

国土技術政策総合研究所 プロジェクト研究報告

PROJECT RESEARCH REPORT of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.54

March 2017

再生可能エネルギーに着目した建築物への新技術導入に関する研究

Research on Introduction of New Technologies for Buildings with a Focus on the Renewable Energy

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

再生可能エネルギーに着目した建築物への新技術導入に関する研究

西山 功 (2011 年 4 月-2012 年 3 月)

*

向井 昭義 (2012 年 4 月-2014 年 3 月)

**

Research on Introduction of New Technologies for Buildings with a Focus on the Renewable Energy

Isao Nishiyama (Apr. 2011-Mar. 2012)

Akiyoshi Mukai (Apr. 2012-Mar. 2014)

概要

本研究は、住宅を含む建築物において、太陽光、地中熱等の再生可能エネルギーの導入を図ることを目的として、再生可能エネルギーの事例調査、地中熱利用の実証実験を行い、再生可能エネルギーの 1 次エネルギー評価技術の開発に取り組んだものである。

キーワード : 再生可能エネルギー 太陽光 地中熱

Synopsis

This research aims to disseminate buildings and houses using renewable energy such as solar powers and geothermal heats. An anecdotal survey on renewable energy, a demonstration experiment on geothermal heat pump system were carried out to develop an estimation method of solar power systems and geothermal heat systems in primary energy consumption.

Key Words : Renewable Energy, Solar Energy, Soil Heat

*

前 建築研究部長

Former Director of Building
Department

**

建築研究部長

Director of Building Department

担当研究者一覧

◆プロジェクトリーダー

建築研究部長 西山功（平成 23.4～24.3）

建築研究部長 向井昭義（平成 24.4～26.3）

◆プロジェクトメンバー

建築研究部環境・設備基準研究室 室長 足永靖信（平成 23.4～26.3）

同室 主任研究官 秦良昌（平成 23.4～23.6）

同室 主任研究官 久保田裕二（平成 23.7～26.3）

同室 主任研究官 西澤繁毅（平成 21.4～26.3）

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

政府は、2020年度までの温暖化ガス排出量を05年度比で3.8%削減する目標を提示し、世界最高水準の省エネを更に進める必要性を指摘するとともに、エネルギーミックスの検討の進展を踏まえて、確定的な目標を今後設定するとしている¹⁾。

「低炭素社会に向けた住まいと住まい方推進会議」は、2030年までに新築建築物の平均でZEH（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス）、ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビルディング）を実現することを目標に掲げ、建築物において、再生可能エネルギーの導入によるエネルギーの有効利用の促進を提唱している²⁾。

「再生可能エネルギーの固定価格買取制度（2012年7月1日開始）」は、再生可能エネルギーで発電された電力をその地域の電力会社が一定の価格で買い取ることを義務づけたものであり、制度導入により太陽光発電等の設備容量の増加傾向が近年見られる³⁾。

このような経緯を踏まえると、建築物における再生可能エネルギーの利活用は、我が国の省エネルギー施策において重要な視点であり、エネルギーの有効利用の面から技術情報の整備や導入効果の定量化が求められていると言える。

1.2 本研究の目的

本研究は、住宅を含む建築物において、太陽光、地中熱等の再生可能エネルギーの導入による省エネルギー効果の評価技術を開発することを目的とする。

本研究で取り扱う再生可能エネルギーについて以下に補足する。

再生可能エネルギーについて、国際再生可能エネルギー機関（International Renewable Energy Agency）は、「再生することが可能な資源から持続可能な方法で生産されるあらゆる形態のエネルギー」と定義している⁴⁾。表1.1に各種再生可能エネルギーを一覧する。再生可能エネルギーの利用形態には、電気と熱があり、それぞれ、再生可能エネルギー電気⁵⁾、再生可能エネルギー熱⁶⁾と呼ばれることがある。

このうち、太陽光発電は、再生可能エネルギーの代表格とも言えるものであり、導入実績も相当見られることから、省エネルギー効果の評価技術として優先的に整備する必要がある。研究開発の進展状況や関連JISの整備状況も踏まえ、本研究では太陽光発電に関連する手法を取りまとめた。

再生可能エネルギーの熱利用に関しては、近年導入が進みつつある、地中熱利用を中心に扱うこととする。地中熱利用の研究事例は過去いくつか見られるが、省エネルギー効果の評価技術として十分な検証がなされているとは言い難い。また、地盤から蓄採熱を行う際に、地盤の熱容量の関係で外気温度とは異なる熱源特性が予見され、地下水の流動

など複雑な伝熱機構を扱う必要がある。以上を踏まえ、本研究では実証データの取得や評価モデルの開発も含めて検討を実施した。

表 1. 1 各種再生可能エネルギー

種別	再生可能エネルギー ^a	再生可能エネルギー電気 ^b	再生可能エネルギー熱 ^c
エネルギー源	バイオマス	バイオマス	バイオマス熱
	地熱	地熱	地中熱
	水力		河川熱
	海洋		海水熱
	太陽光	太陽光	太陽熱
	風力	風力	
			雪氷熱
			下水熱
			温泉熱

a 国際再生可能エネルギー機関憲章

b 電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法

c エネルギー基本計画

1.3 本研究の構成

本研究の構成を図 1. 1 に示す。第 1 章は、再生可能エネルギーに着目した建築物への新技術導入に関する研究の背景、目的などを述べた。第 2 章では、再生可能エネルギーの利活用事例や太陽光発電の規格について文献調査を行うとともに、太陽光、地中熱のコスト面の分析も行った。第 3 章においては、実際に 50m のボアホールを掘削し、サーマルレスポンス試験を行い、地中熱ヒートポンプを駆動させて、電力消費量や地中温度などのデータ取得の結果を述べた。第 4 章は再生可能エネルギーとして、太陽光、地中熱を取りあげ、これらの評価技術を作成するとともに、標準的なオフィスに適用した場合の、エネルギー消費量削減効果を調べた。第 5 章は総括であり、本研究で得られた知見と今後の課題を述べた。

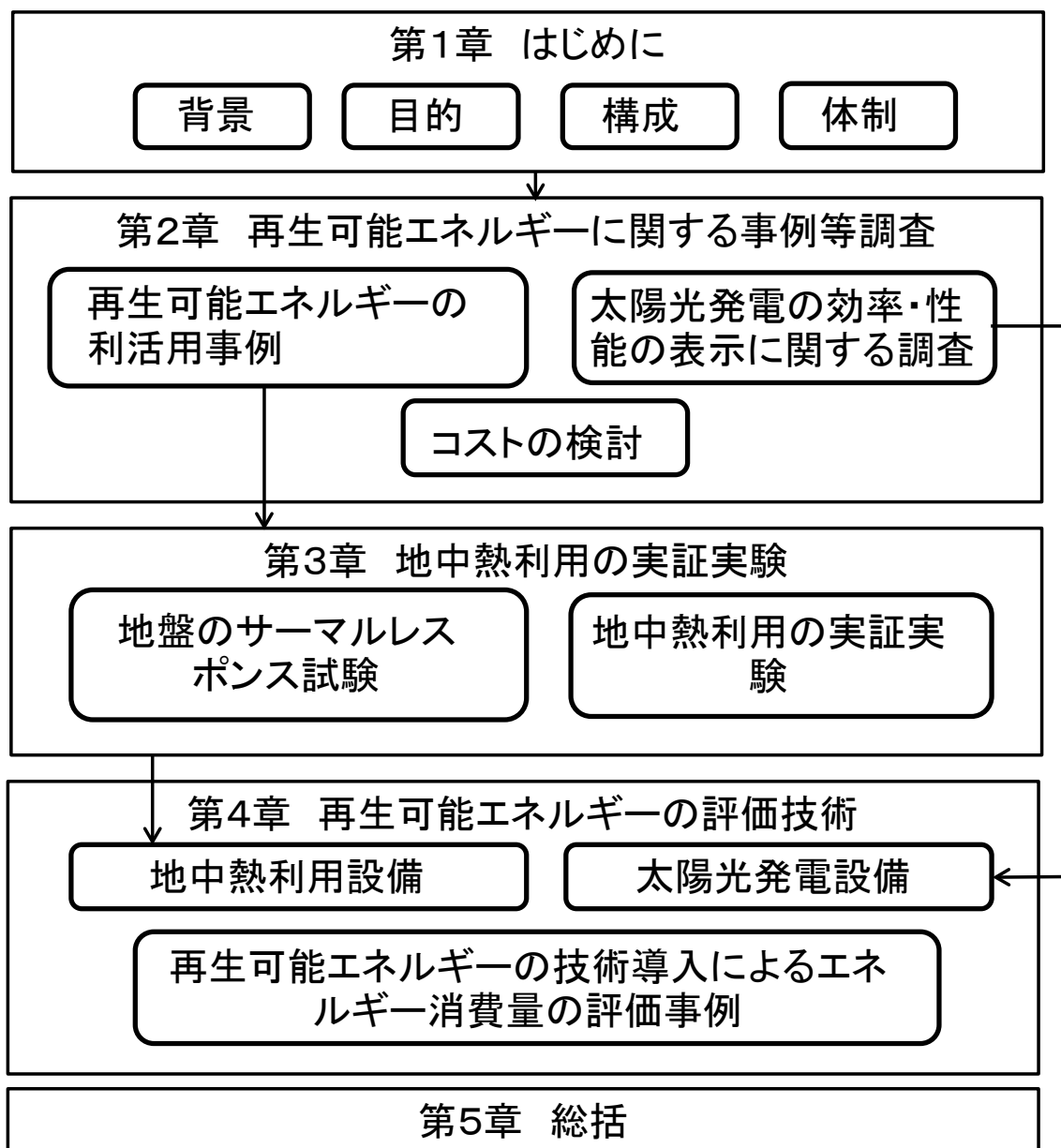


図1. 1 再生可能エネルギーに着目した建築物への新技術導入に関する研究の構成

1.4 本研究の体制

本研究は国総研建築研究部が中心となって、図1. 2に示す機関とともに実施したものである。省エネルギー基準に関しては本省住宅局、公共建築物のガイドライン等の技術情報に関しては官庁営繕部、実証実験に関しては国立研究開発法人建築研究所と連携し、外部有識者や特定非営利活動法人地中熱利用促進協会にも参考意見をいただきながら作業を進めた。また、本課題は国総研のプロジェクト研究として、国総研外部評価委員会において事前評価（国土技術政策総合研究所研究評価委員会平成22年度分科会報告書、平成23年3月、<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0634.htm>）、事後評価（国土技術

政策総合研究所研究評価委員会平成 26 年度分科会報告書、平成 27 年 9 月、
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0850.htm>) がそれぞれ実施された。

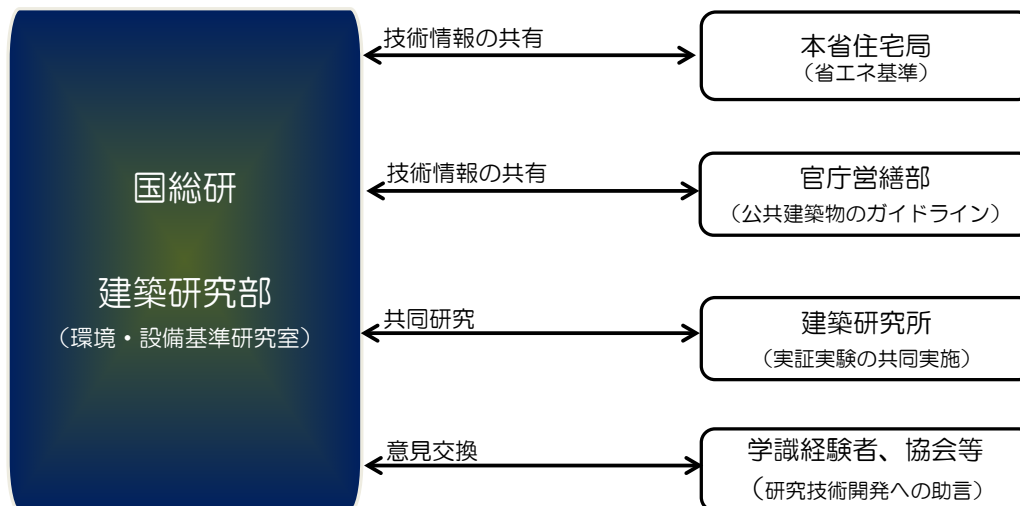


図 1. 2 研究体制

第2章 再生可能エネルギーに関する事例等調査

2.1 目的

再生可能エネルギーに着目した建築物への新技術導入に関する研究を実施するに当たり、第2章では、再生可能エネルギーに関連する事例調査を行うこととする。本章で実施した検討内容について以下に概要を示す。

(1) 再生可能エネルギーの利活用事例

国内外で再生可能エネルギーが先進的に導入されている事例を収集し、概要、特徴等を整理した。

(2) 太陽光発電の効率・性能の表示に関する調査

太陽光発電の性能、効率の表示に関する調査を行うとともに、太陽電池の性能評価方法の高度化に関する取り組み事例を整理した。

(3) コストの検討

太陽光、地中熱等の再生可能エネルギーの利活用においては初期コストが発生し、設備導入時の障壁となる可能性があるため、初期・運用時のコストについてデータを整理した。

2.2 再生可能エネルギーの利活用事例

国内外で再生可能エネルギーの利活用に関する事例について、文献調査により表2.1に示す19件の施設を抽出した。再生可能エネルギーの用途としては表1.1で示した熱、電気を考える。各施設に関する要件(①導入目的・経緯、②導入主体と対象建築物、③エネルギー種別、④再生可能エネルギーシステムの概要)を以下に述べる。

(1) ゼロエミッションハウス(北海道留寿都村)⁷⁾

①導入目的・経緯

北海道のゼロエミッションは、我が国の優れたエネルギー・環境技術を発信するため、北海道洞爺湖サミットにおいて、国際メディアセンター(IMC)に隣接する形で、太陽光発電、燃料電池、有機EL照明等の先端技術を備えた住宅として建設が行われた。サミットは、2008年7月7～9日の間、北海道洞爺湖町において開催されたが、サミット会場となるザ・ウィンザーホテルから約27kmのルスツリゾート内に「国際メディアセンター」(約11,000 m²)が建設された。ゼロエミッションハウスは、このセンターの屋外駐車場に、環境技術を展示する政府主催の「環境ショーケース」の一貫として、新エネルギー・産業技術総合開発機構、産業技術総合研究所によって建設された。単に太陽光発電システム、風力発電機といった再生可能エネルギー機器を入れただけでなく、ヒートポンプ給湯

表 2. 1 再生可能エネルギーの利活用施設

		場所	事例	建築物					エネルギー					
				住宅	オフィス	学校	ホテル	公共施設	太陽光発電	太陽熱利用	地中熱利用	地下水熱利用	風力発電	その他
国内	1	北海道虻田郡留寿都村	ゼロエミッションハウス	●					○				○	○
	2	北海道長沼町	個人住宅	●						○	○			
	3	北海道札幌市	札幌市立大学桑園キャンパス			●					○			
	4	山形県酒田市・鶴岡市	東北公益文科大学			●			○					
	5	山形県川西町	フレンドリープラザ雪冷房システム					●						○
	6	群馬県太田市	集中連系型太陽光発電システム	●					○					
	7	栃木県宇都宮市	のざわ特別支援学校			●				○	○			
	8	埼玉県秩父市	次世代型環境学習施設 吉田元気村					●	○					○
	9	神奈川県横浜市	劇団四季芸術センター本館		●				○					
	10	長野県大町市	緑翠亭景水				●					○		○
	11	静岡県浜松市	学校法人中野学園 オイスカ高等学校			●			○	○				
	12	兵庫県神戸市	パナホーム パナホーム・シティ西神南	●					○					
	13	香川県高松市	サンポート高松地区熱供給センター		●		●	●						○
	14	福岡県北九州市	ゼロエミッションビル		●				○		○			
海外	15	UAE	Masdar City	●	●	●	●	●	○	○			○	○
	16	ドイツ	Bonner Bogen		●	●	●				○	○		
	17	デンマーク	Sol 300	●					○					
	18	オランダ	Stad van de Zon	●					○				○	
	19	オーストラリア	Olympics Village	●					○					

機、燃料電池システム、環境配慮建材等の最新技術を備え、耐震性・断熱性など日本の工業化住宅の優れた技術を駆使した近未来型住宅となっている。

住宅本体は、積水ハウスが提供したが、様々なメーカーが最先端の機器を提供した。なお、サミット終了後は、茨城県古河市の積水ハウスの施設「ゼロエミッションセンター」に移築され、「茨城県次世代エネルギーパーク」の一つとして、公開されている。

②導入主体と対象建築物

- ・住所：北海道虻田郡留寿都村字泉川 13 番地（ルスツリゾート内）
- ・施設面積：約 280 m²（住居側：約 200 m²、足湯コーナー側：約 80 m²）
- ・構造：鉄骨造、積水ハウスによる工業化住宅
- ・主催：経済産業省
- ・共催：新エネルギー・産業技術総合開発機構、産業技術総合研究所、新エネルギー財団
- ・協賛企業・団体：（有）アイバン、アキレス（株）、（株）INAX、（株）ENEOSセルテック、（株）荏原製作所、MRC・ホームプロダクツ（株）、カゴメ（株）、キャノン（株）、九州電力（株）、グリーンライフ21・プロジェクト、サッポロビール（株）、サンウェーブ工業（株）、三洋電機（株）、シャープ（株）、（財）新エネルギー財団、新東（株）、新日本石油（株）、積水ハウス（株）、積水化学工業（株）、（株）セブン&アイ・ホールディングス、ゼファー（株）、ソニー（株）、太平洋セメント（株）、（株）知能システム、東京ガス（株）、東芝キャリア（株）、トヨタ自動車（株）、日本電気（株）、日本板硝子（株）、日本自然エネルギー（株）、日本テレコミュニケーションシステム（株）、日立アプライアンス（株）、（株）日立製作所、富士通（株）、北海道ガス（株）、本田技研工業（株）、松下電

器産業（株）、松下電工（株）、（株）マテリアルハウス、三菱重工業（株）、三菱電機（株）、
（財）山形県産業技術振興機構有機エレクトロニクス研究所

③エネルギー種別

本住宅に導入された再生可能エネルギーは、太陽光発電システムと小型風力発電であるが、それ以外にもエネルギー・環境対策に関連した以下の機器等が設置・展示された。

- ・ポータブルリチウム電源装置
- ・有機EL照明
- ・高効率ヒートポンプ給湯機
- ・家庭用燃料電池システム
- ・環境配慮建材（エコセメント、調湿建材、間伐材・廃棄木材利用木質材料）
- ・ハイブリッド断熱ボード
- ・光ダクトシステム
- ・軽量鉄骨造の工業化住宅（制震構造・防汚塗装外壁採用）
- ・燃料電池システム実機運転による足湯コーナー
- ・家電製品（液晶パネルTV等）
- ・計画換気システム

④再生可能エネルギーシステムの概要

- ・太陽光発電システム（提供：積水ハウス（株））：建材一体型瓦型太陽光発電システム、14.5kW、シャープ製発電パネル
- ・小型風力発電機（提供：ゼファー（株））：ゼファー社製エアドルフィン、定格出力 1kW（風速 12.5m/s）

なお、本施設は、サミット期間中の短期間に展示されたもので、実際の居住者はなく、発電実績や省エネルギー効果については公表されていない。

（２）実用ローエネルギー型住宅（北海道長沼町）⁸⁾

①導入目的・経緯

欧州北部で普及している地中熱ヒートポンプは、わが国でも普及しつつある。特に灯油の消費量が多い北海道などの寒冷地では、2008年の灯油価格高騰の影響もあり、住宅、事務所ビル、商業施設などで冷暖房や融雪用途に幅広く導入されるようになった。これらのシステムを販売・施工する企業も増加しているが、（株）日伸テクノは、北海道で118カ所（2009年10月時点）の納入実績がある。同社が施工した北海道長沼町の個人住宅には、地中熱ヒートポンプと太陽光発電が両方導入されており、高い省エネルギー性能を実現したことから、空気調和・衛生工学会の第5回振興賞住宅環境設備賞を受賞している。

②導入主体と対象建築物

・導入主体：個人

・住所：北海道長沼町

・建築物概要 延床面積：200 m²、床暖房面積：154 m²、屋根厚さ：216mm、壁厚さ：186mm、床スラブ厚さ：250mm、Q 値：0.96W/(m²・K)、C 値：0.42cm²/m²、窓面積：83m²（南面 63%）、窓タイプ：Low-E Triple with Argon gas（K 値：1.3W/(m²・K)）、完成：2005 年 11 月

③エネルギー種別

本住宅に導入された再生可能エネルギーは、地中熱ヒートポンプと太陽光発電が導入されている。それ以外の特徴としては、高断熱・高気密住宅であり、エコキュートや熱回収型熱交換機などが導入されたオール電化住宅である。

④再生可能エネルギーシステムの概要

このローエネルギー型住宅は、暖房設備として地中熱ヒートポンプシステムを採用している。深さ 100m のボアホールに、シングル U 字型のチューブを挿入し、不凍液を循環させることにより採熱を行っている。住宅全体には、床暖房がなされ（敷設率 73%）、ふく射熱により住宅全体をムラなく暖め、ヒートショックなど身体にかかる熱的ストレスのリスク低減に役立つ。足元から温めるので、上下温度の差が小さく、自然な暖かさが快適性を高める。音的に静かな暖房方式であるとともに、暖房送水温度は低めの 30℃設定が可能で COP は 3.7 と高い数値が得られている。

南面の屋根には、鋼板横葺型屋根材一体型の太陽光発電装置（PV パネル）が設置されている。設置面積 60 m² で発電規模は、6.8kW である。住宅用の太陽光発電システムの平均的な規模よりも大きい設備が導入されているが、当該地域は冬季に晴天が少ないため、電力需要の大きい冬場の発電量が少ないという課題がある。

本住宅では、地中熱ヒートポンプの研究を行っている北海道大学が協力し、省エネルギー性能を評価している。本住宅では、年間の電力消費量約 9,400kWh に対し、太陽光発電システムによる発電量は 4,500kWh となり、エネルギー自給率は 48.3% となったと報告されている。また、一般的な住宅と比較すると 84% 消費エネルギーを削減したとし、ランニングコストも 75% 削減できたとされている。ただし、日本の平均的な太陽光発電システムの発電量は、1kW あたり 1,000kWh であるが、本住宅では、6.8kW の能力に対し、4,500kWh にとどまっている。暖房需要の大きい冬場は、発電量が大きく落ち込むため、自給率は悪化する結果となっている。

（３）札幌市立大学桑園キャンパス基礎杭方式地中熱利用システム（北海道札幌市）⁹⁾

①導入目的・経緯

地中熱利用システムは、地中に専用の熱交換器を埋設する方法が取られるが、埋設コス

トを軽減させるため、建築物の基礎杭を利用する方式がスイスなど欧州で広がりを見せている。国内でも大学、自治体の研究機関、企業等による研究開発が実施されており、事例も増加傾向にある。例えば、スカイツリー周辺の地域冷暖房では、この方式が国内の地域冷暖房の熱源としては、初めて採用される予定となっている。

札幌市立大学では、桑園キャンパスを増築するにあたって地中熱の利用を決定し、新日鉄エンジニアリングが開発した鋼管基礎杭を利用する地中熱利用システムを採用した。建築物は、平成 18 年（2006 年）4 月に竣工している。

②導入主体と対象建築物

- ・導入主体：札幌市
- ・住所：北海道札幌市中央区北 11 条西 13 丁目
- ・建築物概要

増築された建築物は、延床面積が合計 4,862m² の鉄筋コンクリート造地上 4 階建てであるが、地中熱利用は、そのうち約 2,800m² を対象としている。

③エネルギー種別

本事業で採用されている再生可能エネルギーは、地中熱利用システムのみである。なお、建築物については、夏季の冷房負荷などを低減させるために、外部サッシはダブルスキニング工法が採用されている。これは二重サッシを 1 階から最上階まで連続させて中の空気を循環させることで、室内の温度管理を行うものとなっている。また、サッシにブラインドを取り付けて日射量の調整も行っている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

