

# 高層オフィスビルに導入した省エネルギー技術の効果に関する計測と検証

川村 聡宏 川島 実  
(技術研究所) (技術研究所)

## Measurement & Verification with Energy Simulation Model on a High-rise Office Building

Akihiro Kawamura and Minoru Kawashima

高層オフィスビルに導入された省エネルギー技術が想定された性能を運用段階で維持できているか確認するため、実地計測とエネルギーシミュレーションによって検証した。計測と検証 (M&V) の手法は IPMVP に準じて実施した。本稿では IPMVP の概説と検証過程及び結果について報告する。IPMVP では標準的な性能の建物をモデル化し、実運用条件を合わせた Calibrated baseline model と、実運用条件・省エネルギー技術を再現した As-built model 及び実測値の差から運用段階の省エネ性能を評価する。各シミュレーションモデル・実測の結果を比較し、本検証建物である S 社本社では ASHRAE の基準性能の建物よりも-41~-43%程度のエネルギー削減率を維持して運用できていることが確認できた。

Measurement & Verification (M&V) has been carried out on the effects of energy-saving measures that were installed in a high-rise office building. The procedure of the M&V was based on IPMVP. By using the field survey data and whole building energy simulations, the detailed actual building operation condition was assessed. As-built model was calibrated to fit to actual measurements. Then, calibrated baseline model was calculated using ASHRAE std. 90.1. These results were compared to understand the present status of energy savings. The energy evaluation shows that the energy saving of the building is about -41 to -43 % of the benchmark building.

### 1. はじめに

地球環境問題を背景に建築分野でも建物の省エネ化が求められている。現在省エネ化の推進のために、様々な省エネ技術が開発・展開されており、各種技術を導入することで建物の一定の省エネ性能を確保することが可能となっている。しかし、運用時では予期しない外乱による導入技術の能力低下や導入技術の組み合わせによる相乗効果・相殺効果が発生している事例もある<sup>1),2)</sup>。そのため、運用時の省エネ性能の検証を行い、設計時に想定していた性能が維持できているかを確認することは非常に重要となっている。

建物の省エネ性能の計測・検証手法については、ESCO(Energy Service Company)事業の発展と共に議論が進められ、2002年に省エネルギーセンターから「省エネルギー効果の計測・検証手法ガイドライン」<sup>3)</sup>が作成された。本ガイドラインは米国の IPMVP (The International Performance Measurement and Verification Protocol) <sup>4)</sup>を元に策定されており、IPMVP では検証手順と技術

的内容を示している。また IPMVP は LEED における計測と検証に関する手順として採用されており、筆者らは実践事例の経験の蓄積を目的として、都内高層オフィスビルの S 社本社について、運転管理段階の省エネ効果を IPMVP に基づいて検証を行った。本稿では IPMVP の概説と S 社本社で実施した計測と検証の実施内容について報告する。

### 2. 検証対象建物

#### 2.1 概要

図-1に S 社本社外観、表-1に建物概要について示す。この建物は都心に立つ地上 22 階建のオフィスビルであり、省エネと快適性の両立を目指した取組を実施している<sup>5)</sup>。LEED v2.2 にて NC(新築)のゴールド認証を取得しており、国内の新築オフィスビルでは日本初の取得となる。

外壁は外断熱構造を採用し、窓ガラスには全面 Low-e ペアガラスを使用し、断熱性を確保している。日光を適正に利用/遮蔽するために、ガラス面のセットバックやグラデーショナルブラインド、ライトシ

ェルフにより、直達日射を遮蔽し、拡散日射を有効利用している。また人感センサーと明るさセンサーを活用し、タスクアンビエント照明を実現した。

## 2.2 空調システム

図-2に熱受入概念図、図-3に空調システム概念図を示す。熱源システムの特徴として、地下3階に別組織の地域熱供給プラントが設置されている点が挙げられる。S社本社では執務室に放射空調を導入しており、天井パネルは還り冷水温度で十分まかなえるため、地域需要家（周囲のビル）からの還り冷水を利用することで省エネを図っている。また還り冷水を利用できることで、冷水の大温度差運用が可能となり、冷熱蓄熱容量増と冷熱製造の夜間移行率拡大ができた。導入外気はデシカント空調機によって調湿され、放射パネル面での結露を防いでいる。デシカント空調機は高層用と低層用に分けて設置され、調湿空気は主に各階床のパーソナル吹出口から室内に供給される。

