

再生可能エネルギーの利用技術の 導入効果に関する研究

A Study on the Effects of Introducing Technologies for Using Renewable Energy

岩下将也*

要旨

ネットゼロエネルギービルの実現に向け、その評価方法の整備が各企業・団体によって進められている。しかしながら、再生可能エネルギーを利用する省エネルギー技術の評価方法は、十分に整備されていない。本検討では、再生可能エネルギーを利用する省エネルギー技術のうち、代表的なものとして、地中熱利用空調システム、太陽熱利用空調システムについて、その導入規模とエネルギー削減量の関係の把握した。建築面積を制約条件として、最もエネルギー削減量が大きくなる地中熱利用空調システムの熱交換井の計画方法を提案した。

キーワード：地中熱利用、組合せ最適、太陽熱利用、デシカント空調

1. まえがき

経済産業省がネットゼロエネルギービル（以下ZEB）のビジョンを掲げて以降、その実現性についての検討が各企業・団体によって進められている。2013年には、(社)空気調和衛生工学会が、現状の新築建物についてのZEBの実現性を評価するための指標を定めた¹⁾。この指標では、「現状の建物がどれだけZEBに近いか」を、「ZEBready」「nnZEB」という考え方で表し、標準ビル（レファレンスビル）を基準とした評価をしている（図-1、2）。これらの指標からも、早期のZEB実現に向けた動きが活発に進められていることがわかる。

ZEBの実現性の評価には、建物の敷地内（オンサイト）において、年間エネルギー消費量に対し、年間エネルギー生産量が同等である必要があり、建物への創エネルギーおよび、省エネルギー技術の導入効果の予測が必須となる。既報²⁾において、ZEBの実現性を評価するため、建物の原単位シミュレーションプログラム³⁾を用いて、建物外皮、照明・空調設備についての一般的な省エネルギー技術の導入効果を予測した。また、(独)建築研究所より「一次エネルギー消費量WEB算定プログラム」⁴⁾が公開されており、建物のエネルギー消費量の予測、汎用的な省エネルギー技術の導入効果について、比較的容易に計算することができるようになった。

しかし、省エネルギー技術の中でも、再生可能エネ

ルギーを利用する場合には、上記のプログラムが対応できないことが多い。ZEBの実現には、再生可能エネルギーの利用は重要な課題であり、これらの技術の導入効果の予測も必須となる。

本検討では、再生可能エネルギーを利用する空調シス

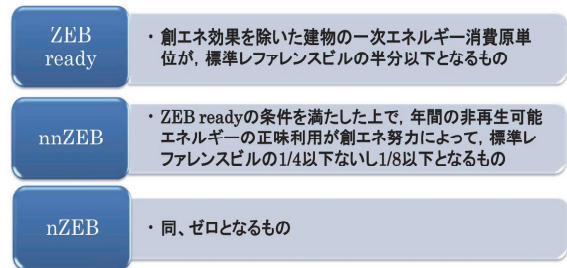


図-1 ZEBの定義 (空気調和衛生工学会)

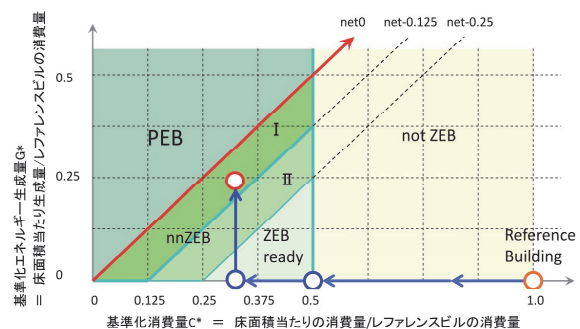


図-2 ZEBの実現性評価

* 技術研究所

テムとして、地中熱利用空調システムと、太陽熱利用空調システムについてのエネルギー量を予測し、導入効果を評価した。地中熱利用空調については、適用対象とする部屋の熱負荷に対して、導入効果が最大となる熱交換井の計画方法について示した。太陽熱利用空調システムについては、夏期のデシカント外調システムを対象に、太陽熱集熱パネルの設置面積と集熱量、集熱効率の関係を示し、その考察をした。

