

建築物のライフサイクルとサステナブルデザイン

Life cycle of building and its sustainable design

伊香賀 俊 治*

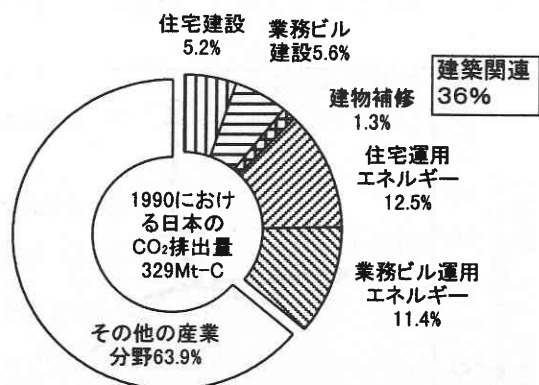
Toshiharu IKAGA

1. 身近な環境改善行為と未来世代の持続可能性

日本は、アメリカ、中国、ロシアに次ぐ世界第4位のCO₂排出国であり、国民1人当たりのCO₂排出量は、世界平均の2倍である。このような生活を未来の世代も享受し続けられるとは考え難い。我々は、未来の世代が豊かに生きる権利まで食いつぶしていると考えてもよい。

また、住宅および業務ビルの建設に伴って建築資機材製造・流通などの他産業への波及効果を含むCO₂排出量と、現在使われている住宅や業務ビルのエネルギー消費に伴うCO₂排出量を合わせた、いわゆる建築関連のCO₂排出量は、図1に示すように、日本のCO₂排出量の3分の1を占めると推定される。このように考えると、未来世代の持続可能性を保つ上で、建築におけるサステナブルエンジニアリング、サステナブルデザインの果たすべき役割は大きい。

日本人1人当たりのCO₂が世界平均と同じであったのは、



注: 1990年(暦年)産業連関表を利用して推計した国内CO₂排出量であり、環境庁推計の1990年度データ(320Mt-C)とは暦年と年度のほか、計算条件が若干異なる。また、住宅運用と業務ビル運用分については、総合エネルギー統計の年度データを暦年データに変換して求めた。このため、業務ビル運用分には建物の建設・補修に5%程度含まれている業務ビル運用分がダブルカウントされることになるが、全体への影響は1%未満のため、ここでは無視した。

図1 日本のCO₂排出に占める建築関連の割合

今から30年ほど前のことに過ぎない。その当時の総建築床面積は1人当たりとしては現在の半分であり、一般家庭にルームエアコンはなく、民間ビルでもまだ冷房設備のないものもあった時代である。官庁施設で冷房設備の設置が始まったのもこの頃である。もちろん、冷房の普及は、単に贅沢が原因とばかりは言えない。例えば、東京では、昭和初期にはほとんどなかった熱帯夜の日数が20日以上に増えている。都市環境の改変による高温化にも一因があり、環境負荷削減のために、すぐに冷房を止めて我慢の生活に戻るといふことも現実的な解決策ではあるまい。

2. 室内環境の改善と環境負荷の削減は両立するか

室内を空調によって快適な温湿度に保ち、室内の汚染空気を入れ替え、人工照明によって明るく保つなど、室内環境の快適性向上という我々の身近な環境改善行為とエネルギー消費の増大とそれに伴う環境負荷の増大との関係を見てみよう。図2、表1に、検討対象とした延床面積7740 m²、地上7階、地下1階建てのモデル事務所ビルを示す。

2.1 室内環境の快適性評価方法

室内環境の快適性は、熱・色・音・臭いなどに起因する生理的・心理的反応が複雑に関わって決まるが、それらを総合的に定量化できる便利な指標は、今のところない。事務所ビルの年間エネルギー消費量の約半分は空調用途であることから、ここでは、空調に関連の深い熱的快適性を取り上げ、その評価指標として、国際標準化機構で推奨基準値が示されているPMV (Predicted Mean Vote: 予測平均申告) とPPD (Predicted Percentage of Dissatisfied: 予測不満足者率) を採用した。PMVは被験者実験に基づき、人体の熱平衡のずれと温熱感を関係づけたもので、ある温熱環境に不満を感じる人の割合PPD (%)との関係式も導かれている。これらを評価指標として室内の熱環境を年間にわたり1時間毎に計算した。