## 3. 省エネ性能の検証方法の概要

### 3.1 IPMVP

IPMVPは1997年に米国エネルギー省(DOE)の主導により国際組織の連合体が基準を策定し、計測・検証に対する業界の標準的な取り組み方として米国エネルギー関連企業に採択されたことをきっかけに広まった。現在では20か国以上の専門家がIPMVPの改編に携わっており、エネルギーと水効率に関わるプロジェクトの種々の局面について、現在利用できる最良の手順や検証の慣行技術の概要を記載している。「プロジェクト費用に対する効果の検証」や「システムの適切な設置と運用の検証」、「買手と売手間の契約に規定された条件の的確性判断」など幅広い側面で利用されており、建築分野では米国の建築物環境ラベリング制度(LEED v2.2とv2009)の「導入技術省エネ効果の計測と検証(以下、M&V)」にも採用された<sup>9)</sup>。IPMVPは以下の4つの議定書にまとめられている。

- I：エネルギー削減量と水削減量の決定
- II：室内環境の改善
- III-I：新築建物
- III-II：再生可能エネルギーによるエネルギー削減量の決定

本稿ではIII-Iの新築建物の議定書に準じて検証を行っている。

### 3.2 計測・検証手法の選択

表-2に新築建物の計測と検証手法選択の概要を示す。IPMVPにおける新築建物のM&Vでは「計測に関する経済的負荷がプロジェクト財政を圧迫しないこと」、「省エネ効果を定量的に把握・評価すること」の2つに主眼を置いている。そのため、前者を考慮して、4つの検証手法を提示し、後者を達成するために気象条件や稼働率による影響を排除したベースラインの決定方法を示している。手法Aは簡易手法、手法Bは長期計測による手法、手法Cは統計的解析による手法、手法Dは建物全体シミュレ



図-1 S社本社外観

表-1 建物概要

所在地	東京都中央区京橋2丁目16
敷地面積	約3,000m <sup>2</sup>
延床面積	約51,800m <sup>2</sup>
構造	鉄筋コンクリート(一部鉄骨造) 免震構造
階数	地下3階 地上22階 塔屋1階
主用途	事務所
CASBEE	Sランク (BEE 9.7)
LEED	NC(新築)ゴールド
	LEED v2.2にて取得