地中熱利用システムは、平均 4.7m の長さの熱交換を行う鋼管杭を利用するものと、75 m の深さのボアホールタイプの熱交換の双方を利用している。鋼管杭を利用するものは、熱交換媒体としてダブル U チューブを組み込んでおり、51 本を利用し、合計 240m の延長となっている。一方、ボアホール式は、3 本で、シングル U チューブが利用されていることから、合計 225m の延長である。施設の暖房はガス焚真空式温水器がメインで利用されており、地中熱ヒートポンプチラーの能力は 50kW で外調機負荷の 30%を賄う。

本プロジェクトでは、基礎杭に水を充填することによって、140W/m の採放熱能力が得られた。北海道大学の協力のもと、地中熱利用システムの評価が実施されているが、通常のコス利用機器に対しては、CO₂ で 30%の削減効果、コスト面では、灯油利用機器と比較して約 4 割の削減効果が得られたと発表されている。ただし、鋼材が高騰しているため PHC 杭と比較すると割高でかつ納期がかかるということや、杭頭部基礎工事が複雑になることなどの課題があるとされている。

（４）東北公益文科大学太陽光発電システム（山形県酒田市、鶴岡市）¹⁰⁾

①導入目的・経緯

東北公益文科大学は「庄内に 4 年制大学を」という地域住民の要望から、2001 年に山形県と庄内 14 市町村の出資により設立されている。開学前から緑化やビオトープなど自然環境との調和を図りながら、資源やエネルギーを有効活用しようという構想があり、太陽光発電を導入することとなった。280kW という設備規模は、東北地域で最大規模である。

②導入主体と対象建築物

- ・導入主体：東北公益文科大学
- ・場所：山形県酒田市、鶴岡市

③エネルギー種別

太陽光発電システムが導入されている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

太陽光発電の能力は、合計 280kW であるが、そのうち大半の 250kW が酒田キャンパスに設置されており、酒田キャンパスの電力消費量の約 20%を賄っている。なお、当該地域は積雪寒冷地であり、雪対策として太陽光パネルを傾斜させ、さらに積雪センサーによる自動融雪システムを設置している。

(5) フレンドリープラザ雪冷房システム（山形県川西町）¹¹⁾

①導入目的・経緯

山形県川西町では、平成 17 年度に川西町地域新エネルギービジョンを策定し、新エネルギー事業に取り組んでおり、その一環として、劇場と図書館が併設された複合文化施設である町営施設、フレンドリープラザに雪冷房システムを導入した。

②導入主体と対象建築物

- ・住所：山形県東置賜郡川西町大字上小松 1037 番地 1
- ・事業主体：川西町
- ・建築物概要：S 造+RC 造、地下 4 階、延床面積 4,753m²、劇場ホール 717 席、蔵書数約 4 万 7 千冊
- ・工期：1992 年 9 月～1994 年 03 月

③エネルギー種別

冬場の雪を貯雪し、夏場に利用するシステムで、利用側の建築物とは別に貯雪用の建築物（エコスノードーム 2 棟）、機械室 1 棟が建設された。

④再生可能エネルギーシステムの概要

貯雪は、専用のドーム 2 棟で行われており、夏場に融解した冷水によって熱交換を行ってフレンドリープラザ側の劇場ホール、図書館、遅筆堂文庫（井上ひさし寄贈）、ロビ

一、楽屋、各通路の冷房に用いている。貯雪量は 2,568m³ で、充填率 75%、雪密度 0.5 トン/m³ で 963 トンの雪氷を貯蔵できる設計となっている。計画されている冷房時間は、延べ 334 時間である。

（６）集中連系型太陽光発電システム（群馬県太田市）¹²⁾

①導入目的・経緯

今後の太陽光発電システムが普及する過程においては、太陽光発電システムが配電系統に局所集中的に連系されること（集中連系）が予想され、この場合には、電圧上昇による出力抑制や系統への影響などの顕在化により、普及拡大の制約となる可能性が考えられる。そこで、NEDO では一カ所に集中的に太陽光発電システムを導入する実証研究を平成 14 年度から平成 19 年度にかけて実施し、関連する技術開発を行った。

実証研究には、太陽光発電の普及に積極的な群馬県太田市が協力し、同市の土地開発公社が開発した Pal Town 城西の杜に入居した 553 軒の一般世帯に太陽光発電が導入された。本事業は、NEDO の研究開発事業（事業費 11.7 億円）として実施されたもので、各家庭は研究に協力することを条件に、NEDO 予算にて太陽電池や蓄電池など関連のシステムを設置している（太陽電池の所有者は NEDO）。なお、Pal Town 城西の杜は、分譲戸数 774 戸で、うち 553 戸が本研究開発事業に参加した。写真に示すように入居している建築物は様々で、屋根形状も異なることから、様々なタイプの太陽電池が導入された。実証研究は、関電工が窓口となって受託し、電力テクノシステムズ、明電舎、新神戸電機、松下エコシステムズ、東京農工大学、太田市、日本大学、オムロンが参加して実施された。

②導入主体と対象建築物

実証試験地区は、群馬県太田市の新興住宅団地「Pal Town 城西の杜」である。太田市土地開発公社によって平成 12 年度から開発されているもので、面積は 40.9ha となっている。住宅はそれぞれ異なるが、一般的な戸建て住宅である。分譲戸数 774 戸のうち 553 戸が実証試験に参加した。当該地区が選ばれた理由としては、太田市が太陽光発電の普及に積極的であるとともに、①地区内の配電線は配電系統の末端に位置しているため、電圧上昇に伴う出力制御現象の発生が期待できること、②国内で最も落雷頻度が多い地域であり、停電時の保護装置の動作確認試験に適していることが挙げられている。住宅は、各世帯が購入したものであるが、太陽電池とその関連の装置は NEDO 事業（事業費 11.7 億円）によって実施されたものであり、NEDO の資産である。

③エネルギー種別

太陽光発電システムのみを対象とした事業である。

④再生可能エネルギーシステムの概要

太陽電池の設備能力は、平均 3.85kW で、全体では合計 2,129kW の大規模なものとな

っている。市販の太陽光発電用パワーコンディショナ（PCS）は、逆潮流により系統電圧が管理値（ $101\pm 6V$ 、 $202\pm 20V$ ）を逸脱しないようにするため、出力を抑制する方法（出力抑制機能）がとられているが、集中連系時には出力抑制が頻繁に生じ、システム効率の低下が懸念される。そこで、この対策として、抑制分の出力を一時的に蓄電池に蓄え、夜間などの負荷に電力供給する「出力抑制回避装置」を開発し、各世帯に設置した。

いつ、どの家で発電し、どの家で蓄電するかは、「集中制御装置」で一括管理する方式が採用された。発電量と電力使用量、バッテリーの充放電状況といったデータが各戸の装置で計測され集中制御装置によって、運転が管理された。集中制御装置では、集めたデータを基に「ある家ではこの時間帯に蓄電し、ある家では消費する」というような設定を一括して行い、地域全体での発電効率を最適化するようにコントロールされている。

本事業のもう一つの技術開発課題は、「新型単独運転検出装置」の開発である。「単独運転検出」とは、停電が起こったときに、太陽光発電を自動的、かつ確実に停止させる機能のことで、系統の停電時に断線に触れてしまった人が感電するなどの二次災害を防ぐためである。従来の住宅用太陽光発電システムも、連系している電力系統が停電になった場合には、自ら発電を停止する装置が内蔵されているが、集中して連系する場合も確実に作動するかという課題が残されていたため、本事業で新型の装置を開発し、問題なく運転できたことが報告されている。

将来の集中的導入にどのような問題が発生するのか情報を得るため、本事業では、蓄電池を組み込んだ制御方式が採用されているが、コストアップになるため、現在一般的に市販されている太陽光発電システムには、蓄電池は組み込まれていない。

（７）のぞわ特別支援学校（栃木県宇都宮市）¹³⁾

①導入目的・経緯

栃木県立のぞわ特別支援学校は、昭和 42 年に開校した宇都宮市にある肢体不自由者の特別支援学校である。小学部、中学部、高等部、訪問教育と寄宿舎が設置されている。栃木県教育委員会では、環境エネルギー教育の観点から学校施設への太陽光発電システムをはかっており、本校では平成 15 年度に太陽光発電と太陽熱利用システムの導入を行った。

②導入主体と対象建築物

・住所：栃木県宇都宮市岩曾町 1177-2

・導入主体：栃木県教育委員会

・学校概要 総敷地面積：30,005m²、延床面積：15,455 m²、児童生徒数：144 名（平成 21 年 5 月時点）、職員数：160 名

③エネルギー種別

太陽光発電と太陽熱利用システムが導入されている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

太陽光発電は3種類の太陽光発電（多結晶：80kW、単結晶：120kW、採光型単結晶：2kW）が導入されており、合計の発電能力は202kWである。パワーコンディショナーや余剰電力売電用メーターは、屋上に、発電状況を表示する表示装置を昇降口、事務室に設置している。稼働実績は、過去3カ年の平均で、186,879kWhと報告されている。

太陽熱利用システムは、同校の体育館に設置されている。本システムは給湯を行うものではなく、パッシブソーラーシステムで、夏季は屋根に降り注ぐ太陽熱を屋外へ排出し、冬季は太陽熱を床下部のコンクリートに蓄熱する方式がとられ、暖房に用いられている。

導入にあたってはNEDOの補助金を使用しており、その費用は2億4000万円であった。導入による電力削減効果は、年間200万円（自家消費分170万円、余剰電力売電分30万円）となっている。

（8）次世代型環境学習施設吉田元気村（埼玉県秩父市）¹⁴⁾

①導入目的・経緯

秩父市は、市域の87%が森林に覆われており、埼玉県全体の40%を占める。しかしながら木材価格の低迷の影響などから手入れが行き届かず、森林は荒廃の危機に直面している。こうした背景から、地域内の未利用資源の有効活用による森林の保全と、森林資源の収集・輸送・加工からエネルギー生産を通じた循環型システムの構築を行って地域の活性化を図るため、バイオマス発電事業に取り組むことになった。

事業が行われている施設は、秩父市の旧吉田町地域にある公共施設で、体育館、コテージ、多目的広場などからなるレクリエーション施設である。バイオマス発電の他にも体育館の屋上に太陽光発電設備を導入しており、環境学習拠点にもなっている。

②導入主体と対象建築物

・住所：埼玉県秩父市上吉田

吉田元気村は、秩父市の公共施設であり、体育館、コテージ、入浴施設等からなり、体育館屋根に太陽光発電が設置されている。体育館の横に、バイオマスガス化発電所を建設し、各施設に電気や温水を供給している。

③エネルギー種別

市内で発生する間伐材等をチップ化した原料を燃料とする100kWのバイオマスガス化発電設備が導入されているとともに、体育館の屋上には30kWの太陽光発電が導入されている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

バイオマス発電について、秩父市では、平成15年度に市職員によって予備調査を行い、平成16年度にNEDOの「バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業調査」の採択を

受け、バイオマス資源の調達から利用までの基本設計を行った。平成 17 年度には、具体的なガス化・コージェネレーションシステムの調査を行い、平成 18 年度に林野庁の「強い林業・木材産業づくり交付金」を受け、吉田元気村に発電施設の建設を行った。本発電施設は、日本初の本質系バイオマスガス化・ガスエンジン・コージェネレーション設備の実用機であり、間伐材をチップ化した原料を、ガス化炉にて合成ガス（主として一酸化炭素と水素）に転換し、ガスエンジンを利用して発電を行うものである。得られた電力は元気村で使用する他、一部を売電している。設備能力は、100kW であるが、現在 80kW で運転が実施されており、60kW 分を所内で利用し、20kW 分を売電している。発電効率は 23% であるが、元気村には入浴施設があるために、排熱を利用して温水供給が行われている。原料のチップは、市有林の間伐材を委託によってチップに加工したものを利用しており、一日あたりの消費量は、1.5 トンである。なお、本システムでは、バイオマスが全てガス化されるのではなく、発電後は、細かい炭が炉に残る仕組みになっている。吉田村では、この炭を土壌改良材として販売しているが、人気が出てきており、売り切れる状況になっている。

太陽光発電は、体育館（クレー仕上げの無床）の屋根面に 30kW の規模の電池パネルが取り付けられている。

その他の取り組みとして、吉田村では、廃食油から BDF（バイオディーゼル）の生産や、炭による水質浄化実験など、幅広い環境教育の材料を提供している。

バイオマス発電の導入効果としては、年間 90kL の燃料削減と 350 トンの CO₂ 排出削減効果が見込まれている。バイオマス発電では、バイオマスを直接燃焼し、ボイラーによって発電するのが一般的であるが、設備の規模が大きくなり、公共施設において場所を確保することが難しい。一方、本施設で導入されているバイオマスガス化発電は、直接燃焼に比較すると設備規模は小さく、また発電効率が高い。ただし、投資額は相応の負担が必要となっており、今後の技術改良や普及によるコストダウンが求められる。

（９）劇団四季芸術センター本館（神奈川県横浜市）¹⁵⁾

①導入目的・経緯

劇団四季では、創立 54 年を迎えた 2006 年 7 月 14 日、新しい拠点として「四季芸術センター」をオープンさせている。これは、「半世紀余りの演劇活動で培った経験を生かして優れた舞台の基礎をつくる環境をさらに充実させたい」ため、従来の四季芸術センターの隣接地に新しい稽古場を建設したものである。完成した新稽古場（本館）は、床材質や音響効果等に万全の配慮をした大中小 10 の稽古場、個人レッスンを積む 25 の研究室のほか、トレーニングジム、マッサージルームなどを完備した施設となっている。おもな稽古場はすべて南向きに配置され、大きなガラス窓からふんだんに自然光を採り入れること

で照明の使用を減らすことができ、また大規模な太陽光発電システムを導入し、CO₂ 対策も行う施設としている。

②導入主体と対象建築物

・住所：神奈川県横浜市青葉区あざみ野 1-24-7

・敷地面積：17,404.34m²

・延床面積：11,741.98 m²（PH階：146.02 m²、2 階 4,694.39 m²、PH 階：1,420.05 m²、1 階：6,784.35 m²、地階：117.22 m²）

③エネルギー種別

太陽光発電が大規模に導入されており、自然光を取り入れる工夫も行われている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

劇団四季に導入されている太陽光発電システムは、屋上に架台で設置する一般的な太陽光発電システムで、発電能力は 275kW と、都市部では規模が大きな導入施設となっている。また、屋上以外にも玄関に設置されたエスカレーターの上部にも設置されている。発電された電力は、センターの照明等の電力に消費されている。なお、太陽電池は京セラ製多結晶タイプで、設置費用は 1 億 8,570 万円であった。

（10）緑翠亭景水（長野県大町市）¹⁶⁾

①導入目的・経緯

温泉旅館の緑翠亭景水がある大町温泉郷は、島槍ヶ岳や爺ヶ岳の雪解け水が流れる清流鹿島川のほとりにあり、黒部ダムに通じるアルペンライン沿いにある温泉地である。地下水利用ヒートポンプシステムが導入されている緑翠亭景水の七つの湯は、パイプ送湯の源泉を加水、昇温をしている。一方、井戸水は水温が一定であり、ヒートポンプを用いることによって、冷暖房のランニングコストの低減を図ることができることから、吸収式冷温水機から地下水利用のヒートポンプシステムに交換された。

導入にあたっては、NEDO のエネルギー使用合理化事業者支援事業（3分の1 補助、補助額 4.8 千万円）を得ている。

②導入主体と対象建築物

・住所：長野県大町市大字平 2884-13

・導入主体：株式会社景水

③エネルギー種別

地下水と冷房排熱を利用するヒートポンプシステムが採用されている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

ヒートポンプは水冷式で水温が年間を通じてほぼ一定した北アルプスの豊富な伏流水を井戸から汲み上げ、熱利用後、地下へ還元している。また、安価な夜間電力で蓄熱給湯

を行いランニングコストの低減を図っている。さらに、夏季は冷房運転と同時に給湯運転を行うことによりエネルギーを捨てずに有効利用できるシステムとなっている。なお、温泉は、無色透明弱アルカリ単純泉で、源泉 62.8℃をパイプ引き湯している。また、地下水の揚水井戸は、径 80－100m 800ℓ／分である。

本システムの導入は、ゼネラルヒートポンプ工業（名古屋市）によるものであるが、同社の資料によると、本システム導入によってランニングコストが年間 2,500 万円下がり、CO₂ 排出量が 749 トン削減されたと記載されている。

（１１）学校法人中野学園オイスカ高等学校（静岡県浜松市）¹⁷⁾

①導入目的・経緯

オイスカ高等学校は、浜松市西区和地町にある私立高等学校で、設置者は学校法人中野学園である。教育理念は、「自然の恩恵に感謝し、国際社会に貢献できる心豊かな日本人を育成する」こととなっており、1983 年設立時には暖房と給湯に太陽熱を利用するシステムを導入、2006 年には NEDO の補助事業によって設備をリニューアルした。環境に関しては、同校にはエコスクール構想というものがあり、eco を ecology と economy の 2 面で捉えている。ecology は、地球上に存在するすべての動植物が地球の恩恵を受けて生かされていることを理解する。economy は、“節約”という言葉の意味通り、地球の恩恵である限られた資源を有効に使う手段や、持続可能な資源利用の方法を修得し実践する、というように考えられており、具体的に太陽熱利用と太陽光発電のシステムを導入している。

②導入主体と対象建築物

- ・住所：静岡県浜松市西区和地町 5835
- ・導入主体：学校法人中野学園
- ・対象建築物：太陽熱利用システム（男子寮）、太陽光発電システム（校舎）

③エネルギー種別

太陽熱利用システムと太陽光発電システムの双方を利用している。

④再生可能エネルギーシステムの概要

太陽熱利用システムは、真空管型集熱器 214m²、加圧温水器（20.1～24.0kW）3 基からなり、寮施設の入浴施設の給湯、男子寮冬季給湯暖房に利用している。温水器併用によって、日量 25～30 トン／80℃を給湯し、冬季 30 室（71m²／室）の室温 20℃を維持している。

太陽光発電は、50kW のものが利用されている。これらの施設は、同校の環境教科の教材としても活用されている。

本事業は、NEDO による新エネルギー百選に選定されており、同校では風力発電やバイオマス利用についても検討していくとしている。

(12) パナホーム・シティ西神南Ⅰ・Ⅱ(兵庫県神戸市)¹⁸⁾

①導入目的・経緯

パナホームでは、太陽光発電を組み込んだ分譲住宅を全国で販売しているが、神戸市のパナホーム・シティ西神南(第一期、第二期)では、合計100戸に太陽光発電を設置した戸建住宅を販売した。100戸の合計の設備容量は、299kWとなっている。

②導入主体と対象建築物

・住所：兵庫県神戸市西区井吹台北町4

パナホームによる分譲住宅であり、太陽光発電は、住宅を購入した個人所有となっている。住宅は、パナホーム製の標準的な分譲住宅であるが、各戸で仕様は異なる。

③エネルギー種別

太陽光発電を各戸が導入している。

④再生可能エネルギーシステムの概要

太陽光発電は、各戸に平均3kW導入されており、合計では300kW弱の発電能力がある。パナホームでは、住宅への太陽光発電の導入について京セラ株式会社と提携しており、本住宅地においても同社製の太陽電池モジュールとインバータが採用されている。PVセルタイプは多結晶シリコンである。群馬県太田市で実施された集中導入の検証事業では、各戸に蓄電池を設置して制御する方式が採用されていたが、本事業では通常の太陽光発電システムが採用されており、蓄電池は利用していない。

(13) サンポート高松地区熱供給センター¹⁹⁾

①導入目的・経緯

四国電力では、高松港のあるサンポート高松地区において、平成13年4月から地域熱供給事業を実施している。本地域では高松港から取水した海水を未利用エネルギーとして利用する、全国でも珍しい熱供給システムとなっている。熱供給開始時は、高松港旅客ターミナルビル、全日空ホテルクレメント高松の2施設のみへの供給であったが、その後、高松シンボルタワー、高松サンポート合同庁舎にも供給を開始し、当該地区4施設に供給を行っている。

②導入主体と対象建築物

・熱供給事業者：四国電力株式会社

・供給区域：サンポート高松地区 13.9ha

・延べ床面積：162,873m²(高松港旅客ターミナルビル 8,390 m²、全日空ホテルクレメント高松：33,110 m²、高松シンボルタワー91,073 m²、高松サンポート合同庁舎 30,300 m²)

・熱供給開始時期：高松港旅客ターミナルビル(平成13年4月～)、全日空ホテルクレ

ント高松（平成 13 年 4 月～）、高松シンボルタワー（平成 16 年 4 月～）、高松サンポート
合同庁舎（平成 18 年 12 月～）

③エネルギー種別

海水熱利用システムについては、高松港の海水を取水し、その熱を利用する電気式ヒートポンプを利用する地域熱供給システムとなっている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

ヒートポンプ 3 台と冷凍機 2 台により、5℃の冷水と 49℃の温水をつくり、地域導管を通して各施設に供給する熱供給システムである。冷房能力は、冷熱 51 ギガジュール毎時（約 14,000kW）、暖房能力は温熱 21 ギガジュール毎時（約 6,000kW）である。工事費（増設分を含んだ総事業費）は 42 億円である。

愛知県の中中部国際空港、大阪南港コスモスクエア地区、福岡市シーサイドももち地区でも海水熱を利用した地域熱供給が実施されている。他に、河川や下水の熱を利用する地域熱供給も実施されている。

（14）ゼロ・エミッションビル（福岡県北九州市）²⁰⁾

①導入目的・経緯

新日鉄エンジニアリングは、新日鉄戸畑の自社の事業所において老朽化したビルを建て替えるにあたり、NEDO より「次世代省エネルギー等建築システム実証事業」の助成を受け、地中熱利用システム、太陽光発電、自然換気などの技術を取り込んだゼロ・エミッションビルを建設・開設した（平成 22 年 12 月）。新日鉄エンジニアリングにおいて、戸畑事業所はエンジニアリング事業の発祥の地でもあるため、同社は、これまでの蓄積技術を同ビルへ積極的に展開するとともに、運用段階で実際に得られるデータについても今後の技術開発に活用する意向を表明している。

②対象建築物

- ・場所：北九州市戸畑区中原
- ・用途：事務所
- ・規模：延床面積 約 10,500m²、地上 5 階建て

③エネルギー種別

本事務所ビルには、地中熱利用システムの他、太陽光発電が導入されており、自然光利用、自然換気のシステムも取り込む省エネルギービルとなっている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

地中熱利用システムには、同社独自の低搬送動力の少水量対応ビルマルチシステムを用いており、通常の高効率な空冷ビルマルチエアコンに比べて約 20%の省エネが可能とされている。また、地中熱交換器は、80m の立孔 50 本にパイプを挿入して行うボアホール方

式が採用されている。

太陽光発電としては、屋上設置には一般的な太陽光パネルを設置し、トップライトの一部、1 階玄関の大庇などには意匠性にも配慮されたシースルータイプを設置している。

自然光利用としては、トップライトの屋外側に設置した太陽光を追尾する集光装置を設け、太陽の位置に関わらず、吹き抜け 1 階まで自然光を取り入れている。さらに LED 照明や昼光センサーによる調光調整、人感センサーなど省エネ対策も実施されている。また、建築物の中央に「風道（吹抜け）」を設け、春秋の涼しい外気を風力で取入れ、室内で発生するパソコン等の機器、人体等の熱を動力なしで除去する。室内外のセンサーにより自然換気に最適な環境が整った場合のみ作動させることで、冷房エネルギーと換気動力を低減する効果をねらう。