*東京大学生産技術研究所 第5部

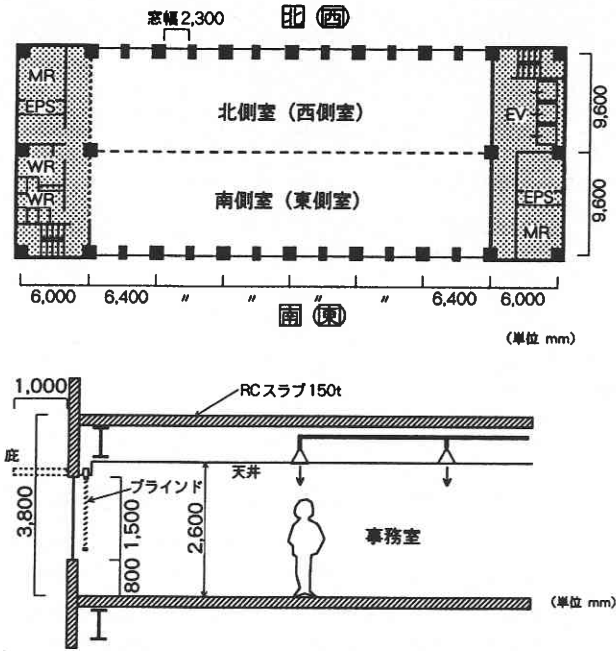


図2 モデル事務所ビルの基準階平面図と断面図

表1 省エネルギー対策の検討条件

代替案略称	建築仕様			設備仕様					主要空調設備容量				
	窓面方位	外断熱有無	庇の有無	給気量制御	最小外気冷房利用制御	外気冷房利用制御	昼光利用蓄熱	空調熱源	ポンプ一次	二次	風量	給気	遠気
	mm							MJ/h	kW	kW	m ³ /h	kW	kW
①無対策案	東西	0	×	×	×	×	×	3140	11.1	18.8	25	64.4	28
②基準案	南北	25								15	20	51.8	21
③一般対策案		40	水平		○	○							
④昼光利用案			庇	可変	CO ₂								
⑤蓄熱空調案							○	1875	7.4	22			

注1: 窓仕様はすべて透明シングルガラス・ブラインド。注2: 照明25W/m²、コンセント20W/m²(CEO/AGの固定条件)
 注3: 最小外気制御は設計人員密度0.2人/m²に対し定率50%と想定。注4: 机上面照度750lx確保で昼光利用制御
 注5: 蓄熱槽は完全夜間移行とした(500m³、20槽分節)。注6: 昇降機はCEO/EV、換気はCEO/V計算法で算出
 注7: 衛生ポンプ、給湯はいずれの家も1日給水・給湯量に250日/年を乗じて算出(衛生の省エネ率計上)
 注8: 空調設定温度を26°C(夏)、24°C(春秋)、22°C、50%(冬)として計算。ただし夏季は24°C、28°Cも計算。
 注9: 代断熱1.2met(事務作業)、蓄次量0.5calor(夏)、0.8calor(春秋)、1.0calor(冬)で熱的快適性不満足率PPDを算出

2.2 エネルギー消費量の算出方法

エネルギー消費量の算出には、毎時刻の年間気象データを利用する空調システム標準シミュレーションプログラム HASP/ACSS/8502 を使用した。なお、同プログラムでは熱的快適性が算出できないため、筆者が開発した快適性シミュレーションプログラム PMV-3D を使用した。両者の熱負荷算定手法は異なっているが、得られた室内空調負荷が概ね一致していることを確認した上で併用した。

2.3 室内環境改善と環境負荷削減が両立する建築デザイン (1) 快適性と夏季最大電力

図3は、横軸に快適性を、縦軸に環境負荷削減性能を取ったグラフであり、右上の第1象限にある場合が快適性向上と環境負荷削減が両立する場合を表す。もう少し正確に言えば、横軸は、窓から2m離れた位置に座って執務する人が感じる快適性(その環境に不満を訴えない人の人数割合%)を、②冷房設定温度26°Cの基準案を原点として、取ったものである。また、縦軸は、環境負荷削減性能に関連する尺度として、その建物の夏季最大電力の削減量を、同じく②冷房設定温度26°Cの基準案を原点として、取っ