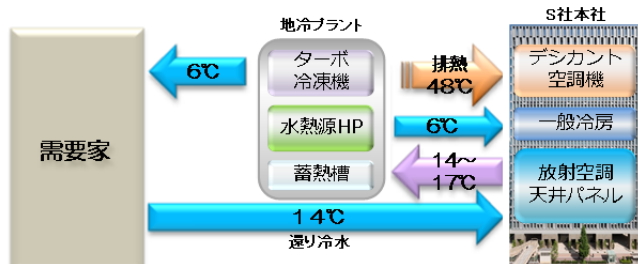


図-2 熱受入概念図

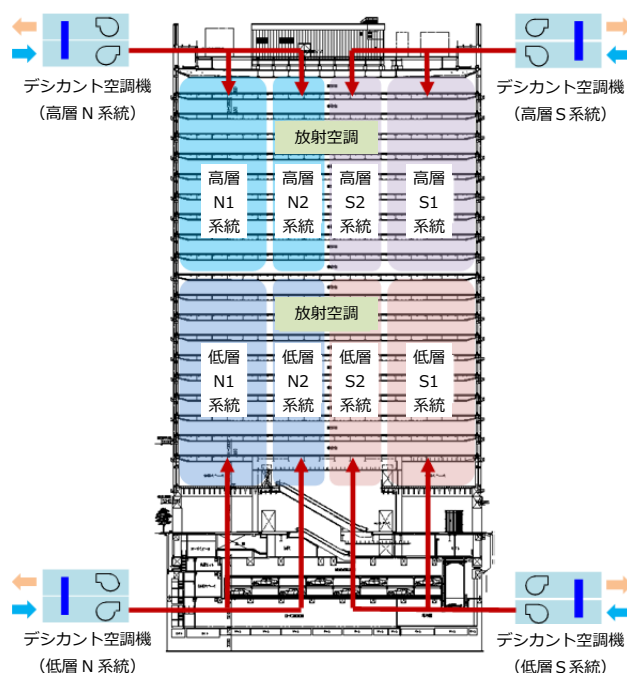


図-3 空調システム概念図

ーションによる手法とされる。本稿では建物全体の省エネ効果と用途別の省エネ効果について検証すること、類似した建物が周辺にないことを理由に手法Dを選択した。なおLEEDでは手法Bか手法Dに準拠してM&Vを実施することを指定している。

表-2 新築建物の計測と検証手法選択の概要

計測と検証手法	ベースラインの決定方法	適用先の例、主用途
手法A: 個々の省エネ手法の部分的計測(簡易シミュレーション)	検証期間において仮想エネルギー性能を与えたBaseline systemに仮想の運用条件を想定して算出した値	運用時間が規定されているもの。特定期間で計測された照明設備。
手法B: 個々の省エネ手法の包括的計測(長期計測による手法)	検証期間において仮想エネルギー性能を与えたBaseline systemに計測した運用条件を与えて算出した値	ファンモータのインバータ化。検証期間計測し続けたエネルギー消費量。
手法C: 建物全体の比較(統計的解析による手法)	解析対象建物に類似した建物の実測を行い、計測値から省エネ効果を除いた値(統計値による算出)	周辺建物と同様の性能と居住率を想定できる時の新築建物のエネルギー効率。
手法D: 校正した建物全体のシミュレーション(シミュレーションによる手法)	検証期間において、Baseline Energy Simulationに計測した運用条件を与えて算出した値	各地域のBaselineと比べた新築の建物の省エネ性能。

### 3.3 手法Dの概要

手法Dは空調用エネルギーシミュレーションソフトを用いて、建物全体の省エネ効果を検証する手法である。1時間ごとの気象データや運用条件から通年のエネルギー消費量を算出し、ベースラインの試算値と比較して省エネ効果を検証する。

手法Dの要旨は以下のようになっている。

- ・検証の実施期間(1年間以上)の実測データを計測・回収する。
- ・年間に亘る実測データを用いて、実測条件に合わせて校正を行ったエネルギーシミュレーションモデルを作成する。(校正後のmodelをAs-built modelと呼ぶ)
- ・同じ形状で熱的性能を標準仕様としたBaseline modelに対してAs-built modelと同様の校正を行い、校正済Baseline modelを作成する。(以下、As-built modelと同様の校正を行ったBaseline modelをCalibrated Baseline modelと呼ぶ。この標準値にはLEED認証手順に基づき、ASHRAE Std.90.1-2004 Appendix G(以下、Appendix G)<sup>7)</sup>を採用した。)

また手法Dでは省エネ効果の算出方法として、2つの比較手法を提示している。1つは「Calibrated Baseline model - As-built model」であり、もう

一つは「Calibrated Baseline model - 実測値」である。S社本社では運用条件と各設備のエネルギー消費量について計測を行っているため、両比較手法を用いてエネルギー削減量について検証する。

### 4. S社本社の計測・検証フロー

図-4にS社本社におけるM&Vフローを示す。本稿では3つの比較により省エネ効果を検証した。シミュレーションソフトはeQuest v3.6<sup>8)</sup>を用いて解析を行った。各比較概要について以下に示す。