再生可能エネルギーではないが、断熱性能が高いガラスを採用するとともに、BEMS (Building & Energy Management System) による最適化運転も検討されている。

(15) Masdar City²¹⁾

①導入目的・経緯

マスダールとは、Abu Dhabi Future Energy Company の通称で、マスダール・シティは先端エネルギー技術を駆使してゼロエミッションのエコシティを目指すアラブ首長国連邦 (UAE) の計画都市である。計画を進める Abu Dhabi Future Energy Company は、主としてアブダビ政府の資本によって運営されているムバダラ開発公社の子会社である。英国の建設会社フォスター・アンド・パートナーズが都市設計を担当し、太陽エネルギーやその他の再生可能エネルギーを利用して持続可能なゼロ・エミッション都市の実現を目指している。都市はアブダビ市から東南東方面に約 17km、アブダビ国際空港の近くで建設中である。マスダール・シティには国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) の本部が置かれている。

②対象建築物

面積は約 6.5km² の土地に、都市内に各種再生可能エネルギーを集中的に導入し、これらのエネルギーでシティ内のエネルギー供給を行うことにより、人口およそ 45,000 から 50,000 人が居住可能なゼロエミッションの都市を目指している。マスダール・シティは高度に計画された都市であり、研究および技術開発に特化しながらも居住地域を持つ都市としては世界の最新例の 1 つとなる。過去の数少ない類似例には、ロシアのノヴォシビルスク市、日本の筑波研究学園都市（つくば市）などがある。マスダール・シティは自動車の進入を禁止した上で都市周囲に壁を設け、それによって高温の砂漠風が市内に吹き込むことを防ぎ、幅の狭い道を張り巡らせて冷たい風が街中に行き届くようにしている。

世界経済の停滞の影響もありマスダール・シティ計画は大幅に停滞した。当初の完成予

定であった 2016 年現在、計画の進捗度は 5%未満である。

③エネルギー種別

太陽光発電、太陽熱発電、風力発電、水素発電、地熱発電、太陽熱冷房など様々な再生可能エネルギーを導入する予定とされている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

当初の計画では、ドイツの Congergy が建設する 40～60MW 級の太陽光発電所が含まれており、他の建設現場に必要な電力がここから供給される予定とされていた。また、シティ全体では、太陽光発電の導入規模は、130MW とされていた。その他風力発電、地熱発電なども検討されているが、具体的な導入規模は確定していないと見られる。再生可能エネルギーで 100%供給する目標は変更しておらず、その約 8 割は、太陽エネルギーで供給する予定となっている。

なお、事業には、GE、Siemens、BP、Shell、三菱商事、三井物産等の大手企業が参加する予定である。

(16) ドイツ Bonner Bogen の地中熱・地下水熱利用システム²²⁾

①導入目的・経緯

ドイツでは地中熱利用ヒートポンプが普及しており、空気熱源ヒートポンプと同様の出荷台数が見られ、小規模なものばかりでなく、高層ビルでの利用や大規模な利用も進んでいる。ここで紹介する Bonner Bogen の地中熱利用システムは、欧州最大規模とされ、第一期工事では、2004 年に 4 つの坑井が設けられ、第二期の工事では、2009 年に 6 つの坑井を設け、地中、地下水の熱を利用することによって、ホテル、キャンパス、事務所等の施設群に熱供給を行っている。Bonner Bogen は、ボン近郊のライン川に面したエリアで、かつてはセメント工場が立地していたが、近年の再開発の進行に伴い、BonnVisio（先見性、将来性などを意味する）と呼ばれる街となった。

②対象建築物

建築物の個々の詳細データは得られなかったが、BonnVisio には、10 の建築物が建設されており、合計の延床面積は 10 万 m² を超える。

③エネルギー種別

地下水の熱を利用するシステムとなっている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

地下水熱利用として、温熱で 919kW、冷熱で 625kW の能力を持つヒートポンプを第二期工事で設置しており、これらをコントロールするエネルギーセンターが、エリア中心部のホテル内に存在する。夏場の冷房には、地下水の熱で 100%供給することができるが、冬季の需要期には、地下水の熱では不足することからガスボイラーが補助熱源として利用

されている。しかし、熱需要の 60～80%を賄うことができるという。本システムを導入したことによって、一般的なシステムに比較して年間 1,700MWh の一次エネルギーの削減効果、400 トンの CO2 削減効果があると発表されている。

(17) Sol 300 (デンマーク) ²³⁾

①導入目的・経緯

Sol 300 は、デンマークで既設住宅 300 軒に太陽光発電システムを導入したプロジェクトで、98 年から 2001 年にかけてユトランド半島とフュン島の 8 つのコミュニティで実施された。総発電能力は 750kW であり、欧州では当時最大規模の太陽光発電導入プロジェクトとなった。本事業では、新規の開発地区ではなく、既設の住宅に太陽電池を設置することによって、住宅への太陽電池設置ノウハウの取得や大量導入によるコストダウン、品質向上、電力ビジネスの太陽光発電分野への展開を目指すことが目的とされた。

②対象建築物

デンマークのユトランド半島とフュン島にある 8 地区 (Fanø, Tofthund, Brædstrup, Knudby-Borup, Norup, Vestbjerg, Korup, Gudme) に、合計 300 軒の既存住宅に太陽電池が設置された。住宅のタイプは、テラスハウスタイプ、コテージ、60 年以前に建設された住宅、80 年以降に建設された比較的新しい住宅、農村エリアの住居など、様々である。

③エネルギー種別

事業としては太陽光発電のみの導入されている。デンマークは国土に幅広く風力発電が導入されているが、当該エリアに風車やその他の再生可能エネルギーが導入されているかは不明である。

④再生可能エネルギーシステムの概要

太陽光発電の概要を以下に示す。

- ・総 PV 出力：750 kW
- ・PV 搭載建築物の戸数：300 戸
- ・1 戸あたり PV 出力：0.9～6kW/戸
- ・発電実績 850kWh/kW
- ・PV セルタイプ：単結晶、多結晶シリコン
- ・PV モジュールメーカー：BP Solar、IBC Solar、Shell Solar
- ・インバータメーカー：SMA
- ・投資額（事業としての経費） 10,000 DKK/kW（約 15.5 万円/kW）

本事業は実証事業であったが、本事業を通じて太陽光発電に対する理解につながり、事業終了後に設置する家庭も出現した。

(18) Stad van de Zon (オランダ) ²⁴⁾

①導入目的・経緯

Stad van de Zon は、日本語にすると太陽の街で、オランダ・アムステルダム北部のヘールフゴヴァールト (Heerhugowaard) にゼロ・エミッションの街として太陽光発電が集中的に導入された。本事業では、合計 3.75MW の太陽光発電が導入されるとともに、2.3MW の風車 3 基や周辺には 100 ヘクタールの森林も整備する事業となっている。事業は、“HAL-Lokaties” 開発エリアの一部で、Stad van de Zon 以外に、隣接して Alkmaar 、Langedijk と呼ばれる太陽光発電を導入する住宅開発が行われ、これら 3 つの街を合計すると、5MW の発電規模に達する。

住居エリアは、2002 年から建設が開始されており、2008/09 年に完成している。しかし、プロジェクトの途中でリーマンショックの影響があり、資金面の問題から、結果として最終的な導入規模は、2.45MW に引き下げられた。それでも住宅への導入としては、世界最大規模となっている。

②対象建築物

本事業は、1992 年から地方自治体の要請から、Heerhugowaard、Alkmaar 、Langendijk の 3 地域が連携して太陽光発電の集中導入を検討することとなった。これら 3 地域における太陽光発電設置住宅は、3,500 戸となっている。3 地域の総称は、3 地域の頭文字をとって、HAL-Lokaties と呼ばれている。また、太陽光発電住宅を普及啓発のため、“PV-Atelier” と呼ばれるワークショップを開催している。計 5MW のプロジェクトには、BEAR、Gouda など著名な設計会社が参画している。

③エネルギー種別

太陽光発電のみの導入がなされている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

以下に各家庭に設置された太陽光発電システムの概要を示す。

- ・総 PV 出力：5,000kW
- ・PV 搭載建築物の戸数：3,500 戸 (HAL-Lokaties 全体)
- ・1 戸あたり PV 出力：1.45kW/戸
- ・発電実績：3,750,000kWh/年
- ・PV セルタイプ：結晶系シリコン
- ・PV モジュールメーカー：BP Solar、Shell Solar
- ・インバータメーカー：SMA
- ・投資額 (事業としての経費)：2,500 万ユーロ (28.7 億円)

(19) Olympics Village (オーストラリア・シドニー) ²⁵⁾

①導入目的・経緯

シドニーの西 15km の地点にある Newington において、オリンピック選手村の整備に当たり、環境に配慮する方針から太陽電池が集中的に導入されることになった。敷地面積は、約 262 ヘクタールである。当該地域は、塩田があり作業者の住居や小麦の製粉工場、毛織物工場などが立地している。

②対象建築物

Newington は、オリンピックのマスタープランの一環で整備され、選手村として利用された後、郊外型住宅として販売されている。8 割の住宅では太陽電池の発電量が最大となるよう、25° 傾斜した屋根となっている。ただし、建材一体型パネルの導入など景観にも配慮されているのが特徴である。

③エネルギー種別

太陽光発電が導入されている。

④再生可能エネルギーシステムの概要

シドニー郊外は、発電の条件も良く、1,300～1,500kWh/年の電力が得られている。システムの概要を以下に示す。

- ・総 PV 出力：857kW (1kW×780、0.5kW×155)
- ・PV 搭載建築物の戸数：935 戸
- ・1 戸あたり PV 出力：0.5～1kW/戸
- ・発電実績：1,300～1,500kWh/年
- ・PV セルタイプ：単結晶シリコン
- ・PV モジュールメーカー：BP Solar
- ・インバータメーカー：BP Solar

2.3 太陽光発電の効率・性能の表示に関する調査

本調査では、太陽光発電の効率・性能の表示に関する調査として、JIS C8907:2005 (太陽光発電システムの発電電力量推定方法) ²⁶⁾の内容を整理するとともに、太陽光発電の性能表示改善に向けた各種取組を紹介する。

(1) JIS C8907:2005 (太陽光発電システムの発電電力量推定方法)

①制定の趣旨

太陽光発電システムの標準化については、既に、JIS C8905:1993 (独立形太陽光発電システム通則) ²⁷⁾、JIS C8906: 2000 (太陽光発電システム運転特性の測定方法) ²⁸⁾、JIS C8953: 2006 (結晶系太陽電池アレイ出力のオンサイト測定方法) ²⁹⁾、JIS C8961: 2008 (太陽光発電用パワーコンディショナの効率測定方法) ³⁰⁾、JIS C8971: 1993 (太陽光発

電用鉛蓄電池の残存容量測定方法)³¹⁾、JIS C8960: 2012 (太陽光発電用語)³²⁾、及び JIS C8972: 1997 (太陽光発電用長時間率鉛蓄電池の試験方法)³³⁾の 7 規格が制定されており、本格的な普及への準備の一環として、標準的な発電電力量推定を規定するもの、として制定された。

②適用範囲

JIS C8907:2005 が対象としている太陽光発電システムは以下の通りである。

(A)太陽光発電システム

- ・系統連係形太陽光発電システム及び独立形太陽光発電システムでシステム出力 1kW 以上、標準太陽電池アレイ開放電圧 750V 以下のシステム。

(B)システムを構成する太陽電池アレイ、蓄電池及びパワーコンディショナ

- ・太陽電池アレイは、同一形式の結晶系（単結晶及び多結晶）のシリコン太陽電池モジュールで構成された単一平面、かつ固定式のもの。
- ・アレイ回路構成はストリングを並列に接続したもの。
- ・蓄電池は、鉛蓄電池に限定。
- ・パワーコンディショナは、可変電圧・可変周波数のパワーコンディショナは含まない。

(C)附則

- ・ハイブリッドシステムは、太陽光発電に接続されるほかの発電システムの発電特性が特定できないため除外している。
- ・太陽電池アレイの設置状態を単一としたのは、多姿勢及びアーチ形の構造については、日射量の評価手法が確立されておらず、また、アレイ構成の電氣的接続の仕方による影響もあるため除外している。
- ・アレイ面が多面で構成されている場合には、個別の面に対して規格を適用することにより発電電力量を推定できるが、電氣的接続方法等による影響があること考慮する必要がある。

③年間システム発電電力量推定

年間システム発電電力量は、各種損失を考慮して推定する必要がある。したがって、製造業者の仕様書又は技術資料などに記載された太陽電池モジュール 1 枚当たりの標試験条件における出力(W)、及び太陽電池モジュール数量(枚)の積が、システム発電電力量になるわけではない。

太陽光発電システムの年間発電量推定を行うための手順は次の通りである。

- (A)太陽光発電システムの仕様確認太陽電池の種類等を確認
- (B)太陽光発電システムの設置場所の確認
- (C)標準太陽電池アレイ出力 PAS の確認
- (D)基本設計係数 K' の算出

(E)月平均日積算傾斜面日射量 HS の選択

(F)月積算傾斜面日射量 HAM の算出

(G) 温度補正係数 KPT の算出

(H)月別総合設計係数 K の算出

(I)月間システム発電電力量 EPM の推定

④屋根用アレイ温度上昇推定方法

太陽電池アレイの温度を推定することは、太陽電池アレイの性能評価を行ううえで重要な要素である。太陽電池アレイ温度の利用方法として、(1)システムの運転特性評価のための推定、(2)システム発電電力量のための推定の 2 種類が想定される。(1)は、1 時間以下の間隔で太陽電池アレイ温度を推定し、1 時間以下の間隔で用いるシミュレーションなどに利用するもの。(2)は、1 ヶ月単位又は 1 年単位での太陽電池アレイ温度を推定する方法で、発電電力量などエネルギー的な評価に利用するものである。詳しい計算方法は、JIS C8907:2005（太陽光発電システムの発電電力量推定方法）：附属書 3（参考）屋根用アレイ上昇推定方法に記載されている。

（２）太陽光発電性能表示改善に向けた取り組み

太陽光発電性能表示改善に向けた取り組みとして、産業技術総合研究所（特に、太陽光発電研究センター評価・システムチーム）の活動内容を①～③に、太陽光発電協会の活動内容を④に、それぞれ整理した。

①大規模フィールドテスト（産業技術総合研究所）

産業技術総合研究所では、1 メガワット規模の太陽光発電システム（メガソーラ）を設置し、研究所の電源の一部として運用している。評価・システムチームではこのシステムを用いた大規模実証研究を実施している。将来、太陽光発電の割合が増大するのに備え、天候や気温の変化に伴う発電量の予測、様々な種類の太陽電池パネルの特性の違いの研究、大規模化によるならし効果の検証などの検討を行っている。

②性能評価基準の提供（産業技術総合研究所）

太陽電池を様々な温度や光量の条件に置き、その性能を様々な面から評価する装置群を備えており、特に、超高近似ソーラーシミュレータは、太陽光スペクトルを高い水準で再現し、太陽電池の性能を正確に評価できる。評価システムチーム内の一次基準太陽電池セル校正は、一次基準太陽電池セルの校正機関として、製品評価技術基盤センターから「試験所および校正機関の能力に関する一般要求事項」（ISO/IEC17025）への適合性認定を取得している（2008 年 5 月 16 日）。

③寿命や信頼性の研究（産業技術総合研究所）

長期寿命を保証するための加速劣化試験手法の開発やリサイクル手法に関する研究など、太陽電池のより広範な普及に向けた研究を実施している。複合劣化加速試験装置は、光・温度・湿度など複数の刺激を同時にモジュールに加える加速試験を行える設備で、こうした試験設備によるデータとメガソーラシステムによるフィールドテストのデータの両者を活用し、各種分析を行っている。

④簡易評価（太陽光発電協会）

JIS8907:2005 以外に太陽光発電協会（JEPA）が提示している JPEA 法³⁴⁾があり、JEPA の会員企業の多くは、この方法を使って発電電力量の推定を行っている。JEPA 法は標準太陽電池アレイ出力に幾つかの係数を掛けて、より簡便に発電電力量を推定するものである。アモルファス太陽電池に関しては、光劣化、アニールの程度により発電電力量が大きく変化するが、この変化量は季節パラメータ係数を掛けることによって補正している。

2.4 コストの検討

（1）太陽光発電

太陽光発電の地域別日射量については、数表が作成されており、建築設備設計基準（国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監修）³⁵⁾では東京における年平均日射量（パネル傾斜角度：30 度）は $3.83[\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{日})]$ である。したがって、2kW の発電容量の場合の年間発電量は、 $1.95[\text{MWh}/\text{年}]$ （＝装置容量 $2[\text{kW}] \times$ 総合設計係数 $0.7[-] \times$ 日射強度 $3.83[\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{日})] \times 365[\text{日}/\text{年}]/1000$ ）となる。ここで、総合設計係数は 0.7 としている。

既往の調査等を踏まえ、以下のような条件設定を置く。

- ・ 平均的な世帯の電力消費量 $15\text{kWh}/\text{日}$
- ・ 太陽光発電（2kW）の自己消費率 $0.3[-]$
- ・ 電気料金：27 円/kWh（昼間）、12 円/kWh（深夜）
- ・ 初期コスト：53 万円/kW（エネルギー白書 2013）

表 2. 2 は電気売却費の変化を踏まえ、3 つの価格設定を行い、初期と運用のコストバランスを整理したものである。減価償却年数は 7～11 年となり、消費者には手ごろな価格帯となっている。表中の年間運用利益は、太陽光発電が無い場合を基準としたものであり、電気購入削減費と電気売却費の和である。減価償却年数の算出においては、全体的な傾向を把握することが目的なので、各ケースで電気売却費を固定として簡易に扱っている。実際には電気売却費は経年的に変化する。

表 2. 2 太陽光発電設備の減価償却（発電容量 2 k W の場合）

ケース名称	売却単価 [円/kWh]	電気購入削減 費[万円/年]	電気売却費 [万円/年]	年間運用利 益[万円/年]	減価償却年 数[年]
ケース A (2009-2010 年を想定)	48	1.58	6.55	8.13	7.2
ケース B (2015 年前 後を想定)	35		4.77	6.35	8.2
ケース C (FIT 終了 以降の将来 を想定)	11		1.50	3.08	11.0

（２）地中熱利用

地中熱利用については、初期コストに関するヒアリング調査を地中熱利用促進協会、日本地下水開発株式会社に対して実施した。調査結果を以下に示す。初期に発生する費用は、掘削費、熱源機器（ヒートポンプ）購入費、配管費である。普及に向けて熱源機本体は自然体で低価格化が見込まれる一方、ボアホールの掘削においては重機を用いるので設置費用が増してしまう。今後、例えば他の基礎工事等と同時にボアホールの掘削工事も実施するなどして、大幅なコストダウンが求められる。

地中熱利用のコスト及び市場性（ヒアリング調査による）

◇コスト

- ・地中熱システムの初期コストは全国平均で 1kW 当たり 50 万円。
- ・住宅用 10kW（150m）の場合、地中熱交換器：150 万円、ヒートポンプ：80 万円、配管等：150 万円。
- ・掘削コストは m 当たり 1 万円前後、掘削機の前償却は m 当たり 2 千円。

◇市場性

- ・除霜運転が不要であるので寒冷地でヒートポンプ利用が可能。
- ・今後、温暖・暑熱地域（海外含む）への展開を期待。

2.5 まとめ

国内外で再生可能エネルギーが先進的に導入されている 19 の事例を収集し、概要、特徴等を整理するとともに、太陽光発電の効率・性能の表示に関する調査を実施した。バイ

オマスを除き、再生可能エネルギーは建築プロジェクトの敷地内で得られる太陽光、地中熱を利用したものが数多く見られ、全体的には実用段階に入っていることが示された。特に太陽光発電については効率・性能の表示に関する標準化が着実に進められていると言える。また、コストについては太陽光発電の減価償却年数が 7～11 年であるのに対して、地中熱利用設備は初期コストの影響が大きく、掘削工事の合理化など経費削減の工夫が今後求められる。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の目的	1
1.3	本研究の構成	2
1.4	本研究の体制	3
第2章	再生可能エネルギーに関する事例等調査	5
2.1	目的	5
2.2	再生可能エネルギーの利活用事例	5
2.3	太陽光発電の効率・性能の表示に関する調査	23
2.4	コストの検討	26
2.5	まとめ	27
第3章	地中熱利用の実証実験	29
3.1	目的	29
3.2	地盤のサーマルレスポンス試験	29
3.3	地中熱利用の実証実験	37
3.4	まとめ	66
第4章	再生可能エネルギーの評価技術	67
4.1	再生可能エネルギーの評価技術の概要	67
4.2	地盤の熱応答モデル	67
4.3	太陽光発電設備	71
4.4	再生可能エネルギーの技術導入によるエネルギー消費量の評価事例	74
4.5	まとめ	84
第5章	総括	85
参考文献		86
関連論文等一覧		89

第3章 地中熱利用の実証実験

3.1 目的

第2章の文献調査から、建築物の敷地内における主要な再生可能エネルギーとして太陽光と地中熱が実用化されており、太陽光に関しては標準化に向けた検討が進められていることが示された。地中熱利用に関しては、国交省が「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)」³⁶⁾を作成しているが、地中温度の挙動やヒートポンプの稼働時のエネルギー効率などが不明なため、実態把握が急務である。第3章では、地中熱利用の実証実験を行うことにより、地中熱ヒートポンプのエネルギー消費に関わるデータ取得を行うこととする。本章で実施した検討内容について以下に概要を示す。

(1) 地盤のサーマルレスポンス試験

実証実験を行うにあたり、現地においてサーマルレスポンス試験等の地盤調査を行い、地盤の基本的状況や地盤の熱応答特性に関してデータを整理した。

(2) 地中熱利用の実証実験

建屋2棟を現地に設置し、空気熱源ヒートポンプ、地中熱源ヒートポンプによる空調実験を同時に実施することにより、室温及び地中温度、電力消費量等のデータ取得を行った。

3.2 地盤のサーマルレスポンス試験

(1) 調査概要

①ボアホール掘削及び地層分布の推定

実証実験を行うにあたり、地盤の状況を把握するため、国立研究開発法人建築研究所（茨城県つくば市）の実験棟敷地においてボーリング（boring）を行った。ボーリングの実施場所の周辺地図を図3. 1に示す。掘削作業は、高速バイブロによって発生させた特殊振動を直接ビットに伝達させ、ロータリー方式と併用して掘進する特殊振動工法で実施した。掘削状況を写真3. 1に示す。掘削中はスライム、掘削状況より地層分布を推定した。掘削時のスライム・濁水は産業廃棄物(建設汚泥)として搬出・処理した。

②地中埋設管の設置

地中熱交換を行う地中埋設管を、①で掘削したボアホール内に挿入・設置した。地中埋設管はUチューブ（仕様：ダブル方式、材質：ポリエチレン管、外径：34.0mm、内径：27.0mm）である。写真3. 2はUチューブの設置作業の状況を示したものである。ボアホールにはケーシング管が設置してあり、Uチューブをその中へ挿入するに当たっては、鉄筋でサポートしながら、双方向から2本のUチューブを熱電対とともに地中に設置した。熱電対は、事前に受感部をエポキシ樹脂で被覆したT型（φ0.65mm）を用い、測温点は



図 3. 1 周辺地図
(掘削位置を図中矢印で示す) (国土地理院電子地図による)



写真 3. 1 地盤の掘削状況



写真3. 2 Uチューブの設置作業



写真3. 3 熱電対の測温点
(計温点の位置を図中矢印で示す)

写真 3. 3 で示すように U チューブ及び鉄筋サポートの外側に配置し、かつ、U チューブの送水復水の間中点に配置した。熱電対の設置深度は、地下 1m～10m までは 1m 間隔、地下 12m～深度 50m までは 2m 間隔の計 30 地点とした。地中温度センサの設置後、ケーシングを引き抜き、ボアホール内の U チューブ周辺を 1 号珪砂で充填した。