たものである。まず、②基準案について見てみると、冷房設定温度を24°Cから26°C、28°Cへと上げることによって、夏季最大電力は、延床面積あたり84.6 W/m²から77.4 W/m²に削減されている(削減率9%)。一方、窓際2mで執務している人の快適性は、92%の人が満足する状態から、52%の人しか、満足しない状態に悪化してしまう。このように、建築デザイン上の対策ではなく、冷房設定温度を上げるだけの対策では、最大電力削減に相応の効果はあるものの、快適性が大きく損なわれるという代償を払うことになる。

注釈：一般的な冷房設定温度は26°Cであるが、(社)日本ビルエネルギー総合管理技術協会の調査報告によれば、最も満足度が高いのは25°Cとなっている。

一方、①無対策案から⑤の蓄熱空調案へと、建築デザイン上の対策を強化することによって、冷房設定温度が26°Cの場合、夏季最大電力は延床面積あたり84.7 W/m²から37.9 W/m²に削減される(削減率55%)。また、窓際2mで執務している人の快適性は、69%の人しか満足しない状態から83%の人が満足する状態に改善される。

各対策案の最大電力の内訳を図5に示す。②基準案を例にとれば、空調熱源(冷温水製造)と空調搬送(冷温水ポンプおよび空調機ファン)の消費電力が約50%を占めている。夏の空調を止めてしまえば、最大電力が50%削減され得る訳だが、真夏に冷房なしで我慢するという対策は、現段階では社会から受け入れられまい。ただし、対策の積み重ねによって、⑤の蓄熱空調案まで採用すれば、現在の成熟技術だけでも快適性を損なわずに同等の最大電力削減効果が得られる訳であり、我々が今すぐ着手できる対策は建築デザイン上の対策といえよう。