2. 地中熱利用空調システムの評価

2.1 概要

図-3に地中熱利用空調システムの概要を示す。地中熱利用空調システムは、クローズド・ループ型と、オープン・ループ型の二つに大別される。オープン・ループ型は地下水をくみ上げその熱を利用する方式である。地下水の有無や、地下水の利用・排水に関する地域の条例によって採用の可否が決まり、国内での採用は比較的少ない。クローズド・ループ型は、熱交換井と地中熱源ヒートポンプの間に冷熱媒を循環させ、地中熱を利用する方式であり、一般的に多く採用されている。本検討では、クローズド・ループ型を対象とし、その年間エネルギー削減量を評価する。

2.2 評価方法

地中熱利用空調システムは、年間で安定した温度を保つ地中との熱交換によって省エネルギーを図る空調システムであり、外気と熱交換をする空気熱源空調システムと対比される。よって、地中熱利用空調システムの導入効果を、空気熱源利用空調システムを導入した場合との年間のエネルギー消費量の差によって、評価するものとした。

2.3 各システムの年間エネルギー消費量の計算方法

年間エネルギー削減量の計算方法を図-4に示す。気象データ、建物モデルをもとに、各システムの年間熱負荷を計算する。年間熱負荷をもとに、地中熱利用空調システム、空気熱源空調システムの年間エネルギー消費量を予測する。地中熱利用空調システムについては、熱交換井