③サーマルレスポンス試験

サーマルレスポンス試験 (Thermal Response Test) は、ボアホール型地中熱交換井内に熱負荷を与えた熱媒体を循環して得られる熱媒体温度、循環流量、地中温度の経時変化より、地盤の熱物性を推定する試験である。サーマルレスポンス試験の実施手順を以下に示す。実施時期は、2012 年 3 月 8 日～3 月 14 日である。

- 1) 地中温度センサにデータロガーを接続し、自然状態における初期地温分布を測定した。
- 2) データロガーの測定項目は U チューブ出入口温度、地中温度(全 30 深度)、循環流量、外気温とし、記録間隔は 1 分毎とした。
- 3) ダブル U チューブ内を清水で満たし、エア抜きを兼ねて数時間程度循環を行った。その際、U チューブ入口出口温度、循環流量を確認し、安定した入口出口温度を平均地中温度 T_0 とした。また、エア抜き終了後に配管には断熱材を巻くと共に日射による影響を避けるためにアルミテープで被覆した。
- 4) 電気ヒーター(3kW)により、60 時間の加熱循環を行った。
- 5) 加熱循環 60 時間経過後、循環・加熱を停止し、地中温度の回復状況を 81.7 時間測定した。

④自然地中温度の計測

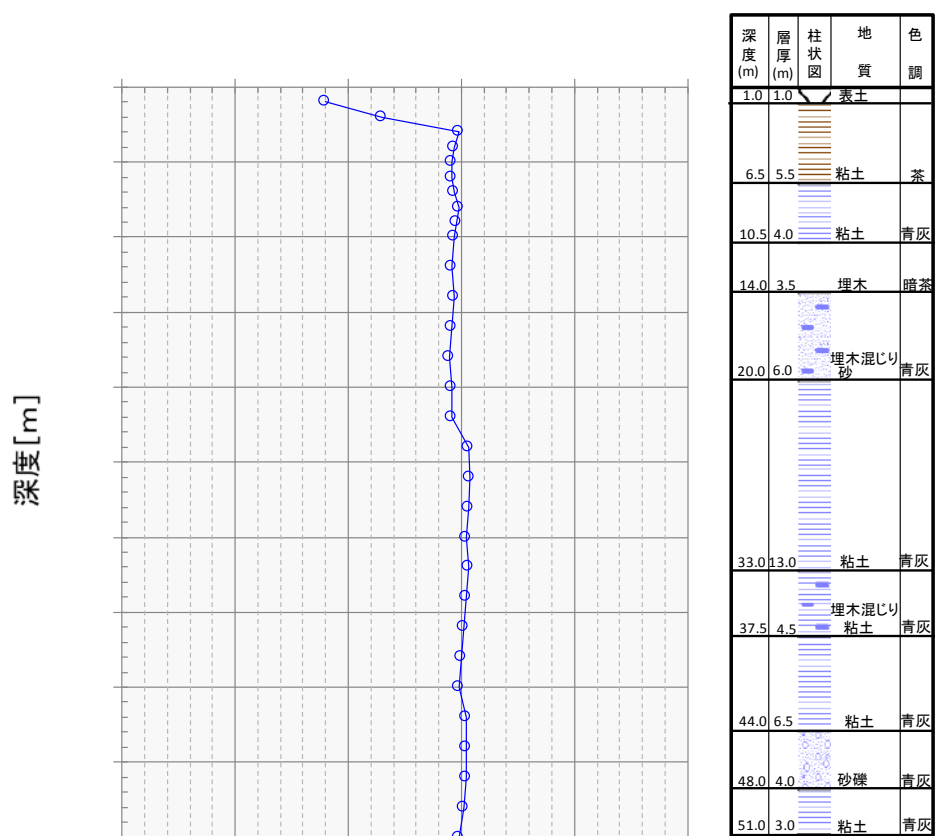
サーマルレスポンス試験後、自然地中温度の年間挙動を調べるため、地中温度及び気象条件(気温、風速、日射量)の計測を実施した。自然地中温度は、サーマルレスポンス試験時に設置した熱電対を用いて計測した。

(2) ボアホール掘削による調査結果

ボアホールは掘削口径 $\phi 179\text{mm}$ で深度 50.95m まで掘進した。掘削スライム、掘削状況より地質構成を推定した。サーマルレスポンス試験を行う前の初期状態における地中温度センサ(熱電対)による地中温度分布を地質構成とともに図 3. 2 に示す。

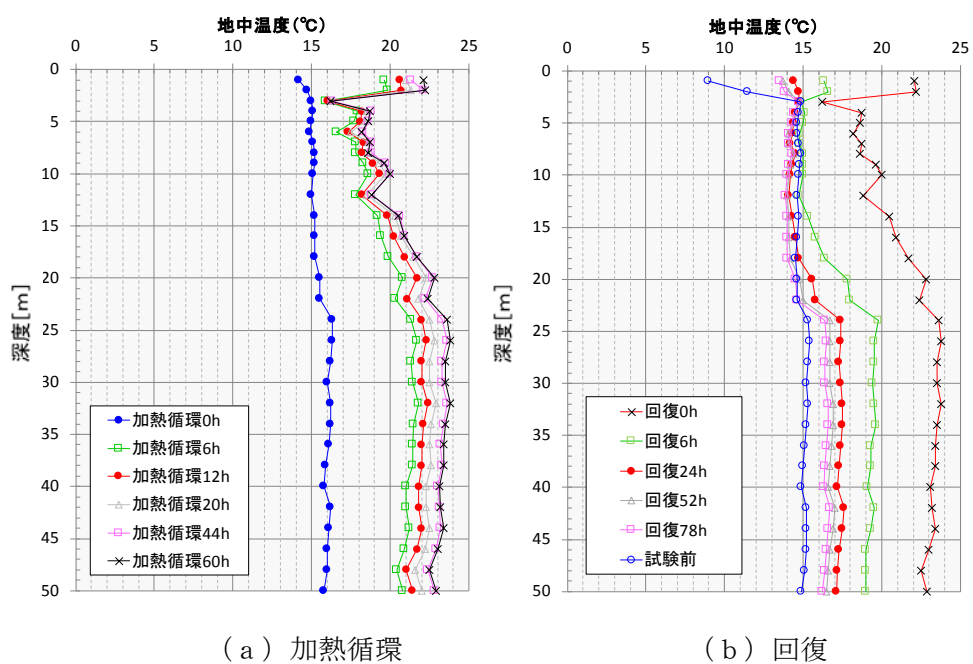
地下 5m 以深では地中温度はほぼ均一となっており、年間平均気温と同程度となっている。冬季の観測であるので地表面近傍は温度が低い。

今回掘削した地質は全体に粘土・シルトの細粒土主体で、深度 10～20m は埋木等の腐植物の混入が見られた。掘削時の状況より、深度 14～20m では砂層、深度 44～48m に砂礫層の分布が推定される。上記区間に加え、それ以外の深度でも掘削循環水の著しい逸水が断続的に見られ、全体的に地下水が豊富で地下水流速も比較的速いものと推察される。



(a) 初期地温分布 (2012 年 3 月 6 日 12 時) (b) 地質構成

図 3. 2 初期地温分布及び地質構成



(a) 加熱循環

(b) 回復

図 3. 3 サーマルレスポンス試験時の地中温度分布 (2012 年 3 月 8 日～3 月 14 日)

(3) サーマルレスポンス試験の結果

①地中温度分布

加熱循環時、回復時の地中温度分布について図 3. 3 に示す。深度 3m～20m では加熱循環時の温度上昇は緩慢であり、加熱停止後の温度回復は非常に速やかである。この傾向は深度が浅いと顕著で、深度 3m の温度はほとんど変化しなかった。また、深度 20m 以深は温度応答に差があまり見られなかった。地質構成の深度 2～3m において粘土層の色調が茶色（酸化帯）であることから、地下水面が存在すると推察され、温度の挙動に地下水の流動が影響している可能性が考えられる。

②加熱循環時のデータの解析結果

加熱循環時では、経過時間 t とその時の熱媒体温度 T （入口温度と出口温度の平均値）及び初期時の地中温度 T_i より、以下の関係式が得られる³⁷⁾。

$$T - T_i = m \log t + b \quad \text{式(3.1)}$$

式(3.1)中の m は、データより片対数グラフを作図し、十分時間経過した後のデータの傾きより求める。加熱循環時のデータを用いた解析図の例を図 3. 4 に示す。また、この解析図から得られた傾き m 及び地中熱交換量 q [W/m] を用いて、地盤の平均見かけ熱伝導率 λ_s を、次式から算出する。

$$\lambda_s = 0.183q/m \quad \text{式(3.2)}$$

U チューブ内の熱媒体から U チューブの管及びボアホール内における U チューブ外周部の充填材による平均熱抵抗 R_b [mK/W] は、式(3.2)から得られた地盤平均の有効熱伝導率 λ_s を用いて以下の式より算出する。

$$R_b = \frac{T_f - \left(T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda_s} (-\gamma + \ln(4a_s t / r_b^2)) \right)}{\bar{q}} \quad \text{式 (3.3)}$$

ここで、 T_f ：各時刻の入口及び出口の平均水温[℃]、 T_0 ：初期地中温度[℃]、 r_b ：ボアホール半径[m]、 a_s ：地盤の温度伝導率[m²/s]である。

$$a_s = \frac{\lambda_s}{c_{ps}\rho_s} \quad \text{式 (3.4)}$$

c_{ps} ：地盤の比熱[J/(kg・K)]、 ρ_s ：地盤の密度[kg/m³]

加熱循環時のデータの解析結果を表 3. 1 に示す。地盤の平均見かけ熱伝導率 λ_s は 8.17[W/(m・K)]、ボアホール内壁の平均熱抵抗 R_b は 0.1[(m・K)/W] と算出された。

③回復時のデータの解析結果

回復時は、加熱媒体の総循環時間 t 、加熱循環終了後からの経過時間 t とその時の地層温度 T_s との関係は、以下の式で表される³⁸⁾。

$$T_s - T_i = m \log(t + t_p) / t \quad \text{式(3.5)}$$

式中の m は、ホーナー時間 $(t+t_p)/t$ と温度の片対数グラフにデータをプロットした時の傾きである。回復時のデータを用いた解析図の例を図 3. 5 に示す。各地層の見かけ熱伝導率は、式(3.2)により算出する。本解析では日射による影響を含む部分のデータを除外して直線近似を行った。地盤の見かけ熱伝導率 λ_s の深度分布を図 3. 6 に示す。温度回復が早い区間は地盤の見かけ熱伝導率が大きい傾向にあり、温度応答履歴からも定性的にうかがい知ることができる。これらの現象は、単純熱伝導では説明がつかず、水分の流入などの外的要因が作用している可能性が考えられる。

表 3. 1 解析結果一覧(加熱循環時)

項目		設定値／算定値	備考
直線近似区間		12h後～60h後	加熱循環12h後～加熱循環終了時
熱交換器長さ	H (m)	50.70	ダブルループ長
単位対数時間当たりの循環液の温度変化	m (K)	1.3509	(=0.5897(図3.4より) $\times \ln(10)$)
循環液の比熱	C [J/(kg·K)]	4,181	25℃の水の比熱より
循環液の密度	ρ (kg/m ³)	997.04	25℃の水の密度より
熱交換量	Q _h (W)	3,058	Q _h =C · ΔT · ρ · Q
単位長さ当たりの熱交換量	q (W/m)	60.3	q=Q _h /H
平均地中温度	T ₀ (℃)	15.9	加熱開始前の入口出口平均温度
地盤の比熱※	c _{ps} [J/(kg·K)]	1,200	砂+粘土の値を引用※
地盤の密度※	ρ_s (kg/m ³)	1,960	砂+粘土の値を引用※
温度上昇近似直線の切片	T _i (℃)	21.663	図3.4より
ボアホール口径	rb (m)	0.090	掘削口径179mm
地盤の温度伝導率	a _s (m ² /s)	3.47E-06	式(3.4)より
地盤の平均見かけ熱伝導率	λ_s [W/(m·K)]	8.17	式(3.2)より
ボアホール内壁の平均熱抵抗	R _b (mK/W)	0.083	式(3.3)より

※地盤の比熱・密度は砂+粘土の値を引用（伝熱工学資料改訂第5版-日本機械学会(2009), P289より引用）

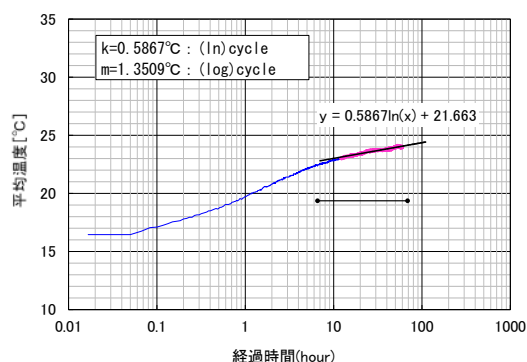


図3.4 TRT 事例（加熱循環時、50m 平均）

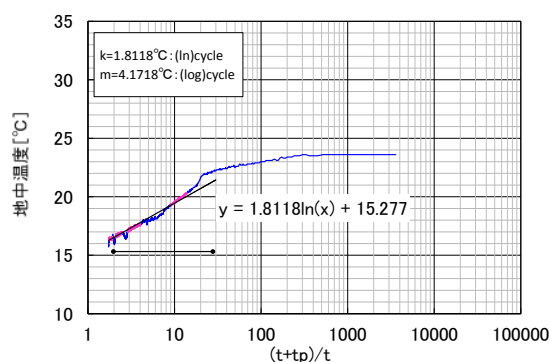


図3.5 TRT 事例（回復時、深さ 24m）

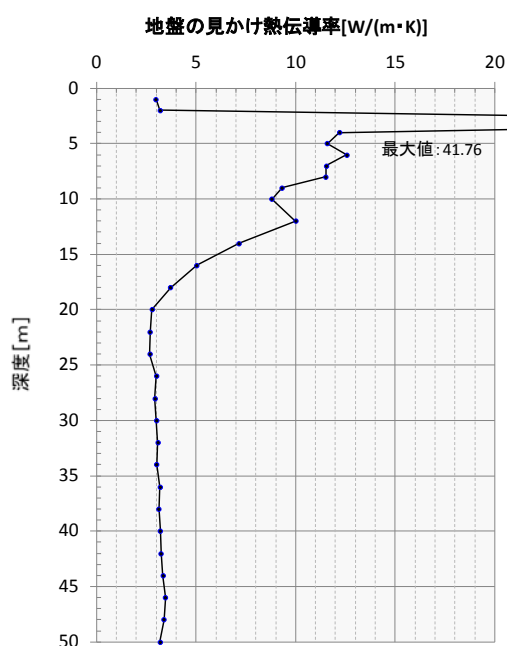


図3.6 地盤の見かけ熱伝導率の深度分布

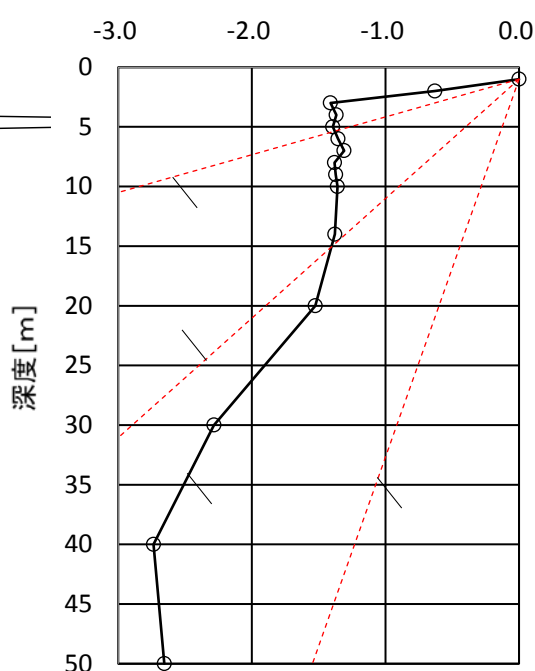


図3.8 各深さの年間温度振幅比の対数

（4）自然地中温度の計測

自然地中温度の年間挙動を調べるため、地中温度及び気象条件（気温、風速、日射量）の計測を実施した。自然地中温度の計測は、サーマルレスポンス試験後の約1年間（2012年7月～2013年6月）に渡って実施した。図3.7は、地中温度及び気温、日射を旬毎に平均化し、年間の挙動を表したものである。深さ1m、2mと比較して、深さ3m以深の振幅が小さくなっている。

深さ1mを基準として、各深さにおける年間の温度振幅比の対数を取り、その鉛直分布を、表したのが図3.8である。図中には熱伝導理論で、地盤の温度伝導率ごとに温度振幅比の対数を点線で示してある。例えば、深さ20～30mにおける温度振幅比の対数は、

温度伝導率としては 1×10^{-5} [m²/s] に近い傾きを示している。観測では温度振幅比は深さとともに減衰しているが、鉛直分布の傾きは深さにより異なる。深さ 3～14m においては、温度振幅比はほぼ一定になっており、それに対応する温度伝導率の値は大きくなる。

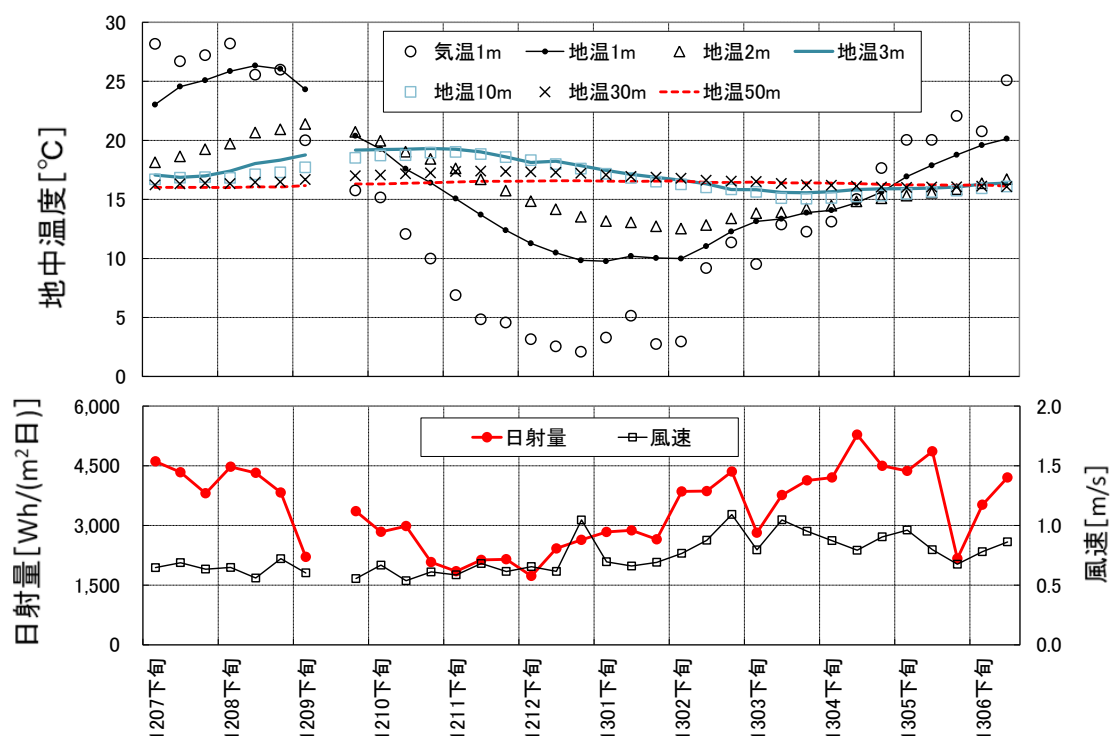


図3. 7 地中温度及び気温、日射の挙動（旬平均、2012年7月～2013年6月）

3.3 地中熱利用の実証実験

(1) 実証実験の計測システム

実証実験の目的は、地中熱を熱源とするヒートポンプ空調によるエネルギー電力消費量の実態や地中温度の挙動を把握することである。地中熱利用は、熱源となる地中温度の安定性により省エネルギーに有効であると一般に言われているが、ヒートポンプの場合、稼働状態により成績係数が複雑に変化することが知られている。そこで、空気熱ヒートポンプとの関係を知るためには、比較実験を行う必要があると考え、ユニットハウス2棟を用いた基礎的な検討を行うことにした。

ユニットハウス2棟は、国立研究開発法人建築研究所の実験棟1階の屋上に設置した。ユニットハウス2棟の設置状況を写真3. 4に示す。便宜上、地中熱ヒートポンプ空調を行うユニットハウスを「地中熱室」、空気熱ヒートポンプ空調を行うユニットハウスを「空気熱室」と称する。ユニットハウスの仕様を表3. 2に示す。



写真3. 4 ユニットハウス2棟の設置状況

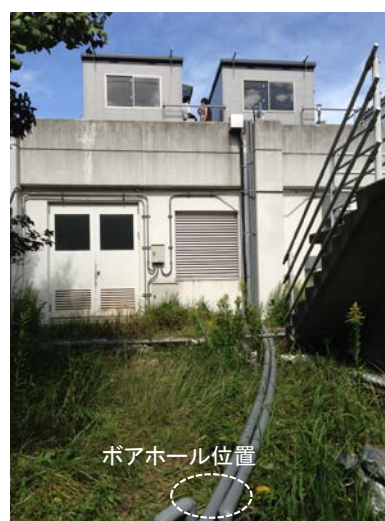


写真3. 5 システム外観

表3. 2 ユニットハウスの仕様（地中熱室と空気熱室で共通）

形式等	形 式：プレハブユニットハウス 寸 法：幅 3.04m×奥行 3.04m×高さ 2.44m 床面積： 9.24 m ²
外壁	外壁：複合版外壁（U 値 0.77W/m ² ・K） 硬質ウレタンフォーム＋ロックウール断熱材 30mm 屋根：折板屋根天井付（U 値 0.92W/m ² ・K） 硬質ウレタンフォーム断熱材 20mm 床：合板床（U 値 0.67W/m ² ・K） ビーズ法ポリスチレン断熱材 45mm
窓（南面）	フロート板ガラス 3mm シングル(アルミサッシ) 1.68m×0.98m

ボアホールからユニットハウスまでの地中熱配管の状況を写真3. 5に示す。実験に使用するヒートポンプは、同一メーカー同タイプの市販品を用いた。ヒートポンプの能力は、地中熱、空気熱ともに冷房時 4.0kW、暖房時 5.0kW である。

室内機は、地中熱、空気熱ともに今回は直膨式であるので、室内熱負荷の挙動を把握するため、空気エンタルピー法³⁹⁾を適用する。ファイバーセンサにより室内機のファン回転数を計測してエアコンからの吹出風量に換算し、吸込・吹出の温度差を乗じることで熱量換算することができる。圧力補償法によるエアコンの吹出風量の検量線をあらかじめ現地で作成しておく必要がある。今回作成した検量線を図3. 9に示す。回転数と風量は、直線的な比例関係にある。写真3. 6は、検量線の作成風景である。

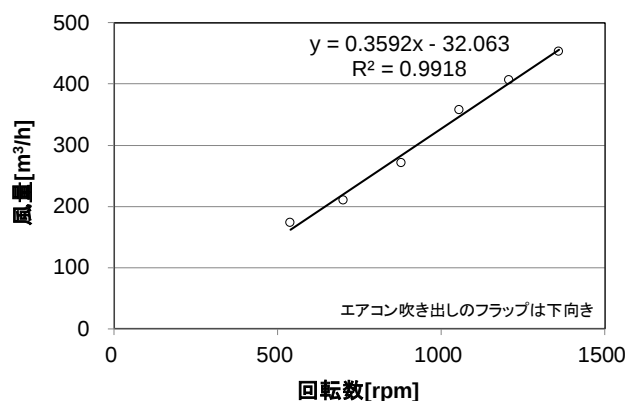


図 3. 9 エアコン吹出風量の検量線



写真 3. 6 検量線の作成風景

(2) 実証実験のスケジュール

エアコンの装置容量が過大となる場合、稼働率が小さくなり、エネルギー消費効率に影響を与える可能性がある。また、エアコンのエネルギー消費性能を総合的に把握するには、様々な部分負荷率でデータ取得がのぞましい。そこで、室内熱負荷計算による以下の検討を実施した。