(2) 快適性と年間消費電力量

図3と同じ検討ケースについて、快適性と年間電力消費

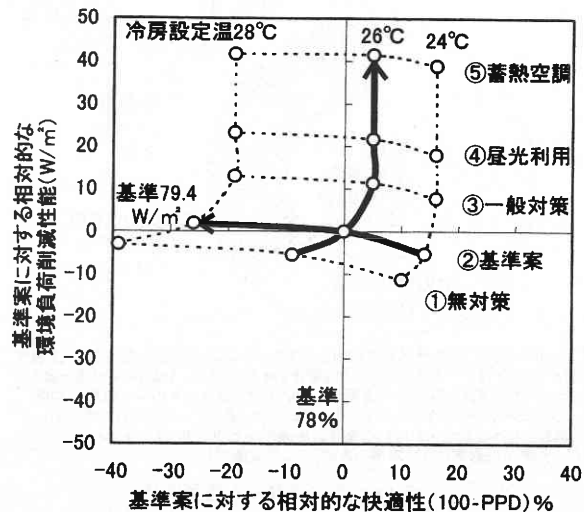


図3 快適性と夏季最大電力削減性能の関係

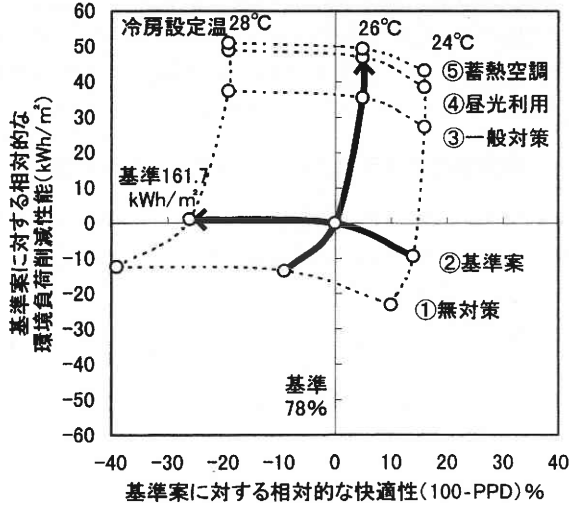


図4 快適性と年間消費電力量削減性能の関係

量との関係をプロットしたものを図4に示す。基本的な傾向は図3と一致しており、冷房設定温度26°Cを例に取れば、①無対策案から⑤の蓄熱空調案へと、建築デザイン上の対策を行うことによって、年間消費電力量は延床面積あたり175.3 W/m²から112.5 W/m²に削減される(削減率36%)。また、窓際2mで執務している人の快適性は、69%の人しか満足しない状態から83%の人が満足する状態に改善される。なお、建築的な対策が充分でないほど、季節・時刻による快適性の変動幅が大きくなるのが特徴であるが、年間単純平均値を取ると、対策による違いがわかり難いので、ここでは、夏季ピーク時刻の快適性を代表特性として選んで表示した。

各対策案の年間消費電力量の内訳を図6に示す。②基準案を例に取ると、空調熱源と空調搬送の消費電力量が、最大電力の場合と同様に約50%を占めている。年間を通して空調(冷房+暖房)を止めてしまえば、年間消費電力量が50%削減され得る訳である。ただし夏も冬も空調なしで我慢するという対策は、现阶段では社会から受け入れられまい。しかし、対策の積み重ねによって、⑤の蓄熱空調案まで採用すれば、現在の成熟技術だけでも快適性を損なうことなく約30%の年間電力量削減効果が得られるのであり、その上で、太陽エネルギーなどの自然エネルギー利用を積極的に取り組むことが、第一段階の対策といえよう。

(3) デマンドサイドマネジメントの意義

これまで述べてきた需要家側(デマンドサイド)の対策が普及した場合の効果について考えてみよう。首都圏の1990年度における民間事務所ビルの総延床面積は約1.23億m²であるが、その内2000m²以上の事務所ビルが全体の約50%(総延床面積63,000,000m²)を占めている。これらの中規模以上の事務所ビルすべてに省エネルギー対策