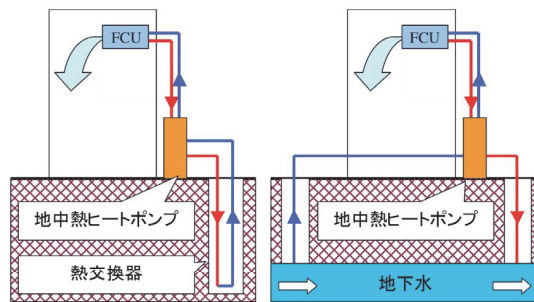


図-3 地中熱利用空調システム

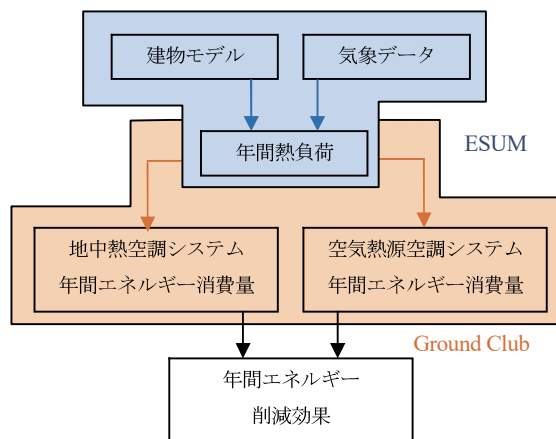


図-4 年間エネルギー削減効果の予測

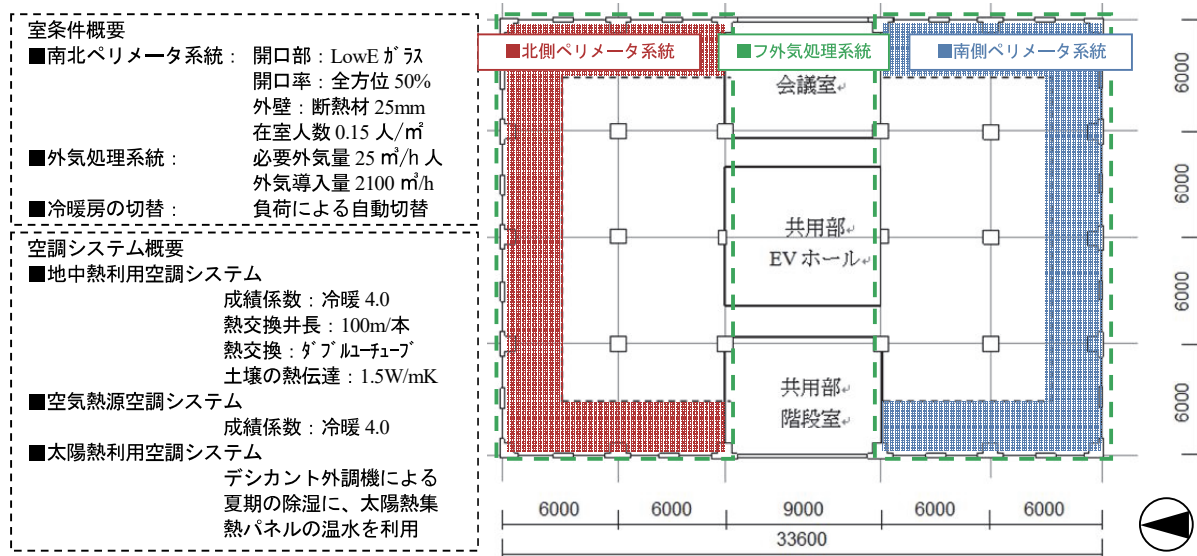
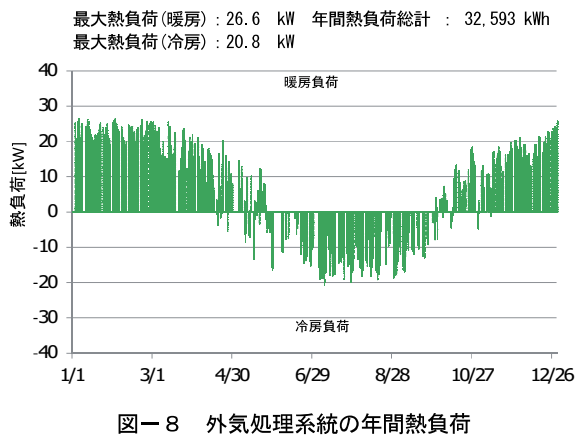
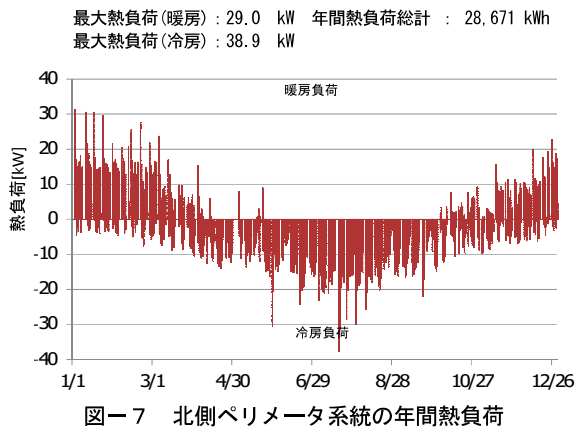
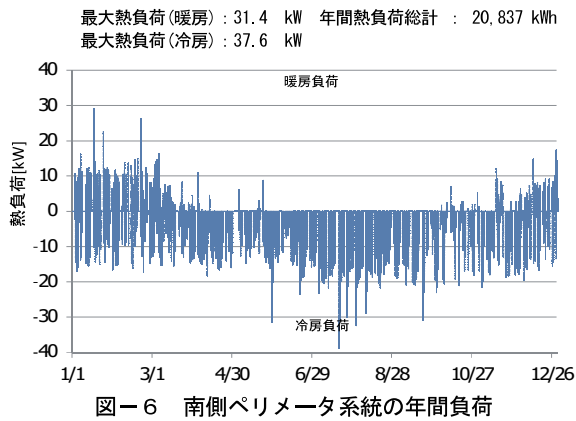