- 比較1:** 設計段階において各種導入技術の省エネ効果の検討を行ったエネルギーシミュレーション比較。LEED認証に使用した比較であり、Appendix Gに準拠したBaseline modelに対して、設計段階で想定した各種技術と性能を組み込んだS社本社のシミュレーションモデル(以下、Proposed model)がどの程度の省エネルギーとなっているかを試算している。気象データは東京都の標準気象データを使用し、運用条件についてはAppendix Gに基づいて両モデルに同様の条件を与えている。
- 比較2:** IPMVP vol.Ⅲ-I、手法Dの比較手法。それぞれに対して実測値から校正を行ったAs built modelとCalibrated Baseline modelの結果を比較する。シミュレーション同士の比較のため、設備機器の経年劣化などを考慮するには工夫が必要となる。
- 比較3:** IPMVP vol.Ⅲ-I、手法Dの比較手法。実測値とCalibrated Baseline modelの結果を比較する。Calibrated Baseline modelの精度の高さとシミュレーションの潜在的エラーに関しての適切な把握が要求される。ここで潜在的エラーとはシミュレーションで実建物を近似化やモデル化処理した際に発生する誤差を指す。

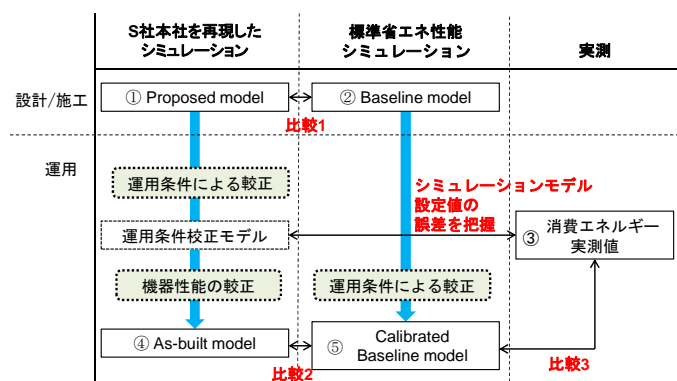


図-4 S社本社におけるM&Vフロー

それぞれのエネルギー削減率と用途別のエネルギー消費量について比較検証を実施し、設計時に想定した比較1の省エネ効果が運用時に実現できているかを確認する。

## 5. 年間運用データ計測

IPMVPでは以下のように計測データをシミュレーションに反映させると記載している。

- ・気象データは現地の計測値を使用すること。
- ・竣工後の計測値が機器のチューニングなどによって不安定である場合は、安定するまで期間を置いてからの計測値を利用する。また必要であれば時間間隔の平均化した値を利用すること。
- ・部分的計測を行い、シミュレーションの精度を確認すること。

S社本社では気象データをS社屋上で計測を行い、部分計測として、照明消費電力量、タスク照明消費電力量、占有部コンセント使用量、共用部コンセント使用量、在席人数変動、水搬送消費電力、空気搬送消費電力、換気ファン電力、給排水電力、給湯消費電力、昇降機消費電力、外調機稼働率変動、放射空調稼働率変動などをそれぞれ継続的に計測している。S社本社は2012年5月に竣工したが、運用初期は各設備機器のチューニングを行っていたため、本M&Vには2013年4月から2014年3月までの1年間の計測値を利用した。

## 6. As-built model の作成

### 6.1 運用条件の較正

設計段階で作成した Proposed model に対して実測で得られた運用スケジュールと室内環境設定条件を用いて較正を行う。以下に較正実施内容を記す。

- 気象データ：標準気象データをS社本社で実測した気象データへ変更した。2013年度の気象は標準気象データよりも年間平均気温が0.6℃程度高く、日射量も高い傾向があった。
- 平日・休日の調整：休日の設定を米国の標準休日日から2013年4月から2014年3月までの日本の休日へ変更した。
- オフィスの在席率：標準在席率から実測で得られた在席率へ変更した。在席率は職員の携帯するICタグ付入館証によって入退館を管理しており、職員の母数に対してS社本社内に在席している人数割合から算出した。残業者が多く、17時以降の時間帯では標準在席率よりも高く

なる傾向があった。平日と休日に分け、それぞれ1時間ごとの年間平均の在席率を与えた。

- 冷暖房、照明、設備、換気ファン稼働スケジュール：実測で得られた稼働条件に合わせてスケジュールを変更した。夏期と冬期で分け、平日と休日の稼働状況の平均値をスケジュールとして与えた。残業者が多いことに伴って、標準スケジュールよりも稼働時間が長くなる傾向があった。
- 室内設定温度：設定温度の冷房24℃、暖房22℃からS社本社設定温度の冷房27℃、暖房24℃へ変更した。
- 室内設定湿度：湿度を成り行き条件から最低湿度30%RH、最高湿度70%RHへ制御する運用に変更した。