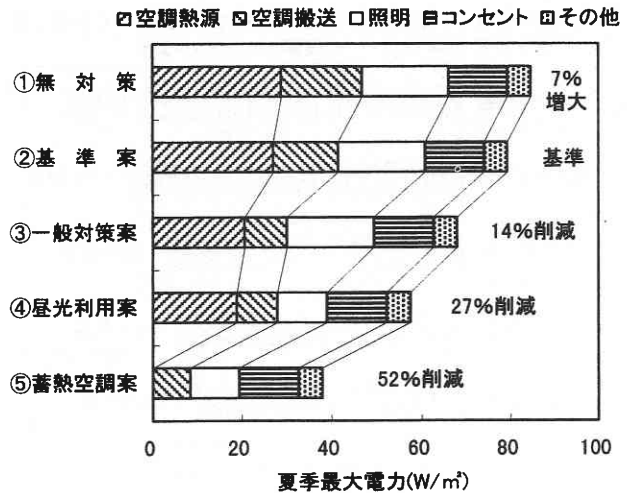


図5 各対策案の夏季最大電力の内訳

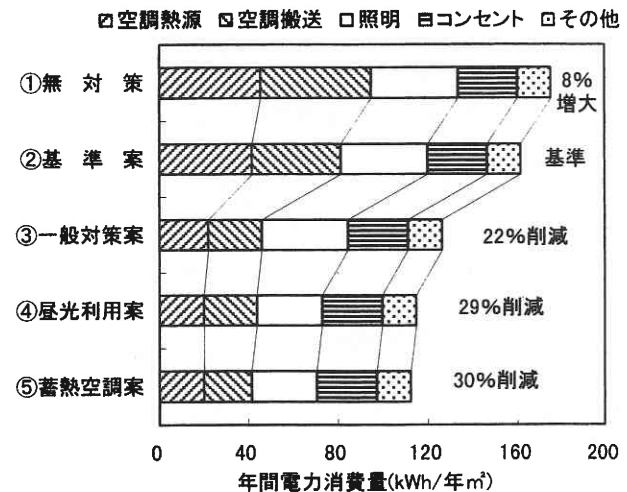


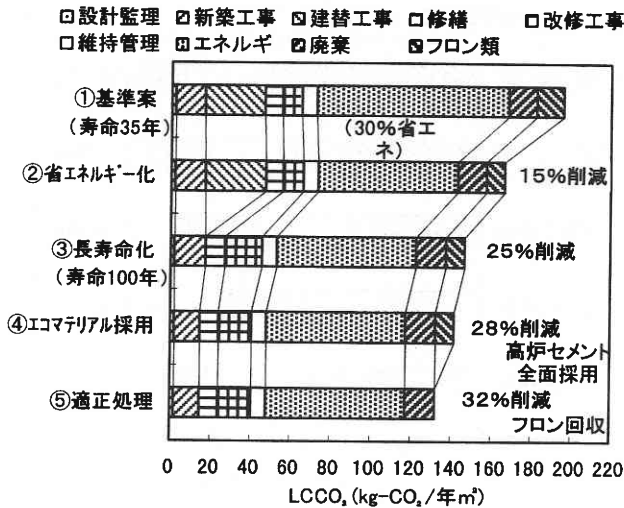
図6 各対策案の年間消費電力量の内訳

を導入したとすれば、究極的には最大電力を260万kW削減できることを意味する。この値は、大規模発電設備2~3基分に相当し、1990年度における首都圏の最大電力4930万kWの5%にあたる。また、年間消費電力量では31億kWh/年となり、首都圏の消費電力量2199億kWの1.4%に相当する。

3. サステナビリティは汎用技術でどこまで高まるか

以上、事務所ビルの運用段階に着目して環境負荷削減の可能性について記述してきた。次にライフサイクルにわたる環境負荷削減の可能性を、地球温暖化の主要原因といわれているCO₂の生涯排出量(LCCO₂: Life Cycle CO₂)を例に考察してみたい。

都心の事務所ビルの寿命実態が30~40年という調査データを参考に、35年サイクルで建替えされる場合のLCCO₂を延床面積あたり100年間の年平均値あたりで表

図7 モデル事務所ビルのLCCO₂削減効果試算例

したものを図7の最上段の棒グラフに占めず、エネルギーの項は、図6②基準案の年間電力消費量の他に、年間上水使用量、年間汚水排水量の計算結果に対して、産業連関表を利用したCO₂原単位を乗じて算出したものである。また、CO₂の1000倍オーダーの地球温暖化影響を持つ発泡断熱材(HCFC142b)と空調熱源冷媒(HCFC22)漏洩量については、IPCC発表の地球温暖化係数の100年間積算値を利用してCO₂に換算し、フロン類の項目に計上した。

(1) 省エネ対策で15%削減

2段目のグラフは、図6の⑤蓄熱空調案までを盛り込んだもので、基準案に対して年間電力消費量が30%削減され、LCCO₂としては約15%の削減になっている。なお、この計算法の限界から、図5に示す最大電力削減効果は計算結果に反映されていない。

(2) 長寿命化対策で25%削減

3段目のグラフは、長寿命化対策を導入した結果である。建物の床面積、階高、床荷重などの構造体にゆとりをもたせ、将来の機能変化に柔軟に対応できる構造体にしておくことで、内装や設備を時代が求める機能に応じて改修工事を繰り返しながら、100年間使い続けられると仮定している。建替工事が少なくなることでLCCO₂は25%削減される。

(3) エコマテリアル採用で28%削減

4段目のグラフは、環境と調和する材料(エコマテリアル)を徹底的に採用した場合である。ここでは、現実的な選択肢として製鉄プロセスの副産物である高炉セメントの採用に限定したがLCCO₂としては28%の削減となっている。

(4) 適正処理で32%削減

5段目のグラフは、発泡断熱材と空調冷媒に地球温暖化係数の大きいガスを使用しないか、あるいは回収が徹底で

されれば、LCCO₂は32%削減されることを示している。

以上のように建築が最後に取り壊される時のことまで視野に入れたライフサイクルにわたる対策によってはじめて、建築のサステナビリティを高められることがわかる。

4. 建築物のサステナブルエンジニアリングの課題

建築物は、一般的な工業製品とは異なり、基本的に一品生産品であり、かなり大規模な建築物のデザインであっても、ひとりの建築家の裁量に任されることが多い。発注者との合意が得られれば、かなり思い切ったサステナブルデザインも可能である。裏を返せば、サステナビリティがまったく配慮されていない建築物が生み出される可能性も多いことを意味している。