まず、数値計算が現地の室温を再現するかについて確認するため、2012 年冬期の観測値と数値計算の比較を行うことにした。数値計算ツールは TRNSYS を用いた。計算期間は、11 月 2 日から 1 月 31 日である。なお、この期間は、各室は空調を行っておらず、自然室温の状態である。2 週間分の結果を抽出し、

時系列で表したのが図 3. 10 である。地中熱室と空気熱室の室温の観測値は、同様の数値で推移しており、冬の期間ではあるものの、日中は南面窓からの日射により室温が 30℃以上になる日が見られ、夜間は放射冷却により外気温より室温が低くなる傾向がある。2 週間分の結果では、数値計算による室温の挙動は観測と良く合致している。

図 3. 11 は、自然室温について、数値計算と観測（地中熱室）の 1 時間値を 11 月 1 日から 1 月 31 日の 3 ヶ月間のデータを用いて比較したものである。この場合も、両者は良く合致している。

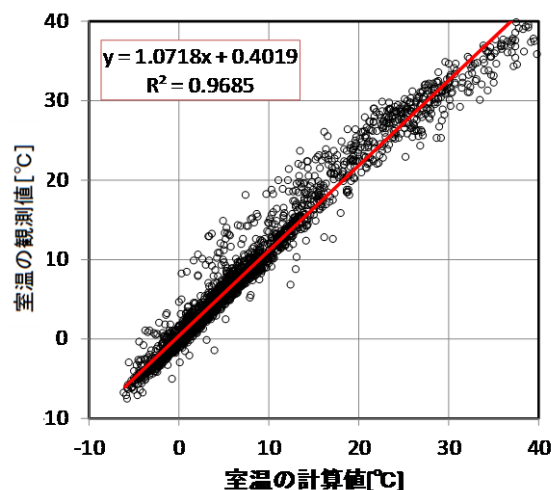


図 3. 11 TRNSYS による自然室温の計算結果と地中熱室の自然室温の観測結果の比較

2012 年 11 月 1 日～2013 年 1 月 31 日

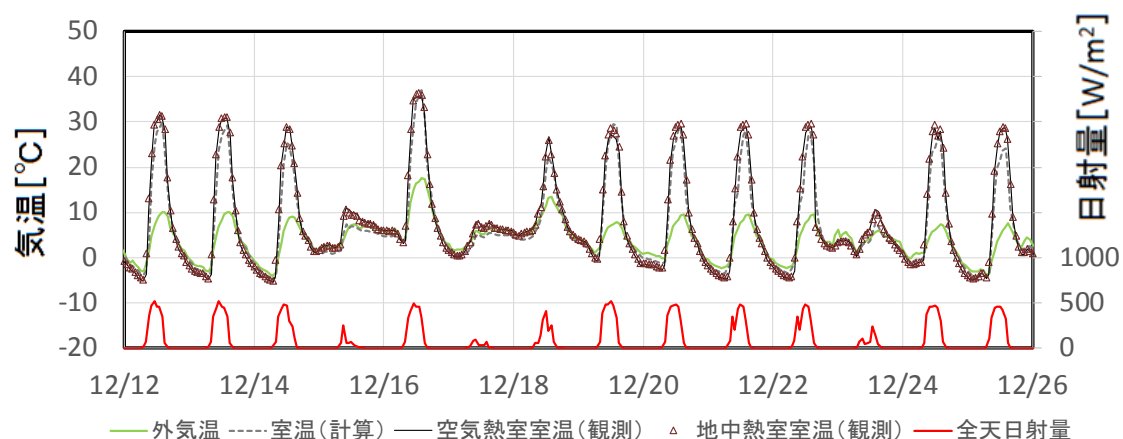


図 3. 10 自然室温の観測及び計算結果の比較（2012 年 12 月 12 日～12 月 25 日）

自然室温について数値計算の再現性が得られたので、次に、ユニットハウスにおいて、様々な空調負荷の調整を行った場合の効果を検討した。負荷調整の手段として、調整なしを「現状ケース」、窓面を断熱材で遮蔽する「低負荷ケース」、窓面遮蔽に加えて強制換気 $360\text{m}^3/\text{h}$ を終日行う「中負荷ケース」、さらに換気量を $720\text{m}^3/\text{h}$ に倍増させた「高負荷ケース」の 4 種類を設定した。計算期間は、11 月 1 日から 1 月 31 日とし、気象条件は、拡張アメダス気象データ（下妻）を用いた。室温 20°C の連続運転の条件で、各ケースの熱負荷計算を実施し、計算結果を頻度で表したのが図 3. 12 である。（a）現状ケースの場合、南面の窓からの日射により昼間の室温上昇が大きく、暖房負荷が発生しない時間帯が生じ、中・高負荷のデータ取得が困難であることが分かる。（b）低負荷ケースは、窓面の日射遮蔽により日中でも暖房負荷が発生するようになるが、部分負荷率は全体的に 20%以下になっている。（c）中負荷ケースでは、換気も行うことで 20～70%の負荷発生が見込める。さらに、（d）高負荷ケースでは、換気量の増加により、負荷率を 100%以上に引き上げることができる。また、室温 24°C の連続運転の計算も別途実施し、室温 20°C の連続運転と比較して、負荷率が 10%程度増加する傾向を確認した。計算結果を踏まえ、実証実験を様々な条件で実施した。実際に行われた実証実験のスケジュールを表 3. 3 に示す。

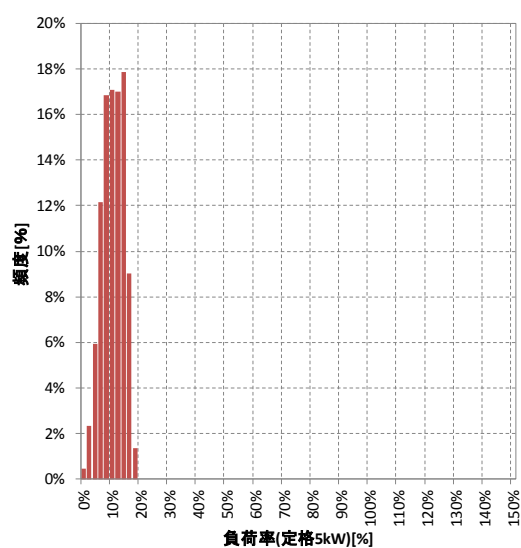
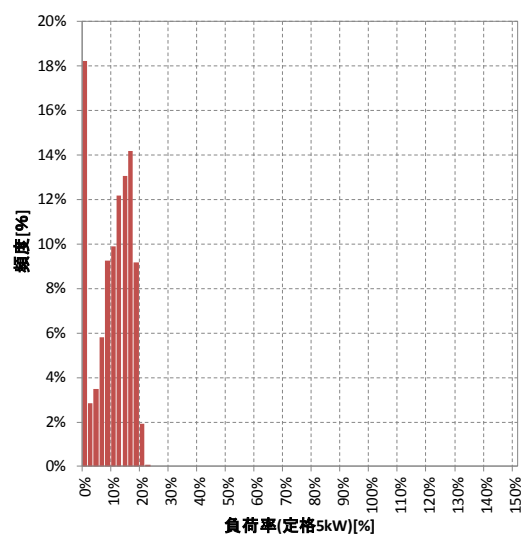
主な計測項目を以下に示す。計測点は全部で 74 か所あり、これらを 1 秒間隔でデータロガーに収録した。各種計測状況を写真 3. 7～3. 10 に示す。実証実験の実施時期は、2013 年 11 月 27 日から 2014 年 1 月 31 日である。

【主な計測項目】

- ・室温：各室の中央における室温（床面高さ：100mm、1100mm、1700mm、天井下 100mm）
- ・グローブ温度：各室の中央におけるグローブ温度（床面高さ：1100mm）
- ・室内機：各室内機のファン回転数、ボディサーモ温度（制御用温度検知機付近にセンサ

を貼り付けて測った温度)、吸込・吹出温度

- ・電力消費量：各ヒートポンプの電力消費量（地中熱は循環ポンプを含む）
- ・地中熱システムの循環水：流量、往温度、復温度
- ・地中温度：地中温度 15 点（深さ 1～10m は 1m ピッチ、14m、20m、30m、40m、50m）
- ・気象条件：外気温、相対湿度、全天日射量、風速等



(b) 低負荷ケース

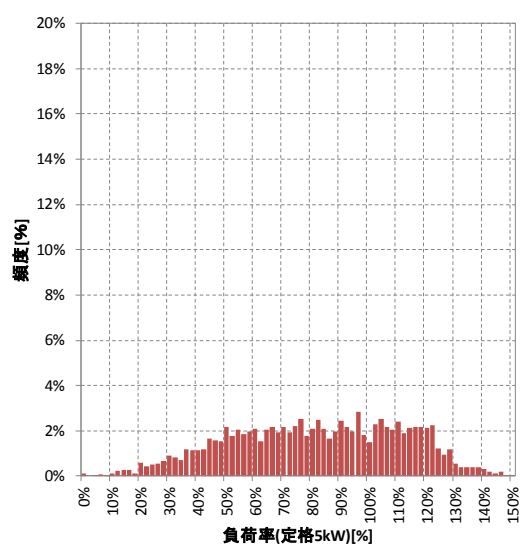
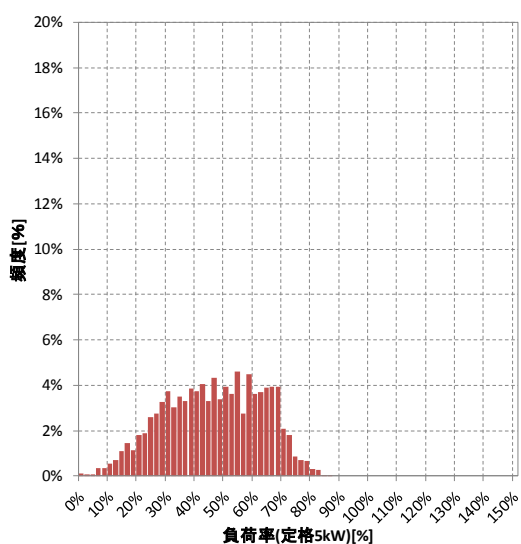


図 3. 1 2 ユニットハウスを対象にした暖房負荷の頻度分布に関する数値計算結果
(地域：下妻、時期：11/1-1/31、運転条件：室温 20℃連続運転)

表 3. 3 実証実験のスケジュール

名称	時期	負荷対策	運転条件
LC24a	2013 年 11 月 27 日 ~2013 年 12 月 4 日	低負荷ケース：窓面遮蔽	室温 24℃、連続運転
MC20a	2013 年 12 月 6 日 ~2013 年 12 月 17 日	中負荷ケース：窓面遮蔽＋換気 360m ³ /h	室温 20℃、連続運転
LC24b	2013 年 12 月 19 日 ~2013 年 12 月 25 日	低負荷ケース：窓面遮蔽	室温 24℃、連続運転
MC20b	2013 年 12 月 27 日 ~2014 年 1 月 8 日	中負荷ケース：窓面遮蔽＋換気 360m ³ /h	室温 20℃、連続運転
MI20	2014 年 1 月 10 日 ~2014 年 1 月 15 日	中負荷ケース：窓面遮蔽＋換気 360m ³ /h	室温 20℃、間欠運転 (3:00-9:00)
HI24	2014 年 1 月 17 日 ~2014 年 1 月 31 日	高負荷ケース：窓面遮蔽＋換気 720m ³ /h	室温 24℃、間欠運転 (3:00-9:00)



写真 3. 7 室内環境の計測



(a) ファン回転数



(b) ボディサーモ

写真 3. 8 室内機の計測



写真3. 9 地中システムの計測



写真3. 10 外界気象の計測

(3) 地中熱計測機器精度の現地確認

地中熱利用設備の評価を行うに当たり、計測機器の精度確認は重要な視点である。現地の地中採熱管に設置した流量計の精度確認及びブライン濃度の現地計測を行った。作業の実施日は、2015年3月24日である。

ブライン濃度については現地において地中採熱管からブラインを取り出し、ブライン濃度計を使って目視で判定した。写真3. 11はブライン濃度計の表示であり、四角で囲った部分の数値が濃度となる。現地観測ではブライン濃度は30%（ブライン温度14℃）であった。

地中採熱管内の流量については、暫定的に循環ポンプと電磁流量計を地中採熱管に取り付けて、既存の流量計の計測値の精度を検証した。検証の様子を写真3. 12に示す。

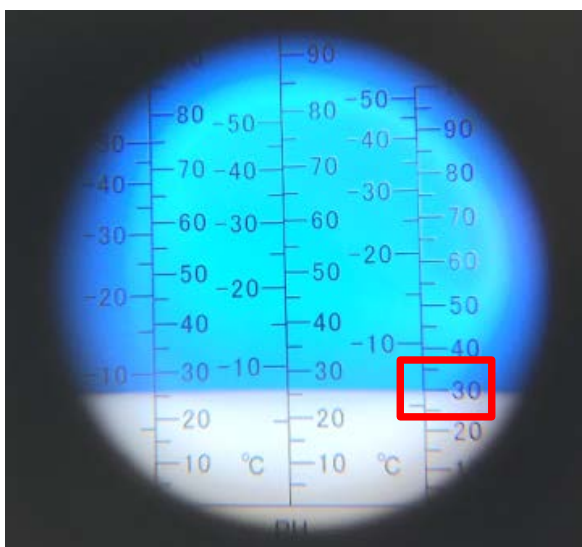


写真3. 11 ブライン濃度

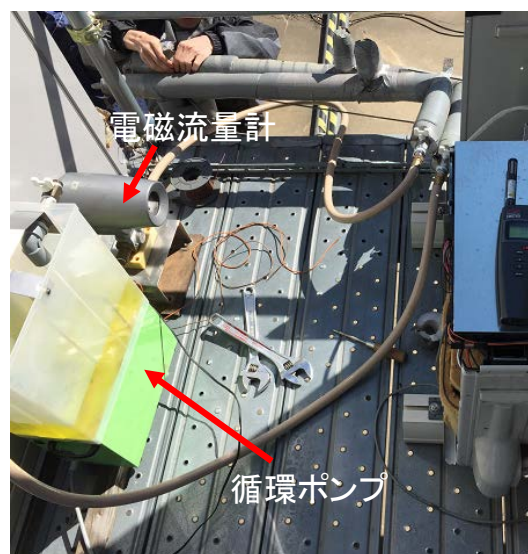


写真3. 12 地中採熱管内流量の検証

現地で得られたブライン濃度 30%における各種物性値を表 3. 4 に示す。これらは、プロピレングリコールの物性値から推定したものである。

図 3. 1 3 は流量計の精度について既設の流量計（羽根車式：媒体は水を基本とする）と暫定的に取り付けた流量計（電磁流量計：媒体は問わない）の計測値を比較したものである。既設の流量計が流量を過大に評価していることが分かる。今回は安価で取り扱いしやすい羽根車式を選択したが、1 次側の熱量評価において流量計の選択は重要な課題であると言える。

現地計測結果を踏まえ、以降の分析ではブラインについては表 3. 4 に示す濃度 30%の物性値を用い、流量計の観測値は図中（図 3. 1 3）に示す係数（0.6861）で補正する。

表 3. 4 ブラインの物性

項目		30%(15℃)
密度	kg/m ³	1030
比熱	J/kgK	3870
粘性	mPa・s	4.0
熱伝導率	W/mK	0.44

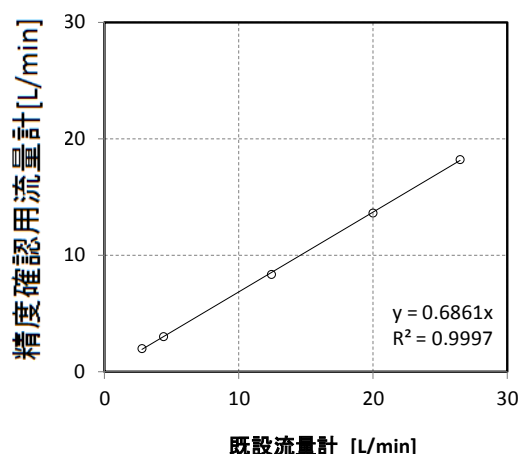


図 3. 1 3 流量計の精度比較

（４）外気温度及び室内熱環境の計測結果

外気温度の日統計量として、日平均、日最高、日最低及び標準偏差について各日の挙動を表したのが図 3. 1 4 である。実証実験の開始当初は日平均気温が 10℃前後であったのが、日を迫うとともに低下し、MI20（1/10-1/15）では日平均気温が氷点下を記録した後、HI24（1/17-1/31）では日平均気温 5℃程度まで上昇に転じている。

室温については、室中央において高さ方向に 4 点（床上 100mm、1100mm、1700mm、天井下 100mm）の同時計測を行っているので、これらを加重平均し、地中熱室、空気熱室について同様の手順で日統計量の経時変化を図 3. 1 5 に示した。まず、（a）地中熱室について LC24a、LC24b では目標値 24℃を日平均室温でほぼ再現するのに対し、MC20a、MC20b では目標値 20℃より高めの 23～24℃の日平均室温となっている。これは、日中の温度上昇に伴い、比較的低い制御温度を室温が上回るためである。間欠空調時（MI21、HI24）の室温は大きく変動していることがわかる。（b）空気熱室でも全体的には同様の結果が得られている。ただし、日最低気温が地中熱室の場合よりも大きく落ち込む日が散見される（図中、丸で囲んだ部分）。これは、デフロストによる影響と考えられ、制御室温が低い MC20a、MC20b において顕著に現れる現象である。また、同一の室温条件を課したにも関わらず、全体的に空気室の室温は、地中熱の室温よりもわずかに低い。

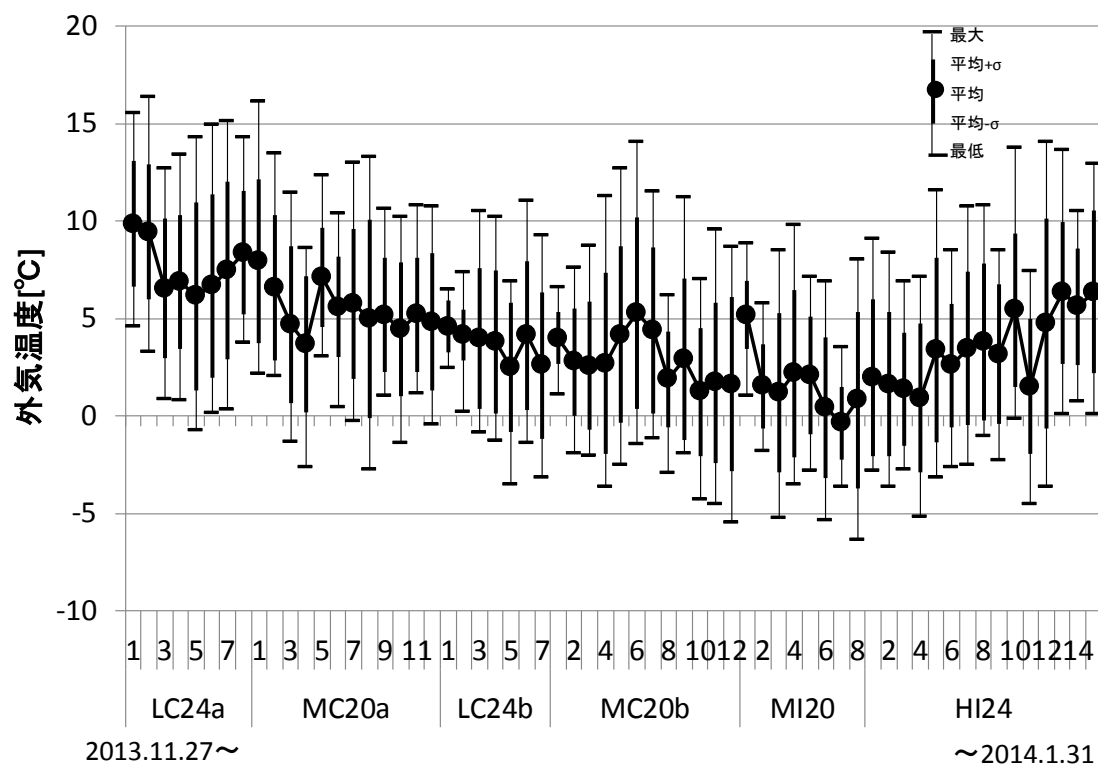
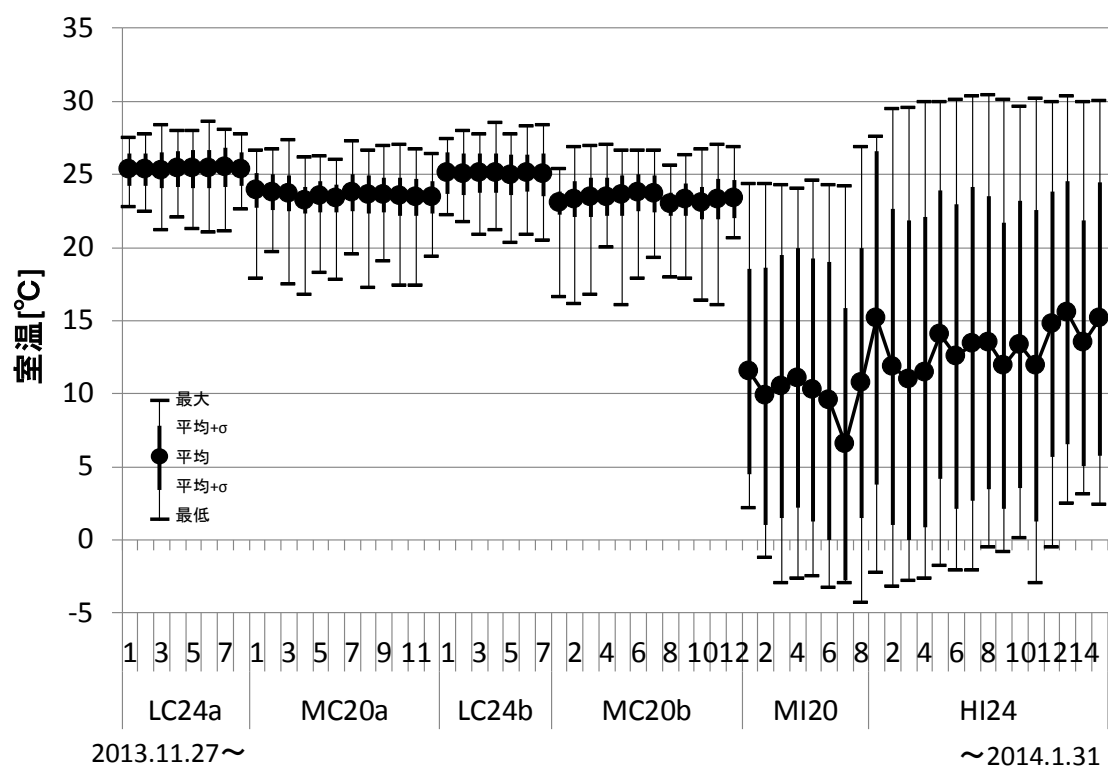