### 6.2 実測値と運用条件較正のみのモデル解析結果の比較

図-5に実測値と運用条件較正モデル解析結果について示す。図-5に示した結果はAs-built model作成途中における設備機器性能較正実施前の6.1に示した運用条件のみを較正したモデルと実測値から得られた用途別の年間エネルギー消費量である。つまり、シミュレーションの値と実測値の差異は負荷設定や設備機器の効率設定によって生じていると考えられ、設計段階で想定していた設定効率と異なる効率で稼働していたことを示している。設備機器性能の較正では、以下の設定について較正する必要があった。

- ・シミュレーションモデルの冷暖房の消費エネルギーがやや小さくなっており、熱源がカタログ値よりも低い効率で稼働していた。
- ・シミュレーションモデルの換気ファン消費エネルギーが小さく、設計段階の想定よりも悪い効率で稼働していることがわかった。

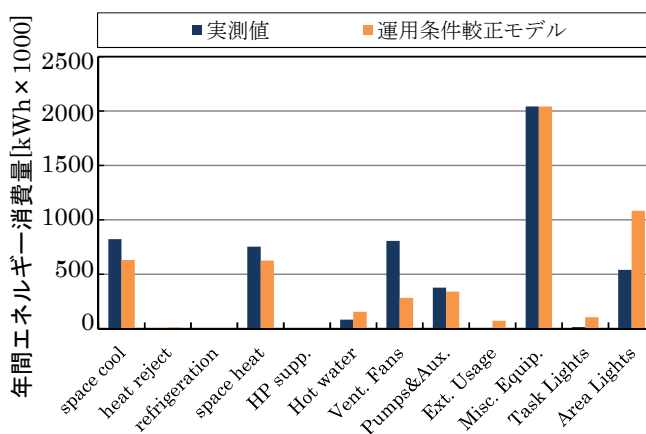


図-5 実測値と運用条件較正モデル解析結果

- ・照明が設計段階の想定よりも大きく省エネ化が図れていた。

### 6.3 設備機器性能較正

設備機器の負荷設定、エネルギー効率について、6.2(図-5)で挙げた誤差が生じていることが分かり、設定値の較正が必要と推察された。実測値に基づき設定値を見直し、設備機器性能の較正を行った。以下に設備機器性能の較正実施内容を示す。

- 熱源機器：ターボ冷凍機とヒートポンプが設計段階で想定していたエネルギー効率よりも低い効率で稼働していたことがわかった。COPは計測された結果を通年で平均化した値を用い、実測値に合わせたCOPへ設定した。ターボ冷凍機 COP6.6→5.5、ヒートポンプ COP5.6→5.0へ変更した。なお、部分負荷特性は仕様書に合わせた性能曲線を引続き採用した。
- ファン動力：BEMSを用いて積算されたファンの消費電力は、シミュレーション結果と乖離が生じた。これはオフィススペースの外調機ファンの設定がシミュレーションモデルから抜け落ちていたためであった。エネルギー消費量を正しく計算するため、オフィススペースの外調機ファンの定格容量を設定し直した。
- 執務室照明負荷：実測値から執務室のタスク、アンビエントの両照明負荷が設計段階で想定していた設定値よりも小さくなっていることがわかった。机上面照度を300lxまで低減して運用したことや昼光利用制御が想定よりも効果的に稼働したことが大きな要因と考えられる。執務室照明負荷とタスク照明使用スケジュールを実測値に合わせて変更した。

### 6.4 実測値とAs-built model解析結果の比較

図-6に実測値とAs-built model解析結果を示す。図-6に示した結果は6.1で示した運用条件と6.3で示した設備機器性能について較正したモデルと実測値から得られた年間エネルギー消費量である。用途別に年間エネルギー量の差異を確認すると、6.2(図-5)で見られたような差異はなくなり、精度の高い較正ができたと考えられた。6.1、6.3で実施した較正をもってAs-built modelの完成とした。

