネルギー消費量の年間実績

年間一次エネルギー消費量の実績値は、改修前の $1,074\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ （省エネ法基準値比 0.50 倍）が、改

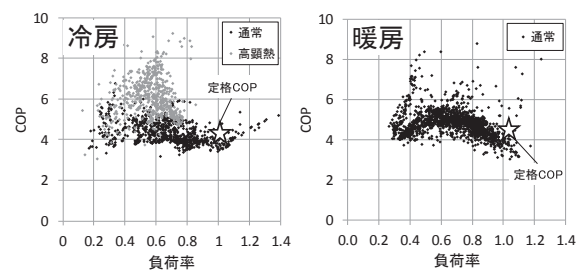


図-25 空調熱源機の負荷率と COP の関係

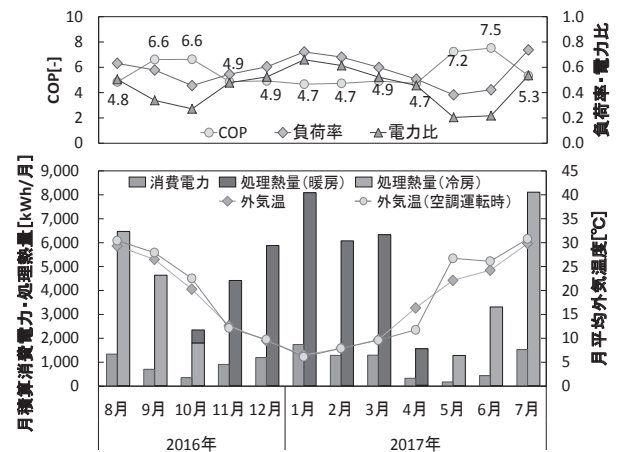


図-26 エアコンの消費電力・処理熱量・COP の月推移

修後は全日分で $745\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ （同 0.34 倍）に削減された。平日分（時間外・休日利用を取り除いた設計計算同等の室使用時間分）は $548\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ と分析され、基準値比が 0.25 倍と現時点の ZEB 志向建築物の性能⁷⁾を大幅に上回ることを検証した。また前記図-20 の設計性能以上の実性能が得られることを把握した。

本実証研究による検証結果は、前記「ICI ラボ エクスチェンジ棟」の計画・設計に活かされたと共に、今後の ZEB 計画・設計に有益な知見・データとし

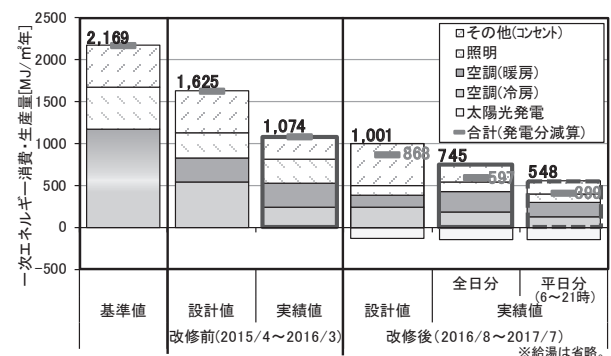


図-27 年間一次エネルギー消費・生産量
(基準値、改修前後の設計値^{5),6)}と実績値)

て活用して行けるものと考えている。

おわりに

当社における ZEB の実施事例 2 件と実証研究事例を紹介した。実証研究における体験を通して、窓の日射制御性・自然採光性を高める建築計画や放射環境を調整する空調計画等の建物性能の最大化は、室内の局所不快感を無くし、快適性、知的生産性、健康性の向上に繋がることを強く実感した。また、空調や照明の能力を大幅に削減するミニマムな設備計画は、新しい建築デザインに繋がる可能性を感じる。引き続き ZEB の計画・設計技術の高度化を図っていき、地球環境にも人間環境にも、そして建築物の進化にも寄与できる、事業や技術開発を推進したいと考える。

参考文献

- 1) 佐竹晃・河原博之・今林憲一・小林伸裕，大規模複合施設の省エネ総合改修事業における環境配慮技術（第 1 報）環境配慮全体計画と負荷削減計画，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，2017/9
- 2) 同上，大規模複合施設の省エネ総合改修事業における環境配慮技術（第 2 報）建物熱負荷削減効果と熱源システム運転の解析検討，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，2018/9
- 3) 佐竹晃・河原博之，中小規模事務所の ZEB 設計技術に関する研究（その 3）既存事務所の ZEB 改修後のエネルギー実績と空気式膜天井放射空調の環境評価 他，日本建築学会大会梗概集，2018/9
- 4) 稲田雄大・佐竹晃・山口福太郎・河原博之，中小規模事務所の ZEB 設計技術に関する研究 - 既存事務室における ZEB 改修概要と性能・エネルギー検証結果，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，2018/9
- 5) 建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律告示，H27 年
- 6) 国立研究開発法人建築研究所，建築物のエネルギー消費性能に関する技術情報
- 7) 環境共創イニシアチブ，平成 24～28 年度 ZEB 実証事業の調査研究発表（平成 24～26 年度補助事業実績値），平成 28 年 11 月

著者略歴



佐竹晃（サタケ アキラ）

1994 年京都工芸繊維大学工芸学部修了。同年前田建設工業株式会社に入社し技術研究所にて環境工学関連の開発研究を専任。2018 年より同社本店建築部に勤務。2009 年東北大学大学院工学研究科（博士課程）修了。博士（工学）