図-5 室・空調モデル

の本数別に年間エネルギー消費量を計算する。両システムの年間エネルギー消費量の差分をとり、地中熱利用空調システムを利用した場合の年間エネルギー削減量を予測する。

建物モデルの構築、年間熱負荷の計算には、ESUM ver5.0³⁾を用いる。空気熱源空調システム、地中熱利用空調システムの年間エネルギー消費量の予測には Ground Club ver1.0⁵⁾（地中熱利用空調システムのエネルギー消費量予測プログラム）を用いる。

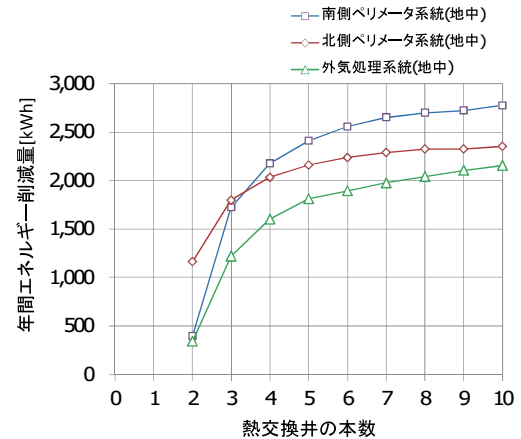
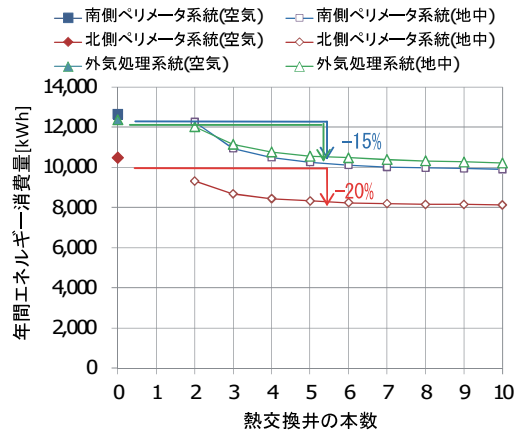


2.4 建物・空調モデル

建物・空調モデルを図-5に示す。中央に東西軸のコアをもつオフィスのワンフロアで、南北に執務室をとる。高断熱仕様とし、開口部には Low-E 複層ガラスを、外壁には 25mm の断熱材を用いる。開口率は各方位共通で 50%とする。地中熱利用空調システムの熱処理の系統は、南側ペリメータ、北側ペリメータ、外気処理の 3 種とする。冷暖房の切り替えは、熱負荷に応じて自動的になされるものとする。ヒートポンプの成績係数は冷暖 4.0 とし、室内機はペリメータ 8 台、外気処理 4 台とする。

2.5 各ゾーンの年間熱負荷

各ゾーンの年間熱負荷の計算結果を図-6、7、8に示す。南側ペリメータ系統は、通年で冷房負荷が発生している。建物の断熱性能が高いため、日射の浸入熱が影響しているものと推察される。外気処理系統、北側ペリメータ系統は、冷房熱負荷と暖房熱負荷の変化が、夏冬の季節の変化に合致している。年間熱負荷の総計は、外気処理系統が最も大きく、次いで北側ペリメータ系統、南側ペリメータ系統の順となった。最大熱負荷は、南側ペリメータ系統が最も大きく、次いで北側ペリメータ系統、外気処理系統の順となった。



2.6 各系統の年間エネルギー消費量

予測した年間熱負荷をもとに、空気熱源空調システム、地中熱利用空調システムの各系統の年間エネルギー消費量を算出した。結果を図-9に示す。

南側ペリメータ系統と外気処理系統の年間エネルギー消費量は、ほぼ同じ推移となり、北側ペリメータ系統が最も少ない結果となった。各系統とも、空気熱源空調システムと比較し、地中熱利用空調システムのほうがエネルギー消費量が少なくなっている。熱交換井を5本採用した場合、南側ペリメータ系統、外気処理系統で20%、北側ペリメータ系統で15%のエネルギー削減効果が得られた。また、熱交換井が5本以上になると、年間エネルギー消費量の変化はほとんどなくなっている。これは熱交換が十分進み、冷熱媒の温度が安定するためと推察される。なお、各系統とも熱交換井が1本の場合、冷媒が凍結したため計算不能となった。