一品生産であるがゆえに、ライフサイクルアセスメント的な検討は言うまでもなく、運用段階の省エネルギー対策の検討に時間を費せるプロジェクトは、残念ながら少数派である。まして実物大の試作品で事前検証することは工業化住宅を除けば皆無といえよう。設計時点の評価だけでは予測しきれない制御性の問題、運転管理上の問題など、実際に完成し、使われて初めて明らかになることも多い。既存事例の模倣と改良が建築分野の特徴といえ、日常の設計・建設行為に、サステナブルエンジニアリングをどのように定着させるかが建築分野の課題といえよう。

ここでは、筆者が民間設計事務所勤務時代に、環境計画・設備設計を手がけたプロジェクトを題材として、建築物に対するサステナブルエンジニアリング的な取り組みの実践例を紹介したい。

(1) 太陽熱・地中熱を徹底利用したJプロジェクト

北海道帯広市内に建つ、1995年12月に完成した発展途上国からの研修生を受け入れるための研修所である。冬季には氷点下20°Cにもなる極寒地でありながら冬季の日照時間は日本で最も長く、その一方で夏季には30°Cを超えるという厳しい気候条件をどう活かすかが設計上の課題であった。図8にサステナブルデザインのコンセプトを示す。寒冷地として高断熱・高气密化を図るのは当然であるが、最大の特徴は太陽光による採光・採暖と共に、換気のために取り入れる外気を、昼間は屋根面一体型の太陽熱集熱器で暖め、夜間は地中3mに埋設した直径600mmのパイプの中を通して暖めるシステムにある。これによって、冬季の外気加熱・加湿用の燃料消費量が36%削減された。また、夏季には地盤の冷熱で外気が冷却され、外気冷却用の燃料消費量(吸収式冷凍機用)が22%削減された。これに外気導入量調整システムを加えたものの効果だけで、建物の全エネルギー消費量が11%削減されたと推定される。また、屋根面に降った雨水により、トイレ洗浄水の雨水依存率は65%となった。その他、木製サッシュ、木質内装、ノンCFC断熱材その他、図8に示すさまざまな対策を取り

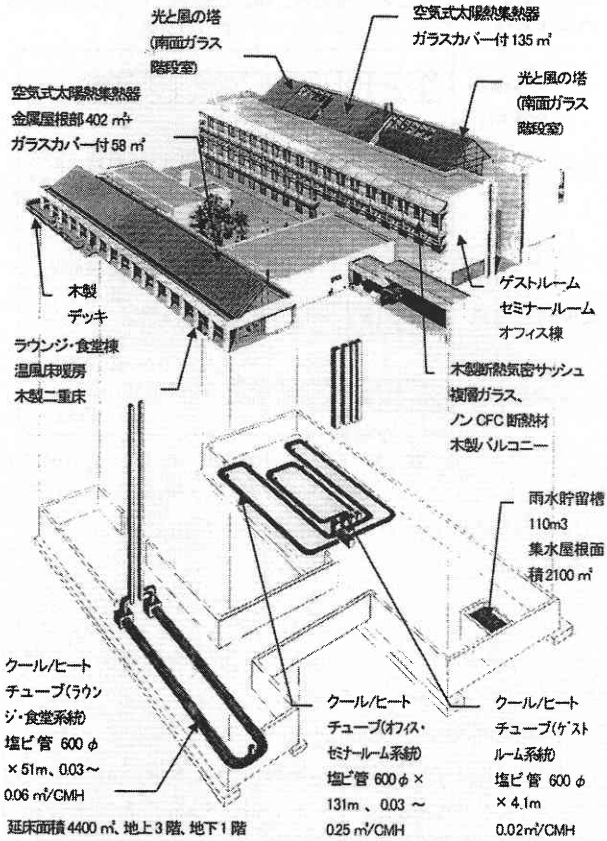


図 8 J プロジェクト (1995.12 完成, 延床面積 4300 m²)