### 7. Calibrated Baseline modelの作成

設計段階で作成したBaseline modelについて6.1で行った運用条件の較正を実施し、Calibrated Base

-line modelを作成した。内部負荷はAs-built modelと同じ設定値とすることが原則であるが、昼光利用の効果を反映させるため、照明に関しては、個別に実施した光シミュレーションによる省エネ効果分と、Appendix Gの基準に則した人感センサーの省エネ効果分を反映させた。

### 8. 考察

表-3に年間エネルギー消費量に関する設計段階の解析結果、表-4に年間エネルギー消費量に関するIPMVPに準じた解析結果と実測値を示す。エネルギー削減率は比較1で42.5%、比較2で41.1%、比較3で43.0%となった。設計段階の解析結果である比較1では、総合的な年間エネルギー削減量に関して比較2、3の検証結果と同程度の削減率となった。しかし熱源効率と照明の節電効果に関して、設計段階の想定と運用段階の結果に差があることがわかった。熱源はメーカーのカタログ値よりやや低効率で稼働していたことが示唆され、熱搬送によるロスなどが影響したと考えられた。照明に関しては、昼光利用が想定よりも効果的に働き、高い省エネ効果があった。互いのエネルギー消費量の増減が相殺し合って、比較2、3の結果は比較1のエネルギー削減率に近い値となったと考えられる。

また表-4の⑤Calibrated Baseline modelでは湿度を成り行きから調湿設定としたことにより、ポンプ設備、補助装置の消費エネルギー量が②Baseline modelと比較して飛躍的に大きくなった。同様の調湿設定を④As-built modelにも設定しているが、①Proposed modelと大きな差異はなく、デシカント空調機の省エネ効果が大きいことが示唆された。

本建物の運用段階での総合的なエネルギー消費実態は設計段階で想定していた省エネ効果をほぼ目標通り発揮しているという結果となったが、設計段

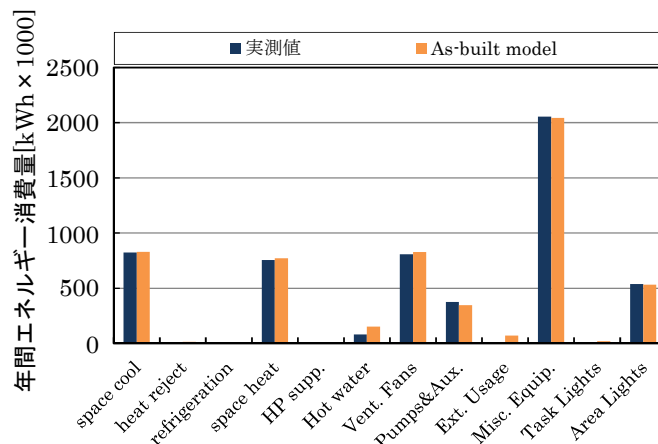


図-6 実測値とAs-built model解析結果

階のシミュレーションにおいて換気ファンの設定に抜けもあることがわかった。計測と検証を実施することで、建物運用段階におけるエネルギー消費量を正確に把握するだけでなく、設計当初のシミュレーションの問題点についても把握することができた。

比較2と比較3の差異はシミュレーションで実建物をモデル化する際に生じる誤差が原因と考えられる。しかし、③実測値と④As-built modelの合計消費エネルギー量は年間で3%程の誤差であり、良好な精度でモデル化できていると判断した。

本稿の省エネ検証はASHRAE基準をベースラインとして比較したが、2005年東京都省エネカルテでの事務所ビルエネルギー消費原単位の平均値

(99kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>年、2,365MJ/m<sup>2</sup>年)をベースラインとして比較すると、電力量の1次エネルギー消費量原単位を9.76MJ/kWh<sup>9)</sup>として、④As-built modelのエネルギー削減率は55.3%となった。ベースラインの違いにより削減率は異なるが、米国の省エネ基準は本建物設計時点で公開されていた東京の平均的建物よりも厳しいものとなっていることがわかった。特に外壁の断熱性に関しては日本より高い断熱性能を規定している。