図-10に、空気熱源空調システムと比較した場合の年間エネルギー削減量を示す。4本以上の場合、年間エネルギー削減量は、南側ペリメータ系統が最も大きくなり、次いで北側ペリメータ系統、外気処理系統の順となった。

2.7 各系統の熱交換井の決定

a. 熱交換効率と最大熱負荷による決定法

熱交換井の適切な本数は、系統の最大熱負荷をもとに、地中熱ヒートポンプの成績係数、熱交換井の効率（オフィス：70W/m）を用いて、式(1)で概算できる⁶⁾（以下、これを概算法と称する）。この方法で計算すると、熱交換井は、南側ペリメータ系統で7本、北側ペリメータ系統で7本、外気処理系統で4本、合計で18本となる。この時の年間エネルギー削減量は、6,539kWhとなる。

$$n = \frac{1}{D} \cdot \frac{q_m}{q_L} \left(1 + \frac{1}{C_{COP}} \right) \quad (1)$$

- n : 系統への熱交換井の設置本数[本]
- D : 熱交換井1本当たりの長さ[m](= 100)
- q_m : 時刻別冷房負荷の最大値[W]
- C_{COP} : 地中熱ヒートポンプの成績係数(= 4)
- q_L : 単位長さ当たりの熱交換量[kW/m]
(= 70(一般オフィス))

概算法を用いる場合、最大熱負荷をもとに熱交換井の設置数を決めるが、年間エネルギー削減量の観点からは、必ずしも効率の良い設置数になると限らない。南北ペリメータエリア系統は、最大熱負荷については外気処理系統より大きいので、熱交換井は7本必要な計算となっている。しかし図-10では、エネルギー削減量を大きくするためには、南側ペリメータ系統への熱交換井6本から7本に増加させるより、外気処理系統を4本から5本に増加させた方がよいことがわかる。

b. 最適配分による決定法

そこで、年間エネルギー削減量を増大させる観点から、熱交換井を各系統に最適に配分する計画について検討した。年間エネルギー削減量の総和を最大とする目的関数(式(2))を定め、熱交換井の総和についての制約条件(式(3))のもとで、各系統の熱交換井本数の組合せ最適解を解いた。解法には遺伝的アルゴリズムを用いた。