図3. 14 外気温度の日統計量の推移（2013年11月27日～2014年1月31日）

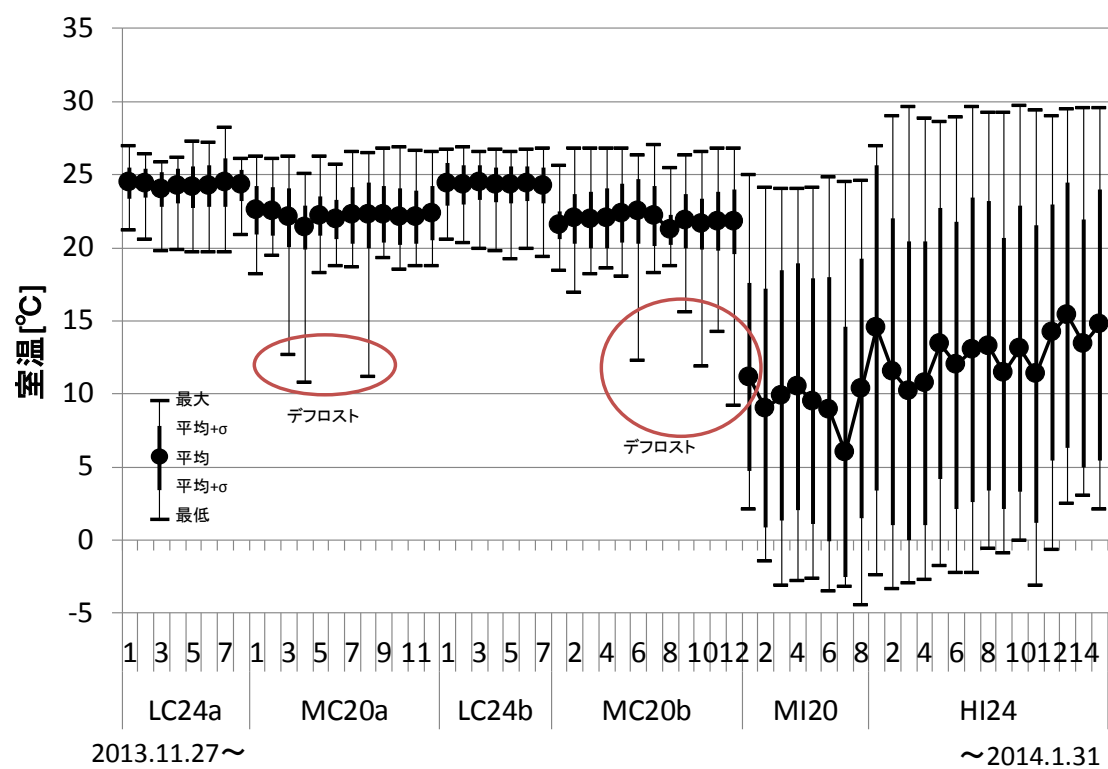
グローブ温度（室中央、床上1100mm）について、同様に図3. 16に示す。グローブ温度の日統計量は、室温のものと似ている。ただし、（a）地中熱室、（b）空気熱室ともに、グローブ温度の日平均値が室温のそれよりもわずかに低く、日最低温度では逆にグローブ温度が室温より高い。また、グローブ温度に関しても全体的に空気室の温度は、地中熱の温度よりもわずかに低い。

（5）2次側の計測結果

図3. 17はエアコンの電力消費量の日積算値の挙動を示したものである。総じて、地中熱室の電力消費量が、空気熱室のそれよりも低い値で推移していることがわかる。なお、地中熱ヒートポンプの場合、電力消費量は地中熱交換器（1次側）の循環ポンプの駆動電力を含む。

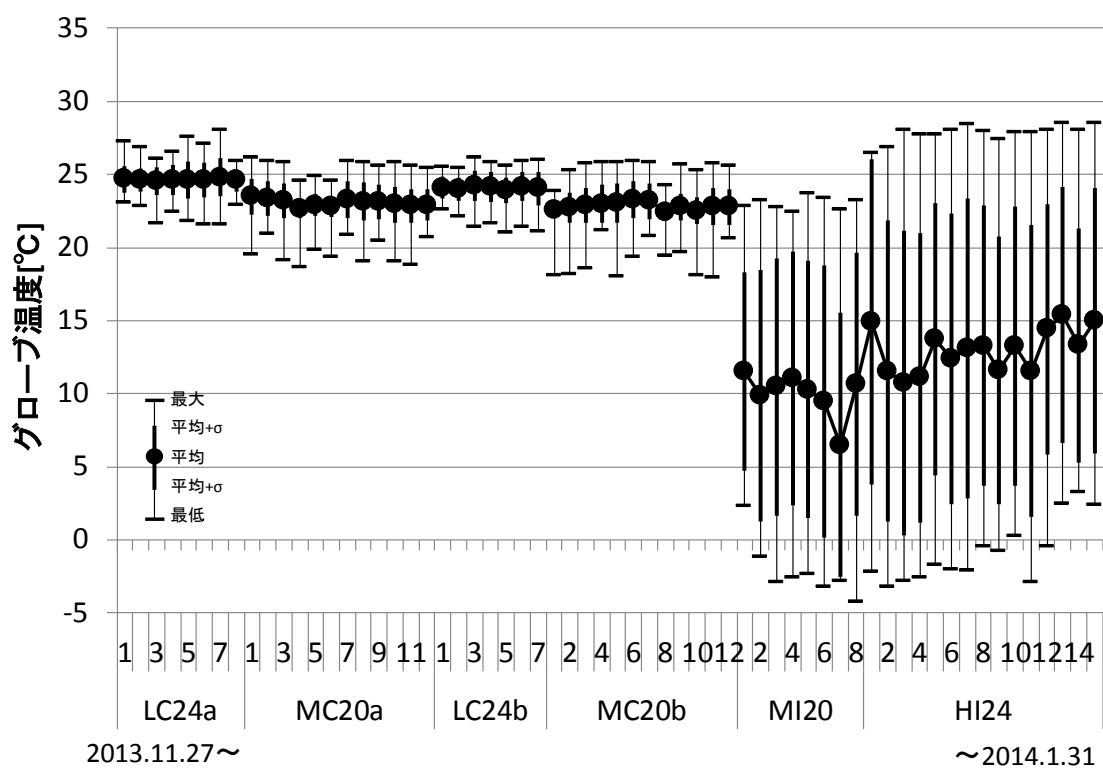


(a) 地中熱室

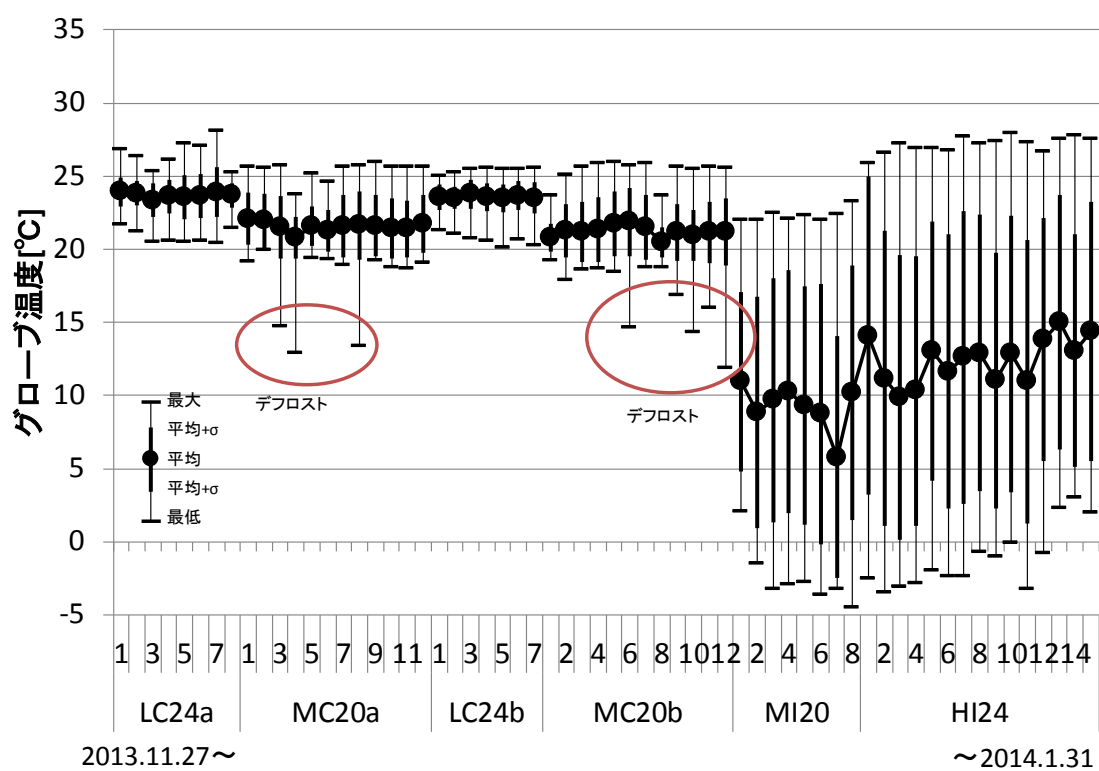


(b) 空気熱室

図3. 15 室温の日統計量の推移 (2013年11月27日～2014年1月31日)



(a) 地中熱室



(b) 空気熱室

図3. 16 グローブ温度の日統計量の推移 (2013年11月27日～2014年1月31日)

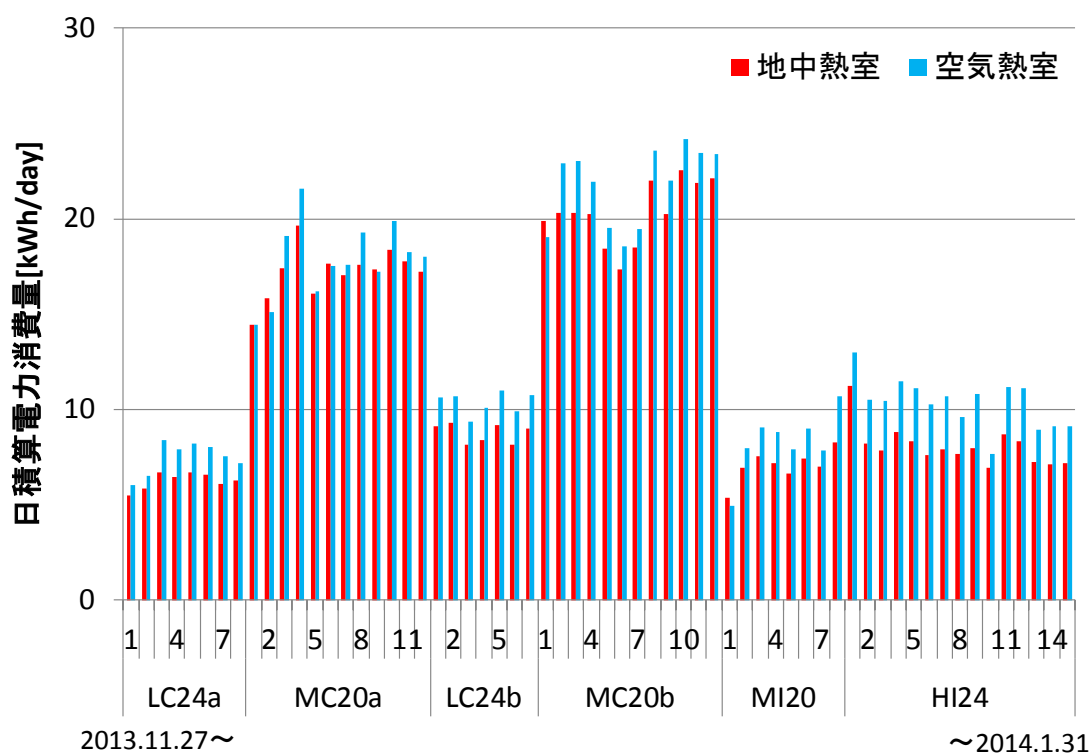


図3. 17 日積算電力消費量の推移（2013年11月27日～2014年1月31日）

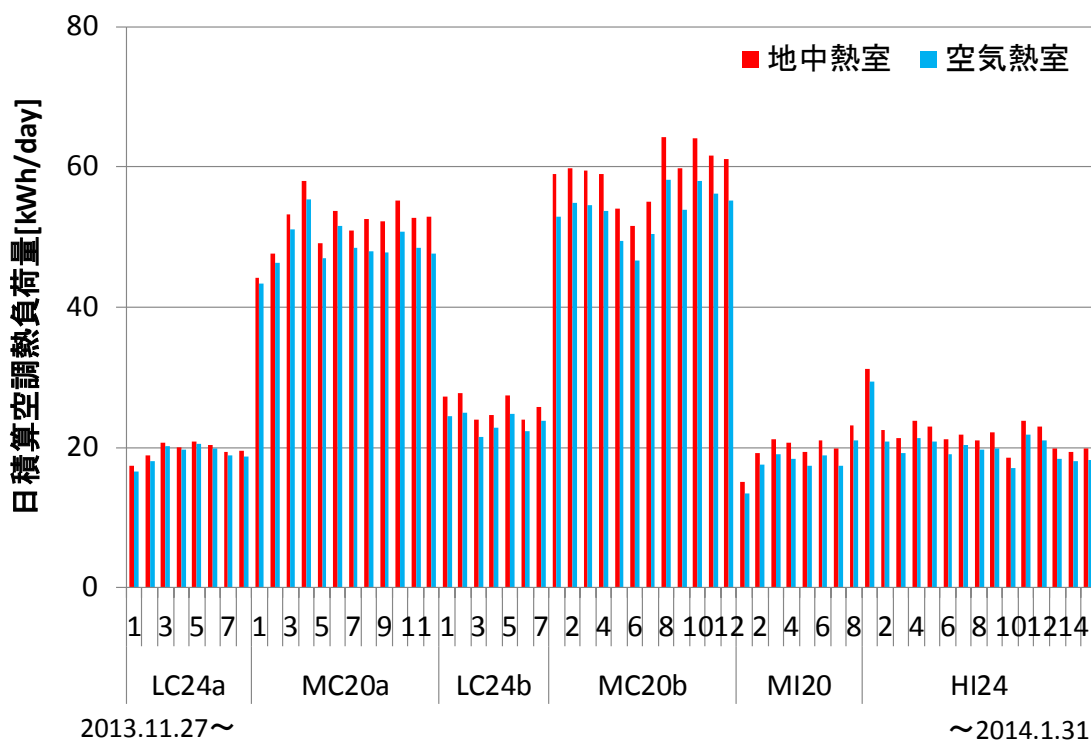


図3. 18 日積算空調熱負荷量の推移（2013年11月27日～2014年1月31日）

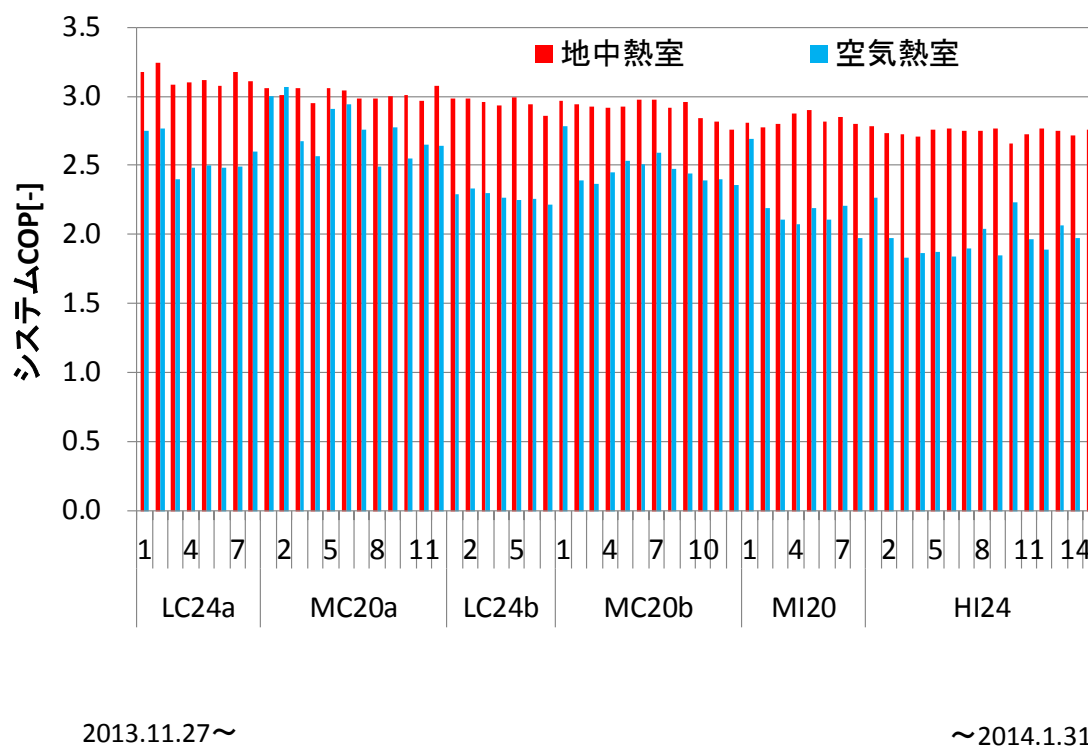


図3. 19 日平均システム COP の推移 (2013 年 11 月 27 日～2014 年 1 月 31 日)

表3. 5 日積算電力消費量、システム COP の期間平均値

期間名称	地中熱室			空気熱室			電力削減率[%]
	電力消費量	空調熱負荷量	システム COP	電力消費量	空調熱負荷量	システム COP	
	[kWh/day]		[-]	[kWh/day]		[-]	
LC24a	6.28	19.66	3.14	7.49	19.09	2.56	16.18
MC20a	17.21	51.89	3.02	17.85	48.84	2.75	3.63
LC24b	8.76	25.87	2.95	10.36	23.54	2.27	15.42
MC20b	20.32	59.07	2.91	21.76	53.65	2.47	6.60
MI20	7.06	19.96	2.83	8.30	17.90	2.19	14.92
HI24	8.09	22.18	2.74	10.35	20.37	1.97	21.86

図3. 18は、空気エンタルピー法に基づき、エアコンの風量に吹出・吸込温度の差を乗じてエアコンから室内に投入された日積算熱量(暖房熱負荷量)に換算したものである。エアコンの風量はファン回転数の計測値より求めた。空調熱負荷は、全体的に空気熱室の方が地中熱室より低めになっていることが分かる。これは、空気熱室の室温制御が地中熱室よりわずかに低く行われたことが起因している。

システム COP の挙動を図 3. 19 に示す。全体的に、地中熱室のシステム COP が、空気熱室の値を上回っている。

各実験期間で電力消費量、空調熱負荷量の日積算値を期間平均し、空気熱室の電力消費量を基準とした電力削減率、各室のシステム COP とともに表 3. 5 に一覧で示す。電力削減率は 3.63～21.86% となり、地中熱ヒートポンプシステムが空気熱ヒートポンプシステムに対して省電力となる結果が得られた。また、地中熱室のシステム COP 値は、空気熱室のそれと比べて高く、0.3～0.8 の差が表れている。したがって、同一メーカー、同一タイプの冬期比較において、電力消費量の少なさや成績係数の面で空気熱システムに対して地中熱システムの優位性が認められたと言える。

(6) システム COP の特性

室内熱負荷量、電力消費量の 1 秒計測値を 1 時間値に積算し、室内熱負荷とシステム COP の頻度分布とともに地中熱室、空気熱室のシステム COP の部分負荷特性を図 3. 20 の (a)、(b) にそれぞれ表す。(a)、(b) とともに、部分負荷率 0.2 の辺りでシステム COP の値が高くなっており、部分負荷率の発生頻度は部分負荷率 0.2 前後のものが多く、システム COP の発生頻度はシステム COP が 3 前後で高い値を示す。システム COP と部分負荷率の関係において、各数値のばらつき具合や特性カーブの形状などで両者に相違が見られることから、地中と空気の熱源温度の違いが予想される。

図 3. 21 は外気温度を横軸にとり、各室のシステム COP との関係を示したものである。外気温度が低下するにつれて、空気熱室に対して地中熱室のシステム性能が有利になる様子が分かる。地中熱室にとっては、地中熱交換器からの環水が熱源であるが、温度範囲が狭いため良好な相関図を得ることはできなかった。

図 3. 22 に各室の熱源温度として、実証実験期間における採熱管の環水温度と室外機の吸込空気温度の頻度分布を示す。環水温度は、吸込空気温度より 10℃程度高く、15℃前後に頻度が集中していることが分かる。

このように熱源温度として地中熱は空気熱より冬期において有利となる。

部分負荷率と電力消費量の関係を図 3. 23 に示す。図中にはシステム COP も斜め線で記載してある。部分負荷率が大きくなると、空気熱室のシステム COP が低下して電力消費量の増加が加速され、地中熱室の電力消費量と乖離する様子が分かる。

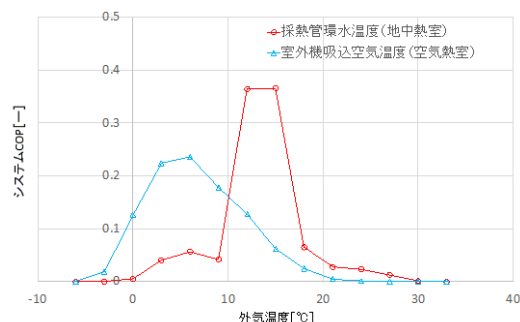
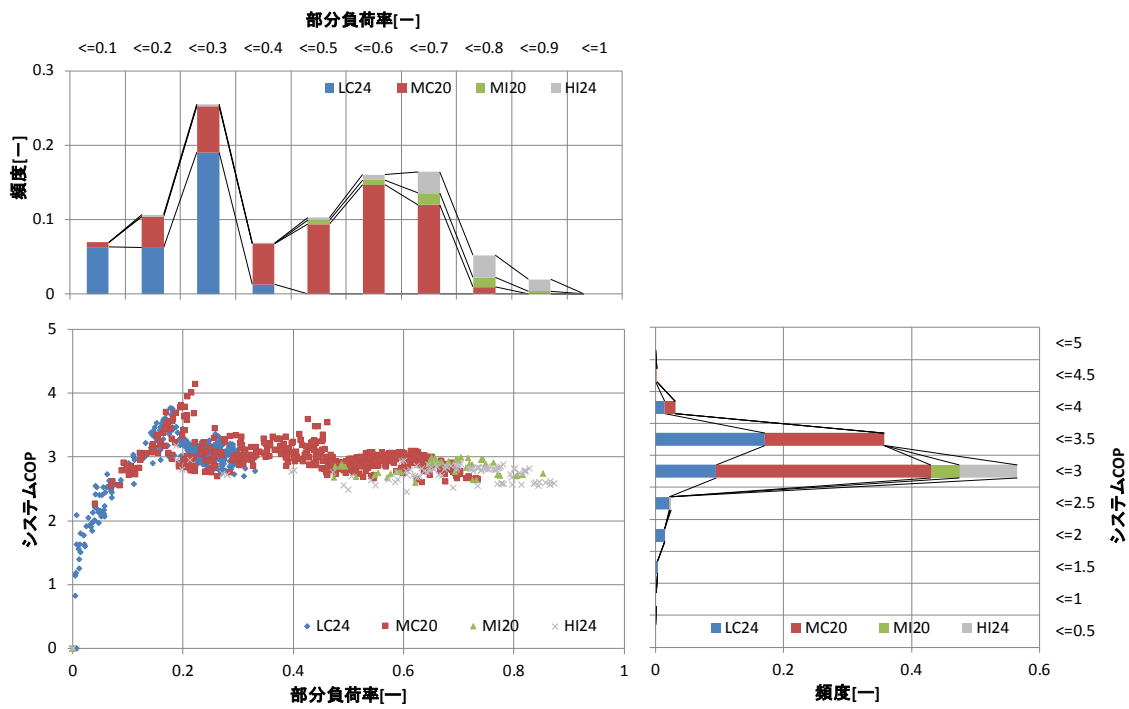
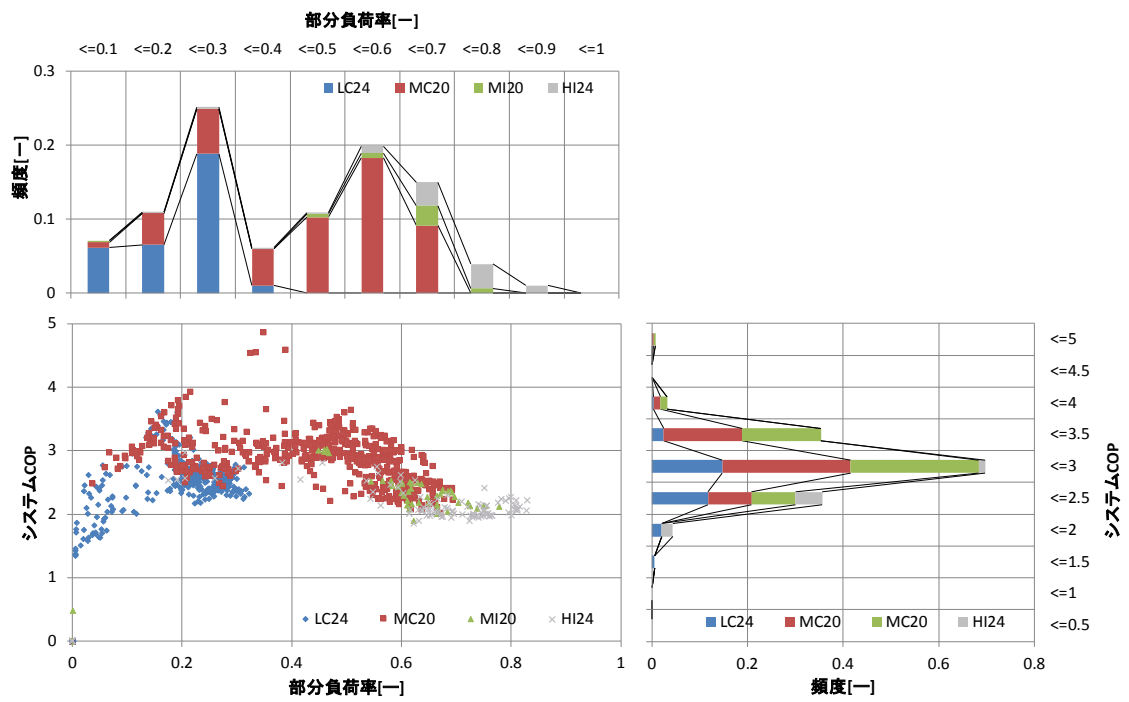