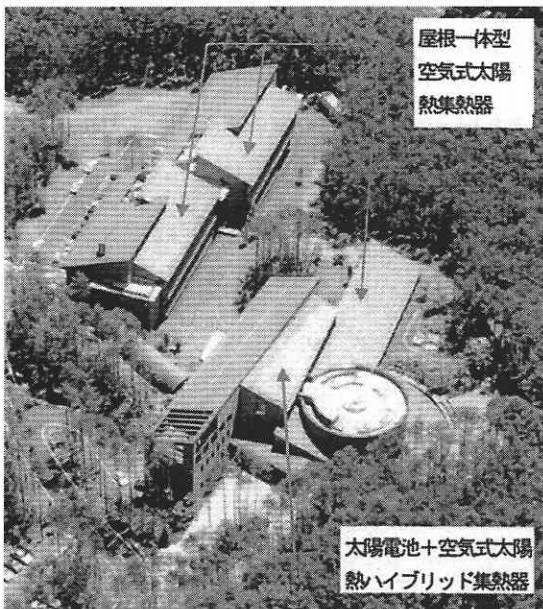


図 9 Y プロジェクト (1997.04 完成, 延床面積 6400 m²)

入れている。

(2) 自然エネルギー利用を集大成した Y プロジェクト
富士山北麓に建つ 1997 年 4 月に完成した環境科学のた

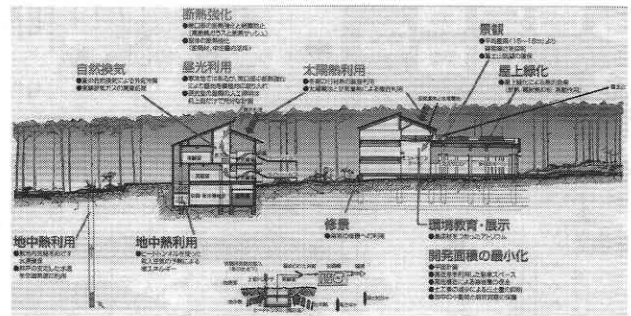


図 10 Y プロジェクトのコンセプト



図 11 M プロジェクト (1998.09 I 期完成, 延床面積 59000 m²)

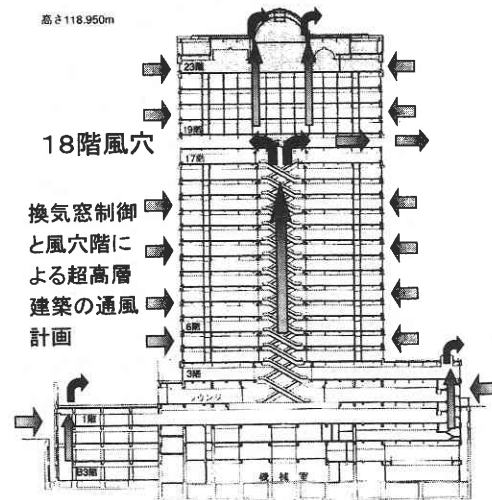


図 12 超高層建築の通風計画

めの研究所である。図 10 に示すように、外断熱と高断熱複層ガラスによって保温性を高め、南側窓面にはライトシェルフを設けて、自然採光と採暖を図っている。また、屋根面を外気予熱のための空気式太陽熱集熱器とし、さらに一部に太陽光発電パネルを設置して太陽熱利用と同時に発電 (20 kW) も行っている。さらに、地中トレンチによる外気予熱・予冷、井戸水を熱源水とした蓄熱式ヒートポ