$$\text{目的関数: } E_{\max} = E_s + E_n + E_a \quad (2)$$

$$\text{制約条件: } N \geq n_s + n_n + n_a \quad (3)$$

E_s : 地中熱利用による南側ペリメータ系統の年間エネルギー削減量

E_n : 地中熱利用による北側ペリメータ系統の年間エネルギー削減量

E_a : 地中熱利用による外気処理系統の年間エネルギー削減量

N : 設置可能な熱交換井の総本数

n_s : 南側ペリメータ系統の熱交換井本数

n_n : 北側ペリメータ系統の熱交換井本数

n_a : 外気処理系統の熱交換井本数

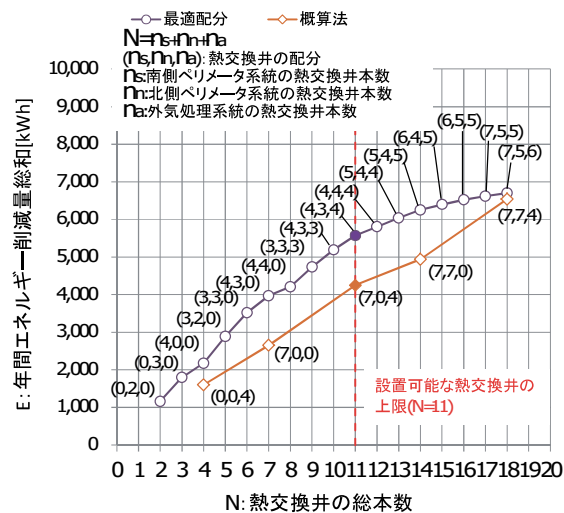


図-11 熱交換井の最適配分

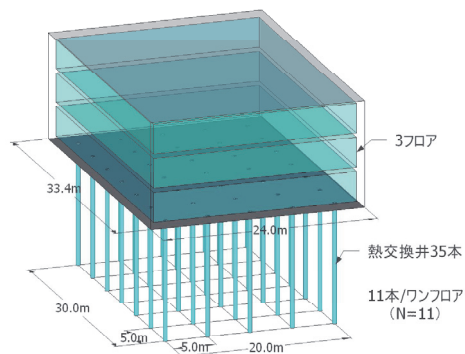


図-12 建物・熱交換井モデル

結果を図-11 に示す。概算法に基づく配分方法も図中に示している。すべての N において、概算法による配分方法と比較して、年間エネルギー削減量をより大きくする別の配分方法があることが確認できる。その効果は N が増加するに従い逓減していき、N=18 で概算法とほぼ等しくなっている。

c. ボリュームスタディ

熱交換井の本数の上限は、設置可能な敷地面積によって決まる。図-5 のフロアを基準階に持つ3階のオフィス(図-12)をモデルとし、ワンフロア当たりの熱交換井の設置可能本数を検討した。相互に熱干渉が無いよう各熱交換井の設置間隔を5mとし⁷⁾、設置可能な面を建築面より内側とすると、熱交換井はワンフロア当たり11本設置可能となる。最大熱負荷を用いた概算法をもとに11本の設置を計画すると、南側ペリメータ系統に7本、外気処理系統に4本設置することで、4,251kWhの年間エネルギー削減量を得ることができる。組合せ最適解によれば、南側ペリメータ系統に3本、その他の各系統に4本配分することで、5,571kWhの年間エネルギー削減量を得ることができる。これは概算法と比較してエネルギー削減率が31%大きい計画となる。

3. 太陽熱利用空調システムの検討

3.1 概要

太陽熱利用空調システムは、太陽熱集熱パネルによって温水を生成し、それを補助熱源として空調システムに利用する。生成した温水は、冬期の暖房に利用することが一般的である。最近では年間で温水を無駄なく利用できるよう、夏期においても温水を有効利用できる空調システムが注目されている。

本検討では、太陽熱によって生成した温水を、デシカント外調機に利用し、夏期の高湿空気の除湿に用いるデシカント外調システムについて、太陽熱集熱パネルを組み込んだ場合の夏期4カ月の集熱量を予測し、評価する。

3.2 デシカント空調による除湿の仕組み

図-13 に、デシカント外調機の原理を示す。導入外気は、デシカントロータを通ることで除湿され、高温低湿の空気なる。この空気を、顕熱交換機を通じて室内の還気と熱交換させて冷却し、さらに設計温度まで冷却器で調整し、室内へ供給する。室内からの還気は、顕熱交換機を通ることで温度上昇し、さらに温水コイル等によって温度を上げ、高温低湿空気とする。これをデシカントロータに通し、顕熱を与えることで、デシカントロータの除湿機能を再生させる。デシカントロータを再生させる際に、熱エネルギーが必要となるので、夏期に温水を有効利用できる空調システムとなっている。