図 3. 22 熱源温度の頻度分布 (2013 年 11 月 27 日～2014 年 1 月 31 日)



(a) 地中熱室



(b) 空気熱室

図3. 20 部分負荷率とシステムCOPの関係

(2013年11月27日～2014年1月31日)

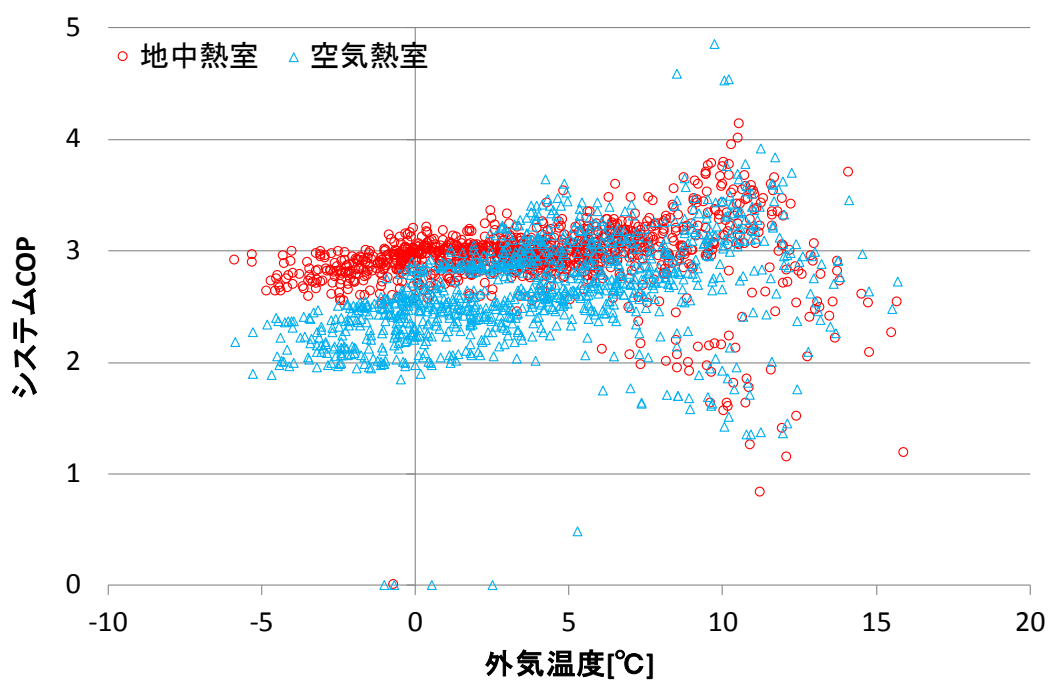


図3. 2 1 外気温度とシステム COP の関係
(2013 年 11 月 27 日～2014 年 1 月 31 日)

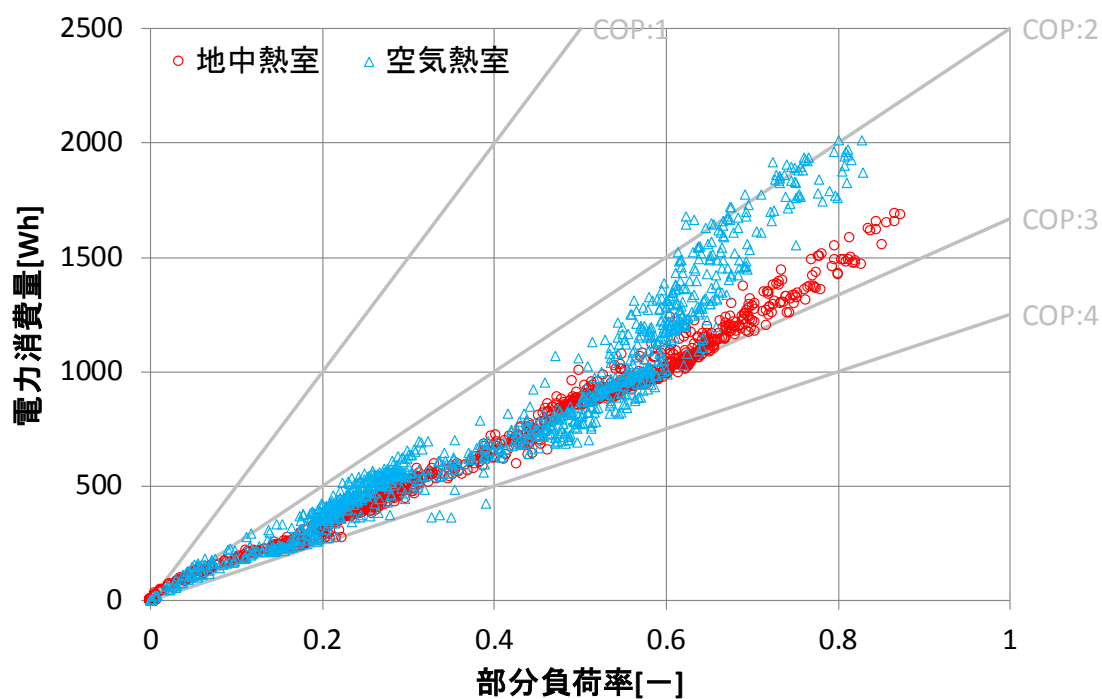


図3. 2 3 部分負荷率と電力消費量の関係
(2013 年 11 月 27 日～2014 年 1 月 31 日)

(7) 代表日における日変化

日挙動の検討を行うため、代表日を以下のように選定する。1 秒計測値を 15 分平均値に積算したものを分析に用いる。

- ・代表日 1(LC20b)：2013 年 12 月 25 日
- ・代表日 2(MC20b)：2014 年 1 月 6 日
- ・代表日 3(MI20)：2014 年 1 月 12 日
- ・代表日 4(HI24)：2014 年 1 月 22 日

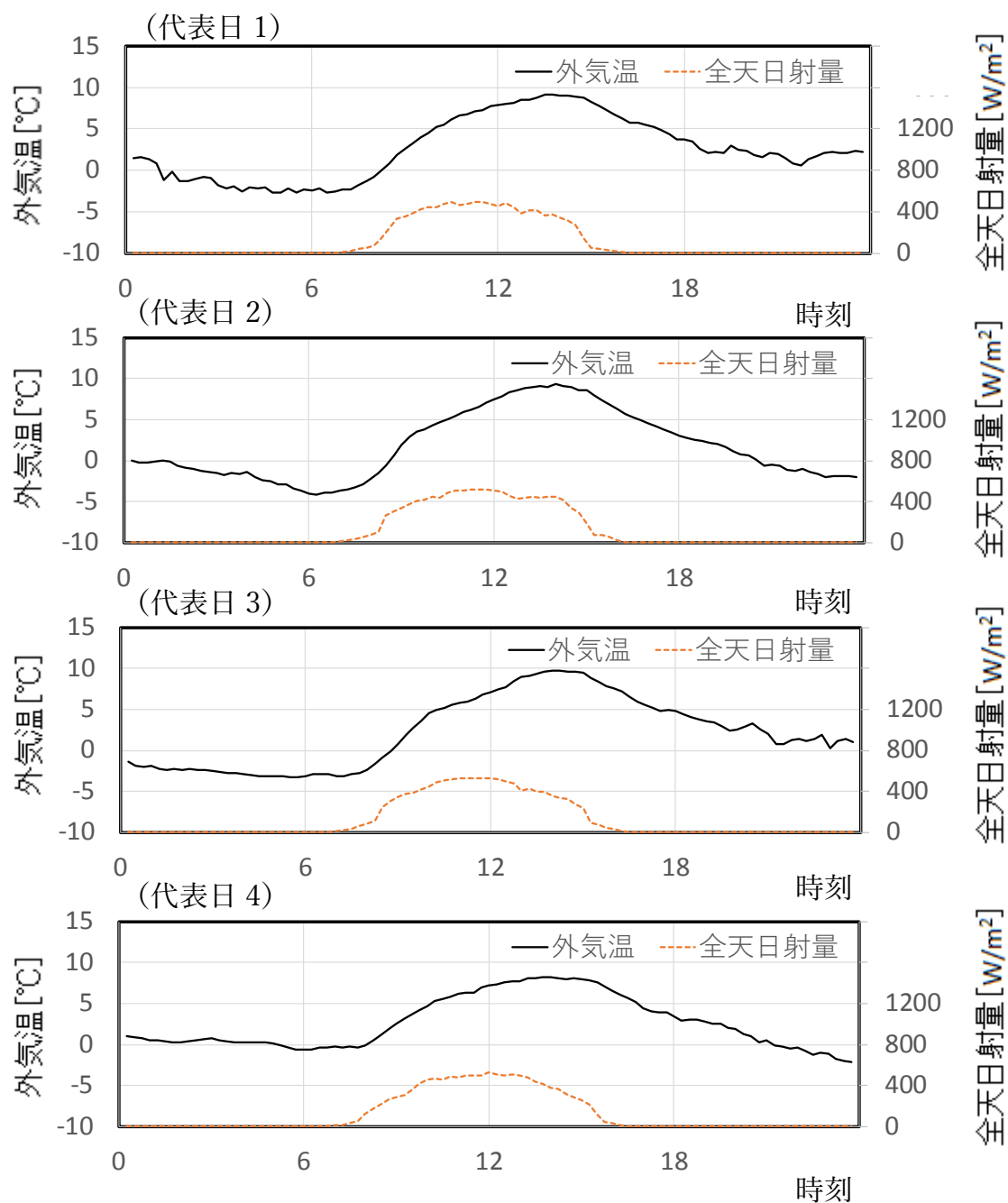


図3. 24 外気温及び日射量の日変動 (代表日 1, 2, 3, 4)

各代表日における外気温及び日射量の日変化を図3. 24に示す。外気温は夜間において氷点下まで下降し、日中には10℃程度に上昇する。日射量は400～500W/m²であり、冬期としては好天の部類に入る。

図3. 25は地中熱室における室温及び空調熱負荷量の日挙動を示したものである。室温は、室中央、床面1,100mm高さの計測値、空調熱負荷量は空気エンタルピー法に基づく観測値である。代表日1、2は連続空調の場合であり、室温は目標値にほぼ保たれている

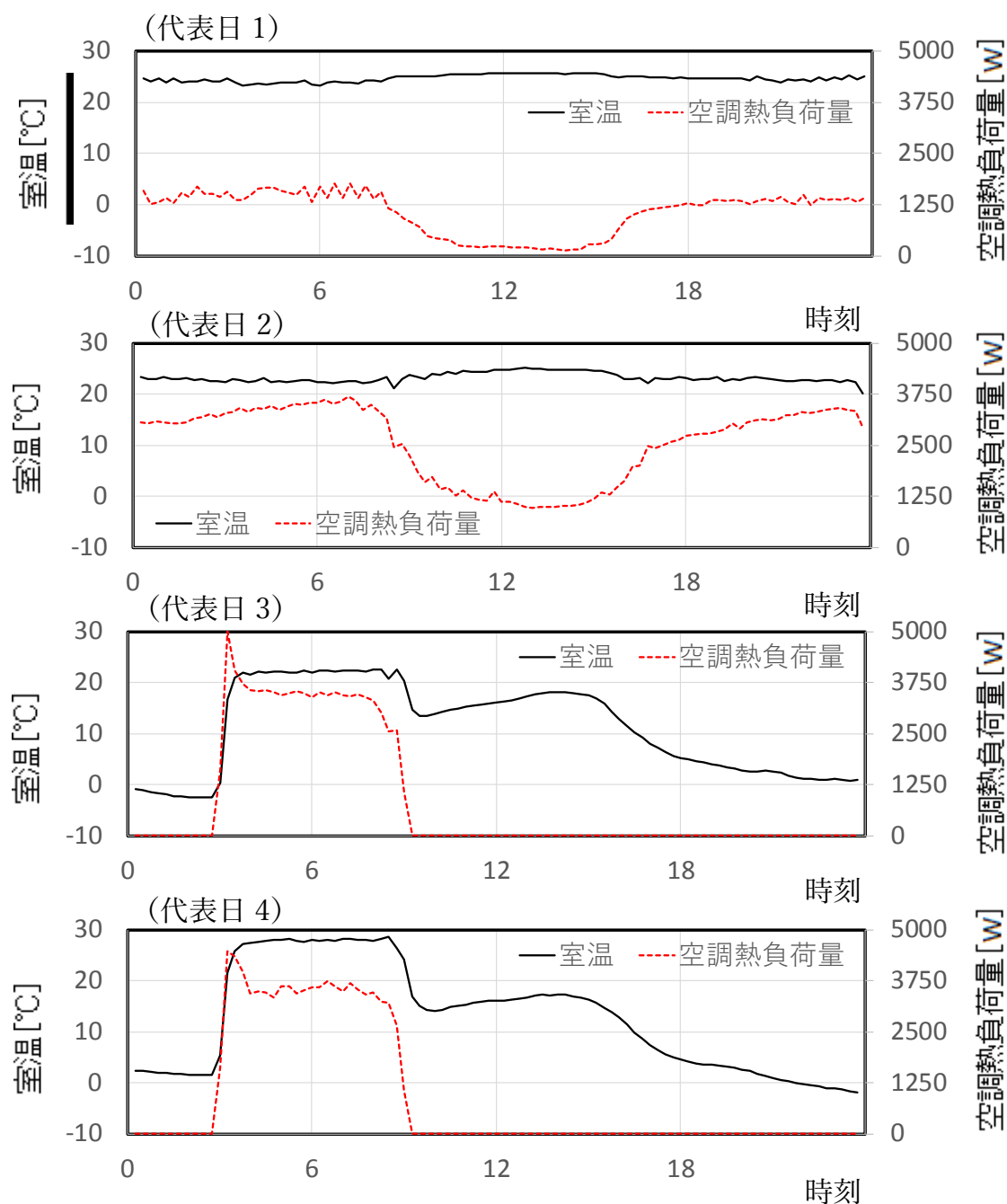


図3. 23 室温及び空調熱負荷量の日変動（地中熱室）（代表日1, 2, 3, 4）

ことが分かる。空調熱負荷量（暖房）は、日中より夜間に大きく、負荷対策に対応して代表日1<代表日2となっている。代表日3、4では間欠空調（3～9時）を行っており、両者の負荷対策は異なるが、空調熱負荷には大きな違いは見られない。

同様のデータ整理を空気熱室について行い、図3. 26に経時変化を示す。代表日3、4では、間欠空調時にデフロストに伴う断続的な運転が行われるため、地中熱室のものより室温の変動が大きくなっている。そのため、結果的に空調熱負荷量は減少するが、室温の

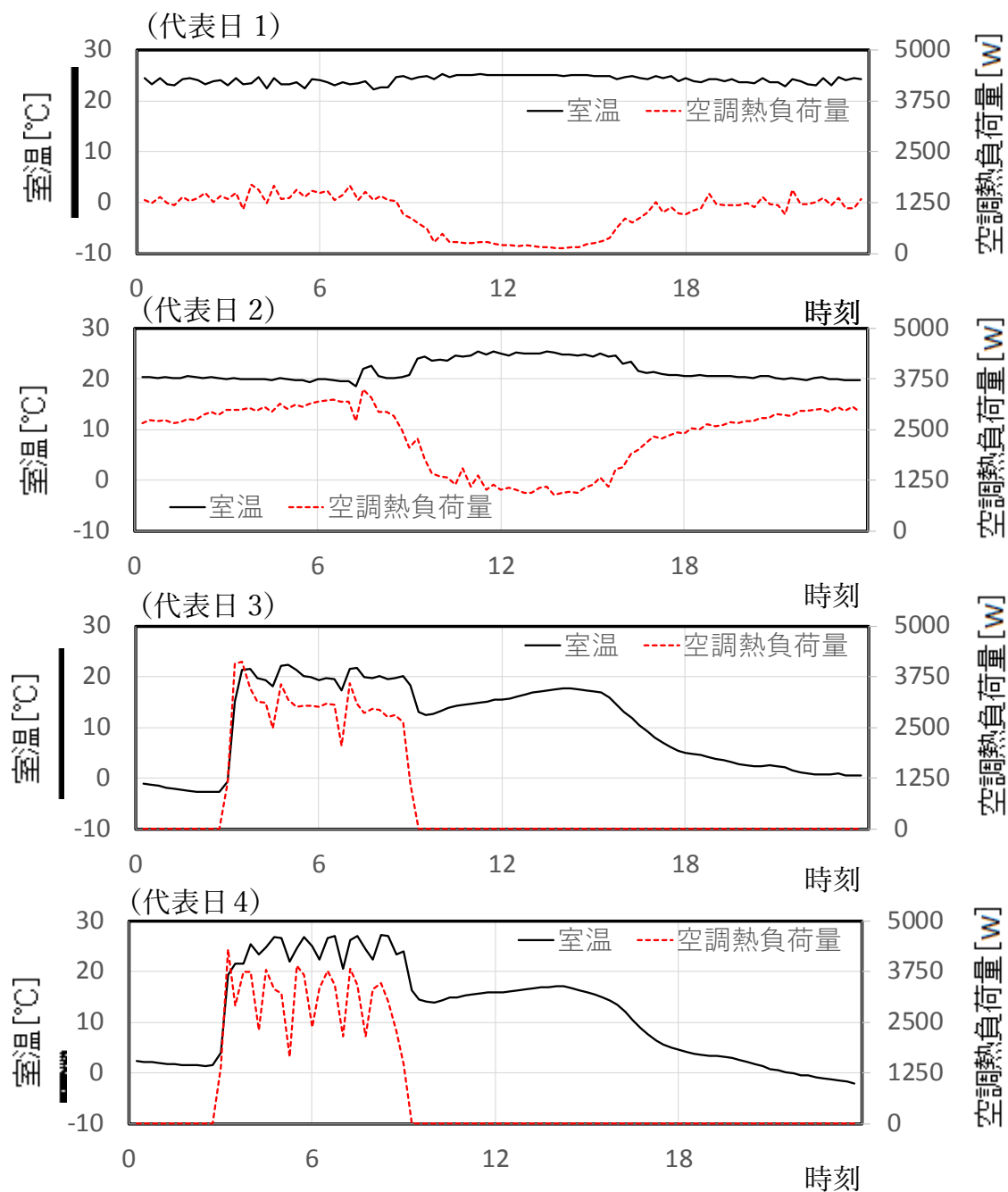


図3. 26 室温及び空調熱負荷量の日変動（空気熱室）（代表日 1, 2, 3, 4）

目標値を達成できない場合が見られ、熱環境の面から課題を残す。

図3. 27は、地中熱室のシステム COP 及び電力消費量の日挙動を表したものである。目標値を達成できない場合があるので熱環境の面から課題を残す。連続空調については、代表日1に対して代表日2の電力消費量が増加する一方、日中のシステム COP は、代表日1より代表日2の数値が大きい。これは低負荷運転の代表日1に対して、中負荷運転の代表日2では部分負荷率が高まったためである。間欠空調時のシステム COP、電力消費量は、

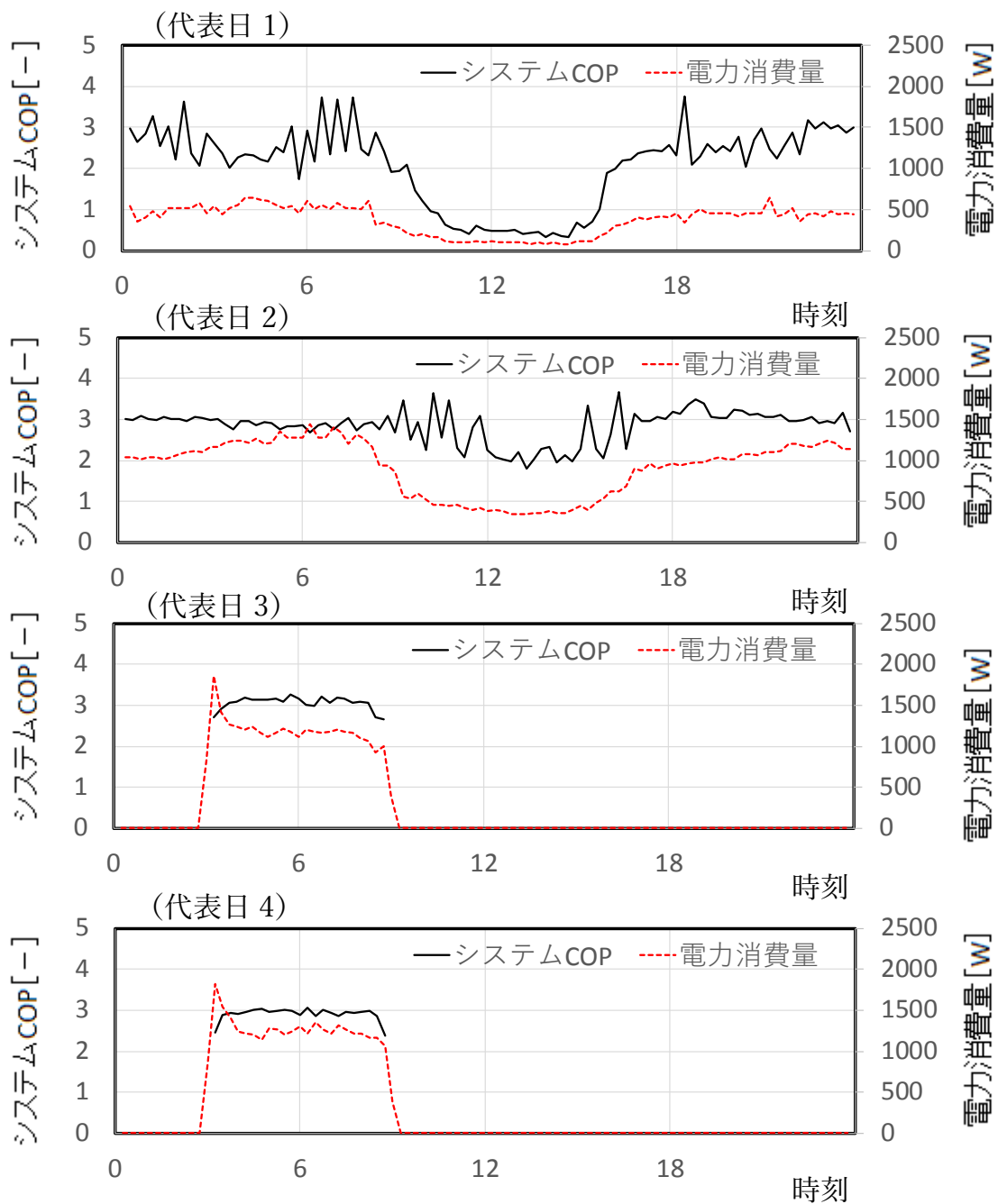


図3. 27 システム COP 及び電力消費量の日変動（地中熱室）（代表日 1, 2, 3, 4）

両日似た挙動を示している。

図3. 28は、空気熱室について同様に表したものである。連続空調における傾向は地中熱室の場合とあまり変わらない。間欠空調時には、代表日3、4ともにシステムCOP及び電力消費量が大きく変動している。両日の電力消費量は、地中熱室のものより大きくなっており、理由としてデフロスト運転による損失が考えられる。また、システムCOPの値は、両日ともに地中熱の場合より低く現れている。このように、特に厳寒時期において、両シ