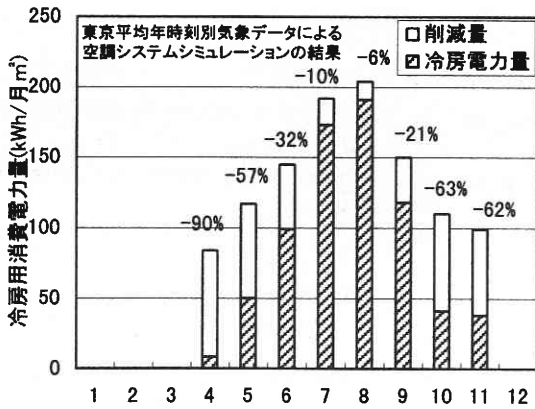


図 13 自然通風による冷房用消費電力量削減効果

ンプ空調など、徹底した自然エネルギー利用・エネルギー有効利用によって、建物の全エネルギー消費量の 30% 削減を図っている。

(3) 超高層ビルの自然通風を追求した M プロジェクト

東京都心部に建つ、1998 年 9 月に完成したばかりの地上 23 階建ての超高層大学校舎である。超高層ビルの窓は開かないのが一般的であるが、図 12 に示すように、室内と外部の温湿度等に基づき自動的に開閉する換気窓と通風効果を高めるための吹き抜けと風穴階を有している。換気窓は、授業中、遮光ブラインドが下がっていても支障のないディテールとし、自動制御化することで、夜間のうちに室内に蓄った熱を取り除いて、翌日の冷房負荷を軽減すると共に、建材等から出る化学物質等の汚染物質もエネルギーを使わずに除去することを狙っている。月別の冷房用電力消費量の削減効果は図 13 に示す通りであり、年間では 35% の削減になると見込んでいる。その他、あらゆる省エネルギー対策を効果的に取り入れることによって、運用段階のエネルギー消費量を 46% 削減し、ライフサイクルでの CO₂ 排出量を図 14 に示すように、約 40% 削減することを目標としている。

図 7 に示したモデル事務所ビルの LCCO₂ 30% 削減よりもさらに踏み込んだ内容であるが、設計時に予測した削減量が達成できるか否かは、実際に使われている状況における調整にかかっている。今後、目標を達成すべく、運用実績の分析と運用方法へのフィードバックに取り組んでいるところである。

□設計監理 □新築工事 □建替工事 □修繕 □改修工事
□維持管理 □エネルギー □廃棄 □フロン類

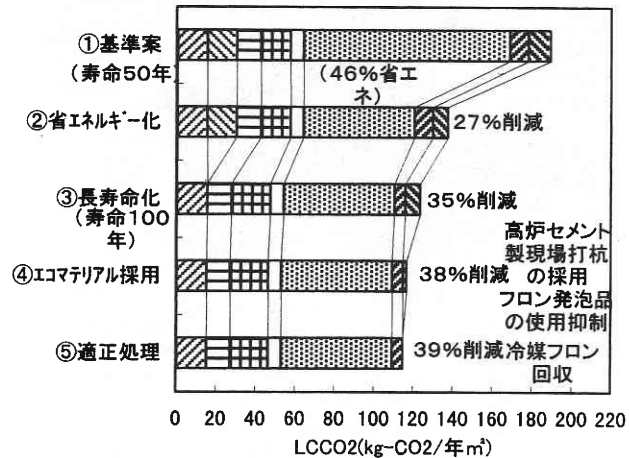


図 14 M プロジェクトの LCCO₂ 削減効果

5. お わ り に

モデル事務所ビルの室内環境改善と環境負荷削減の関係を検討し、両者が両立する建築デザインは可能であり、汎用技術の範囲内で LCCO₂ を 30% 削減し得ることを示した。また、筆者が民間時代に環境計画・設備設計を手がけたプロジェクトを題材として、一品生産品である建築物の設計・建設行為の中に、サステナブルエンジニアリングをどのように定着させるか、建築物のサステナビリティをどこまで高めることができるかについての考察を試みた。

建築物のサステナブルデザインにおいて、環境負荷が少ないことは必須条件である。さらに大切なことは、未来の世代に託すにふさわしい魅力的な建築、取り壊されずいつまでもそこにあって欲しいと思われる建築とすることであろう。建築のサステナブルエンジニアリングには、それを支援できることが求められよう。

(1998 年 10 月 13 日受理)

参 考 文 献

- 1) 近本智行, 伊香賀俊治, 柳原隆司, 宮本博和: オフィスビルの電力需要と快適性の相関関係に関する試算, エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp. 7-12, 1996. 4.
- 2) 伊香賀俊治: 建築物の LCA, LCA 実務入門, 産業環境管理協会, pp. 108-128, 1998. 08.