3.3 空調システムモデル

今回検討した、太陽熱利用空調システムを図-14 に

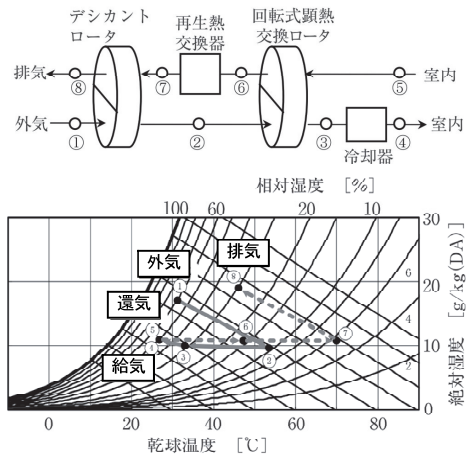


図-13 デシカント空調の原理⁸⁾

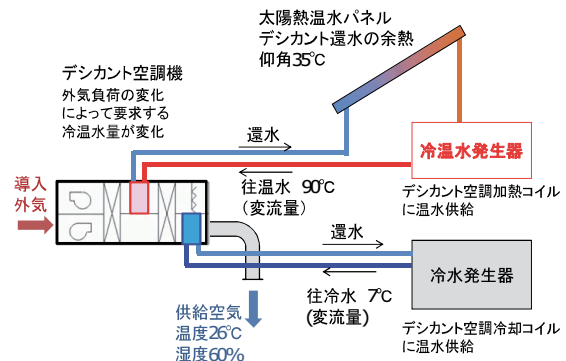


図-14 デシカント外調システム

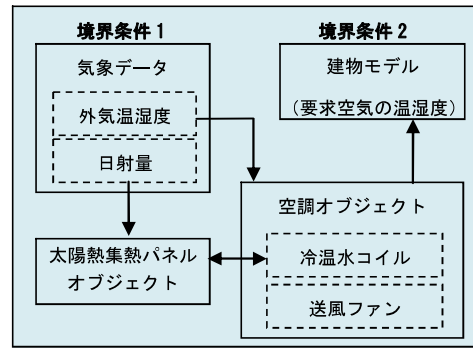


図-15 計算方法

示す。外気導入量は図-5 に示す建物モデルに従い2100 m³/h とする。デシカント外調機の除湿用温水コイルに、冷温水発生器で生成した温水を供給する。処理後の温水(還水)を太陽熱集熱パネルによって予熱することで、冷温水発生機へ作用する負荷を減らす。太陽熱集熱パネルは南向き仰角35°で設置し、パネル面積を1m²、3m²、10m²、20m²の4パターンでそれぞれ検討する。

3.4 評価方法

太陽熱集熱パネルの導入効果は、夏期4カ月(6~9月)に空調に利用した温水の総熱量(以下、集熱量)によって評価する。

3.5 集熱量の算定方法

集熱量の算定には LCEM ツール⁹⁾を用いる。LCEM ツールは、様々な空調機器の機能をオブジェクト化し、それらを接続させることで、空調システム全体のエネルギー消費量をシミュレーションする。

LCEM ツールを用いた集熱量の計算方法を図-15 に示す。夏期の外気温湿度と、室内の設計の温湿度を境界条件とし、外気温湿度を、室内の設計温湿度にするために必要な熱量を各空調機器のオブジェクト内で計算する。空調オブジェクト内の温水コイルの関数と、太陽熱集熱パネルのオブジェクトを関連付けを与え、温水コイルから温水の要求がある時に、太陽熱集熱パネルで温水が生成される。この時の温水の熱量を予測する。

3.6 太陽熱集熱パネルの集熱量の予測結果

a. デシカント外調機使用時の空気質の変化

32℃、52%の外気が除湿されるまでのシミュレーション結果を、図-16 に示す。外気がデシカントロータによって除湿され、室内の還気との熱交換・冷水コイルによる冷却を経て、室内に供給されている状況がシミュレーションされている。また、顕熱交換を経た還気が、温水コイルによって加熱され、デシカントロータの再生に回っている状況も再現できている。

b. 太陽光発電パネルとの導入効果の比較

太陽熱集熱パネルの夏期の集熱量の算定結果を図-17 に示す。パネルの面積が大きくなるほど、集熱量は増えるが、単位面積当たりの集熱効率は、低下する結果となった。面積が増加するにつれ、生成可能な温水が増加するが、その分、供給温水が過剰となり全体の効率が低下しているものと思われる。効率の良いシステムを設計するには、建物側の温水の需要を考慮し、供給量が過剰となる場合に蓄熱に回すなどの機能が重要である。