## 9. まとめ

本稿ではS社本社に導入した省エネ技術の効果をIPMVP vol.III-I 手法Dに準じて計測・検証を行った。検証の実施で得られた内容を下記にまとめる。

- ・昼光利用の効果が大きく、想定よりも照明の省エネ化が大きく達成できていることがわかった。
- ・設計段階のシミュレーションでは、換気ファンの消費エネルギー量のモデル設定に抜けがあったが、設備機器の較正を実施することで、運用段階の正確なエネルギー削減率について検討をすることができた。
- ・本M&Vの実施により、年間エネルギー削減率はASHRAE Std.90.1-2004 Appendix G基準に対して42%前後の結果となり、設計段階の省エネ想定と同様の削減率を確保できていることが確認できた。

### <参考文献>

- 1) 中村卓司他：水蓄熱と組み合わせた躯体蓄熱空調システムのエネルギー評価に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第75巻，第649号，pp.289-295，2010.3
- 2) 川島実他：環境配慮型建築におけるエネルギー消費実態調査，日本建築学会技術報告集，第16巻，第34号，pp.1051-1056，2010.10
- 3) 財省エネルギーセンター：省エネルギー効果の計測・検証手法ガイドライン，2002.3
- 4) IPMVP Inc.：International Performance Measurement & Verification Protocol, Concepts and Options for Determining Energy Saving in New Construction Volume 3-1, 2006.1
- 5) 荒井義人他：持続可能な社会に向けた都市型超高層オフィスの研究 その1~12，日本建築学会学術講演梗概集，2013.8
- 6) Efficiency Valuation Organization IPMVP Committee.：Facility Measurement and Verification Plan -LEED Energy and Atmosphere Credit 5, 2008.7
- 7) ASHRAE Std.90.1-2004- Energy Standard for Buildings except Low-Rise Residential Buildings, 2004
- 8) <http://www.doe2.com/equest> (DOE2 ホームページ)(2015年2月23日参照)
- 9) エネルギーの使用の合理化に関する法律施行規則 第四条 <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S54/S54F03801000074.html> (2015年2月26日参照)

表-3 年間エネルギー消費量に関する設計段階の解析結果 (比較1)

年間エネルギー消費量	照明	タスク照明	コンセント他	暖房熱源	冷房熱源	冷却塔	ポンプ設備、補助装置	換気ファン	冷蔵・冷凍庫	ヒートポンプ補機	給湯	エクステリア	合計	エネルギー削減率 注1)
①Proposed 電力量 [kWh] [×1000]	729.2	100.7	2057.2	377.6	458.2	10.7	246.9	259.2	0	0	150.8	71.5	4462.1	42.5% (比較1)
②Baseline 電力量 [kWh] [×1000]	1583.2	0	2057.2	2134.9	771.5	17.0	344.3	546.4	0	0	214.9	86.0	7755.4	-

表-4 年間エネルギー消費量に関するIPMVPの準じた解析結果と実測値 (比較2、3)

年間エネルギー消費量	照明	タスク照明	コンセント他	暖房熱源	冷房熱源	冷却塔	ポンプ設備、補助装置	換気ファン	冷蔵・冷凍庫	ヒートポンプ補機	給湯	エクステリア	合計	エネルギー削減率 注1)
③実測値 電力量 [kWh] [×1000]	538.6	13.3	2042.1	754.5	823.3	(ファンに算入)	375.6	806.6	0	0	81.7	(コンセントに算入)	5435.4	43.0% (比較3)
④As-built 電力量 [kWh] [×1000]	531.6	20.9	2042.3	771.5	829.9	13.5	346.7	827.3	0	0	152.7	71.5	5607.9	41.1% (比較2)
⑤Calibrated Baseline 電力量 [kWh] [×1000]	953.7	22.3	2005.2	3167.2	861.8	28.9	1180.9	1010.8	0	0	210.6	86.0	9527.5	-

注1) エネルギー削減率とはBaseline model、Calibrated Baseline modelに対する合計年間エネルギー消費量の削減割合である。