4. まとめ

執務フロアを対象とし、地中熱利用空調システム、太陽熱利用デシカント外調システムの導入効果に関してケーススタディをし、以下の結論が得られた。

- i. 地中熱利用空調システムについては、各システムの年間エネルギー削減量の総和を最大とする配分方法について提案した。最大熱負荷によって熱交換井の本数を設計する方法と比較し、エネルギー削減効率が31%高い結果となった。
- ii. 太陽熱利用デシカント外調システムについて、太陽熱集熱パネルの面積と集熱量の関係を求めた。パネル面積を増すことで、全体の集熱効率が下がる傾向を把握した。建物の需要熱量とパネルの供給熱量のバランスを考慮し、蓄熱機能を備えたシステム構築が重要であるとの知見を得た。

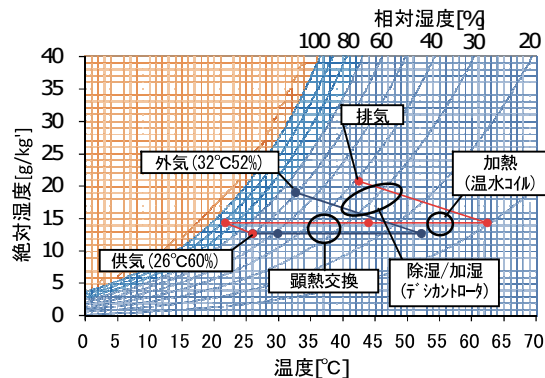


図-16 空気質の変化のシミュレーション

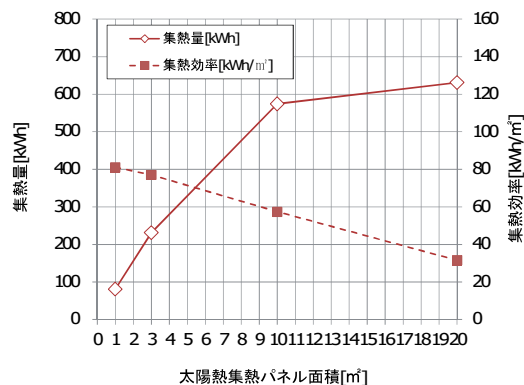


図-17 パネル面積別集熱量(夏期4カ月)

今後は、地中熱利用空調とその他の空調システムの最適な組合せの検討、太陽熱の年間のシステム効果について検討し、ZEBの実現に向け、設計に資する知見を深めていきたい。

【参考文献】

- 1) 倉淵 隆、「ニアリー・ネット・ゼロ・エネルギー・ビル (nnZEB) 普及に関する国際動向と目標」、東京都環境建築フォーラム 講演資料、2014.03.25
- 2) 「ネットゼロエネルギービルに関する研究」、奥村組技術研究年報、No.38、2012.09
- 3) (財)省エネルギーセンター、「業務用ビルのエネルギー原単位管理ツール ESUM ver.5.0」
- 4) (独)建築研究所一次エネルギー消費量 WEB 算定プログラム
- 5) ゼネラルヒートポンプ工業(株)、「Ground Club ver 1.0」
- 6) 国土交通省、「官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン(案)」、2013.10
- 7) 北海道大学、「地中熱ヒートポンプシステム」、オーム社、2007.09.25
- 8) (社)空気調和衛生工学会、「空気調和衛生工学便覧 第14版 空調設備編」
- 9) (社)公共建築協会「ライフサイクルエネルギーマネジメント LCEM ツール ver 2.0」