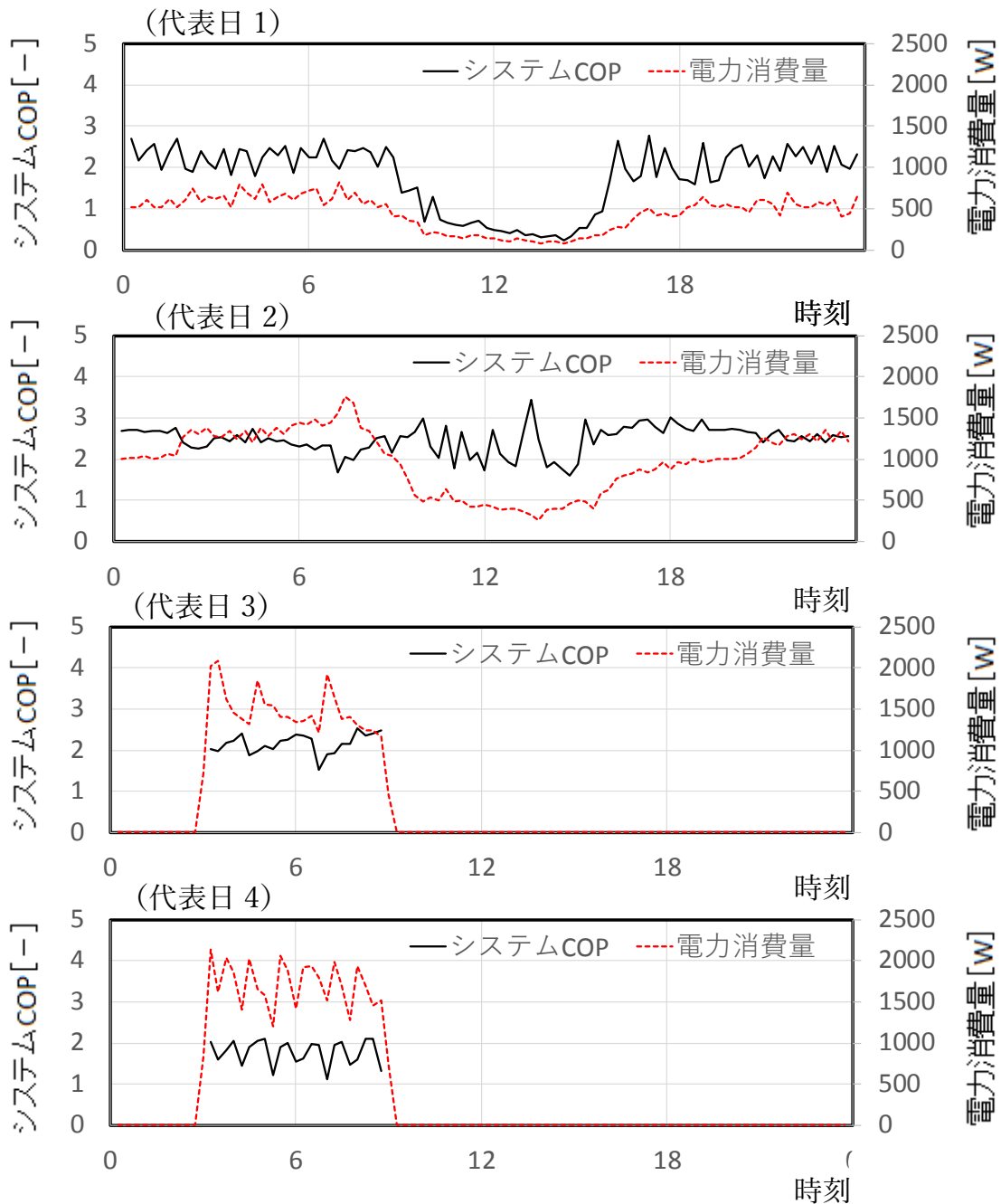


図3. 28 システムCOP及び電力消費量の日変動（空気熱室）（代表日1, 2, 3, 4）

システムの差は顕著になると言え、安定した熱源を背景とした地中熱システムは、空気熱システムと比較してエネルギー性能や熱環境形成において効果を発揮することが示された。

エアコンからの吹出空気温度及び風量の日変動を、まず地中熱室について図3. 29に示す。ファンの回転数をパルス計測し、事前に作成した検量線からエアコンの風量を推定した。エアコンの風量は一定ではなく、代表日1、2では、夜間において風量も大きくなっている。また、吹出空気温度においても同様の挙動を示しており、日中は30～35℃、夜間40～53℃を示している。一方、間欠運転時には吹出空気温度は、代表日3、4ともに60℃

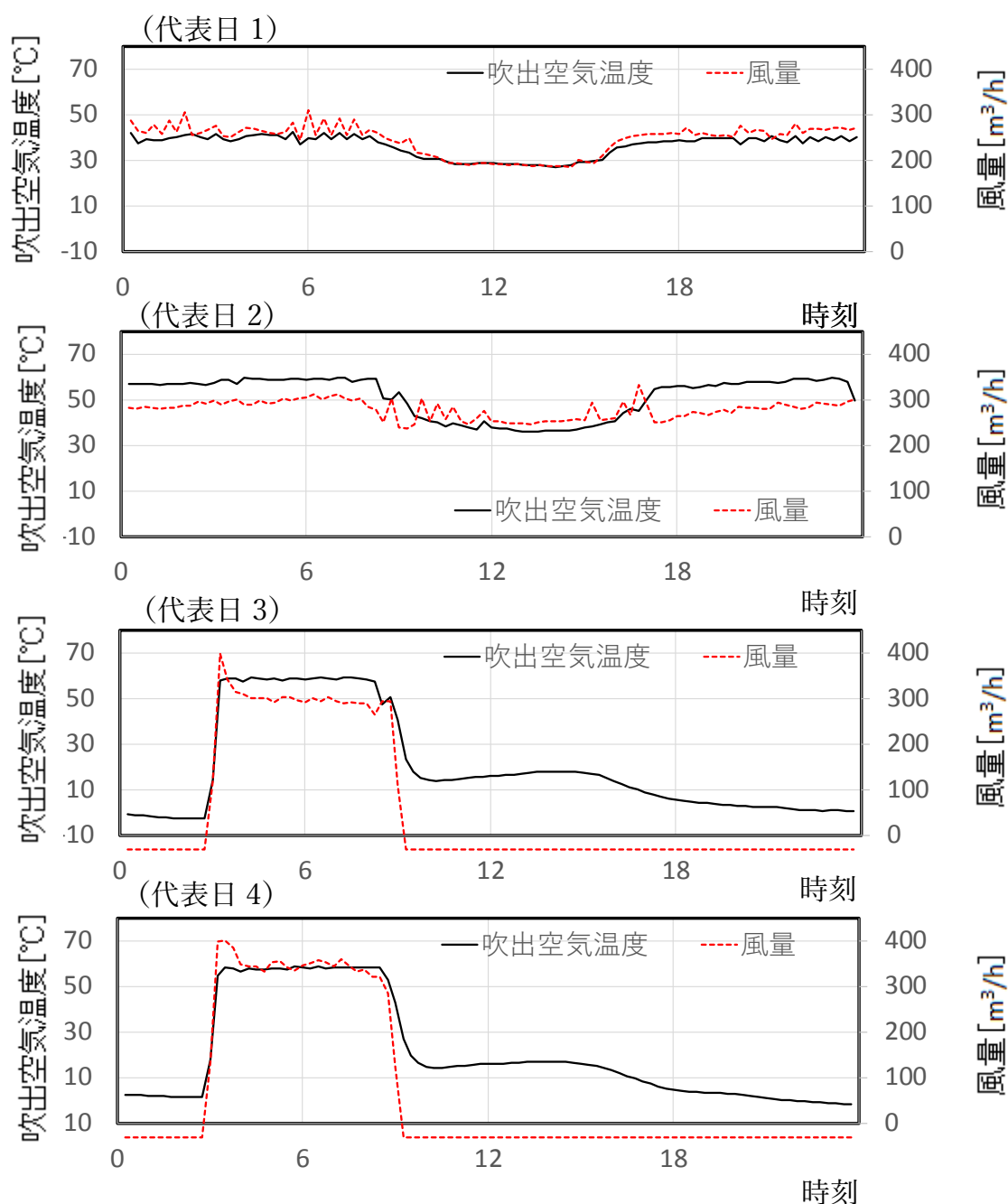


図3. 29 吹出空気温度及び風量の日変動（地中熱室）（代表日 1, 2, 3, 4）

前後で頭打ちとなる。風量については、代表日 4>代表日 3 となって、風量の調整により室内熱負荷を賄っている。

空気熱室について同様に図 3. 30 に示す。代表日 1、2 のエアコンの風量、吹出空気温度の挙動は地中熱室と似ている。代表日 3、4 のエアコンの風量は大きく変動しており、図 3. 28 で示した電力消費量の変動と対応している。吹出空気温度も変動が大きく現れており、地中室の場合より温度レベルが低く、45～53℃程度で推移している。

次に、地盤側の計測結果を述べる。したがって、以降は地中熱室の場合となる。まず、

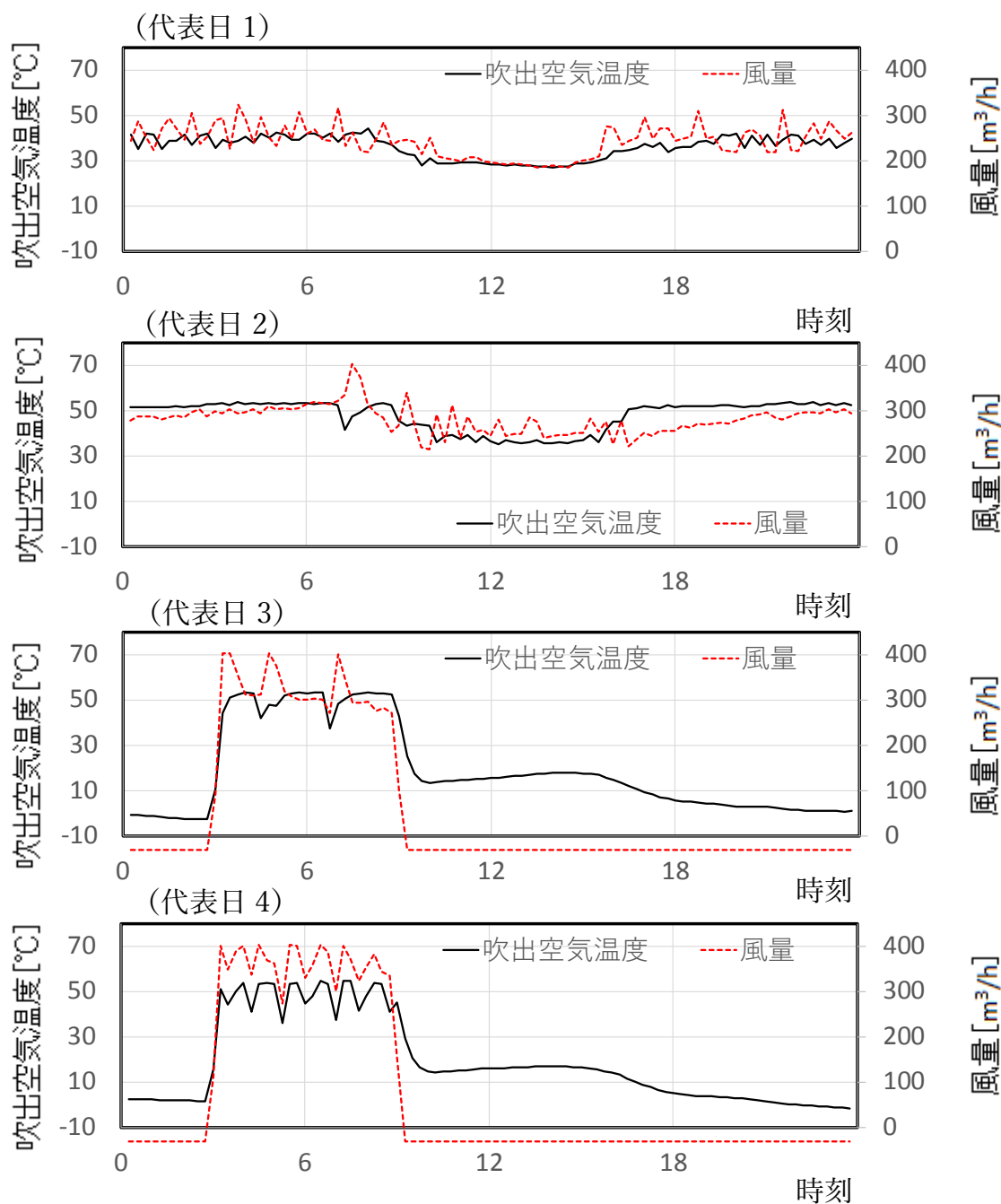


図 3. 30 吹出空気温度及び風量の日変動（空気熱室）（代表日 1, 2, 3, 4）

採熱管の環水温度及び流量の経時変化を図3. 31に示す。まず代表日1、2の場合、流量は負荷に追従して、日中に低く、夜間に高く現れている。環水温度はほぼ一定である。間欠運転では、代表日3、4ともに流量が時間とともに増加、環水温度は時間とともに減少する傾向が見られる。非空調時間では流量の計測値はゼロになり、環水温度は外界気象の影響を受けながらりゆき状態で推移している。

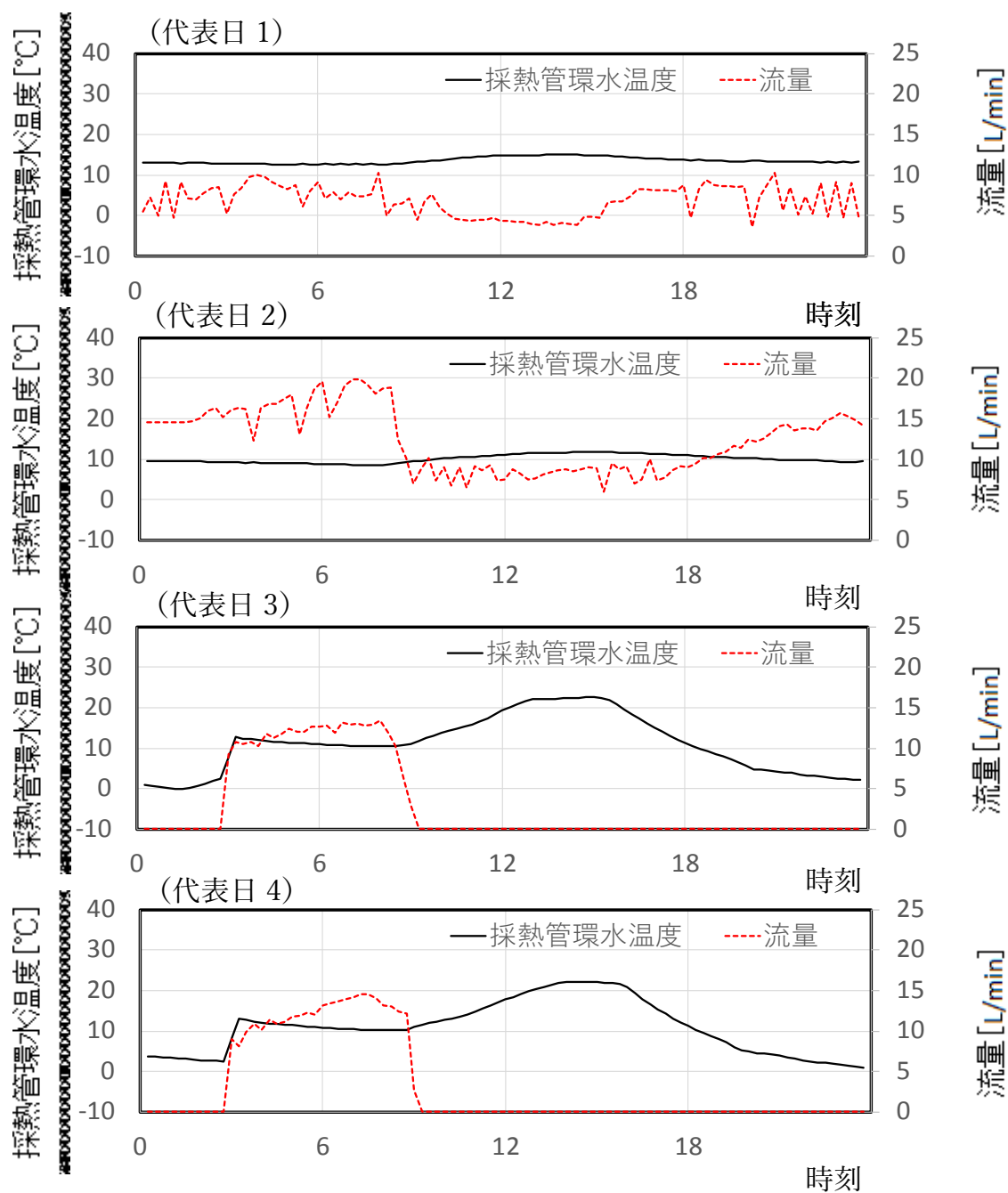


図3. 31 吹出空気温度及び風量の日変動（地中熱室）（代表日 1, 2, 3, 4）

次に、地盤側の計測結果を述べる。したがって、以降は地中熱室の場合となる。各日の採熱量及び地中温度分布について、それぞれ図3.32～図3.35に示す。(a)の日変動を見ると、採熱に伴い地中温度が低下し、採熱量の低下又は運転停止後は地中温度が回復していることが分かる。(b)地中温度分布では、地盤において、採熱量の多寡に対して深さ1mから深さ50mまでの地中温度の全体的な上昇、下降が見られる。ただし、深さ3mでは温度変化があまり見られず、その他の要因(地下水など)の影響が考えられる。

室内機のボディサーモと吸込空気温度について、各日の平均をとり、システムごとに図3.36に示す。全体的な傾向として吸込空気温度よりボディサーモの値が高く、吸込空気とボディサーモの間に0.3～1.5℃の温度差が生じている。地中熱室より空気熱室で温度差がついており、地中熱室の4日間の平均温度差0.4℃に対して、空気熱室1.1℃となる。このようなボディーサーモの検知温度の差が、各室の室温制御に影響を及ぼした可能性が考えられる。

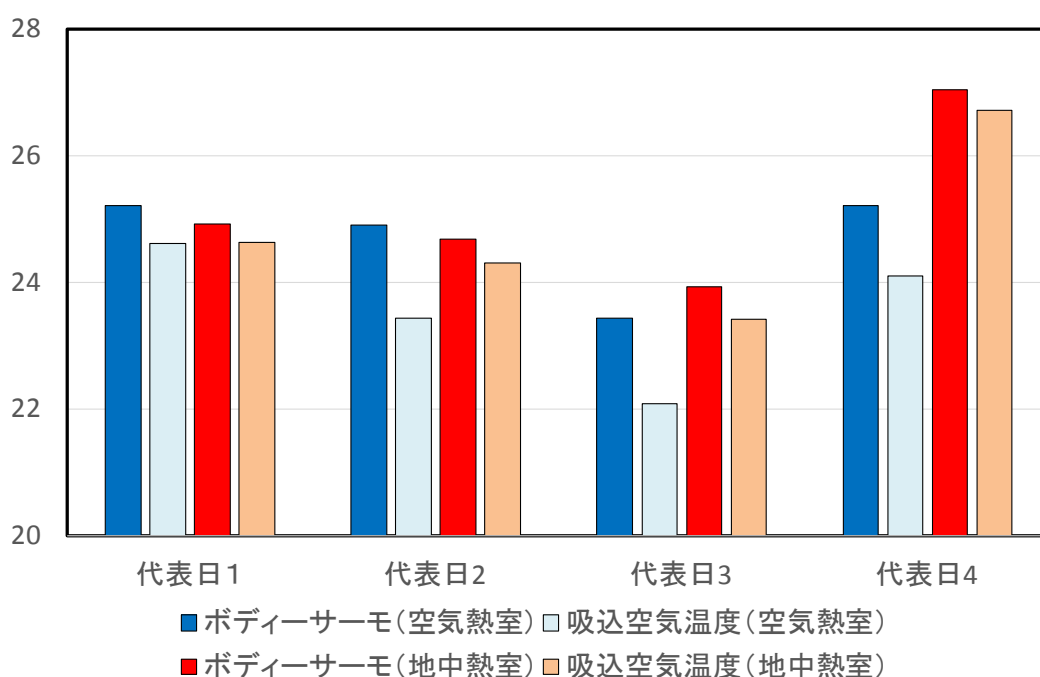
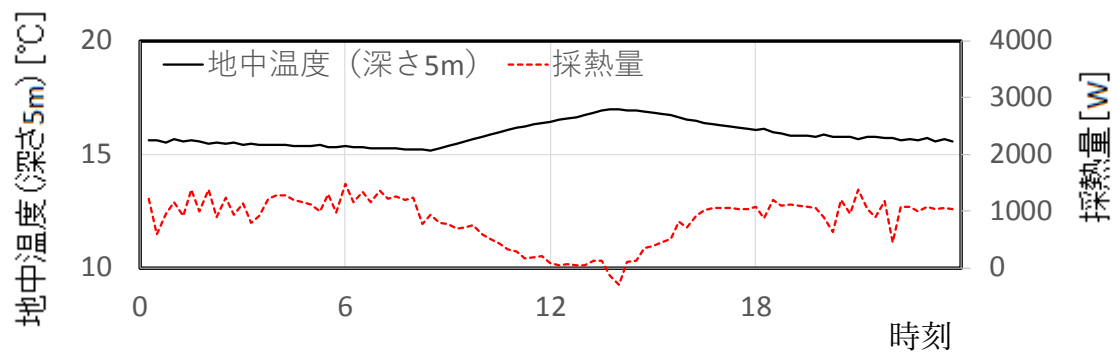
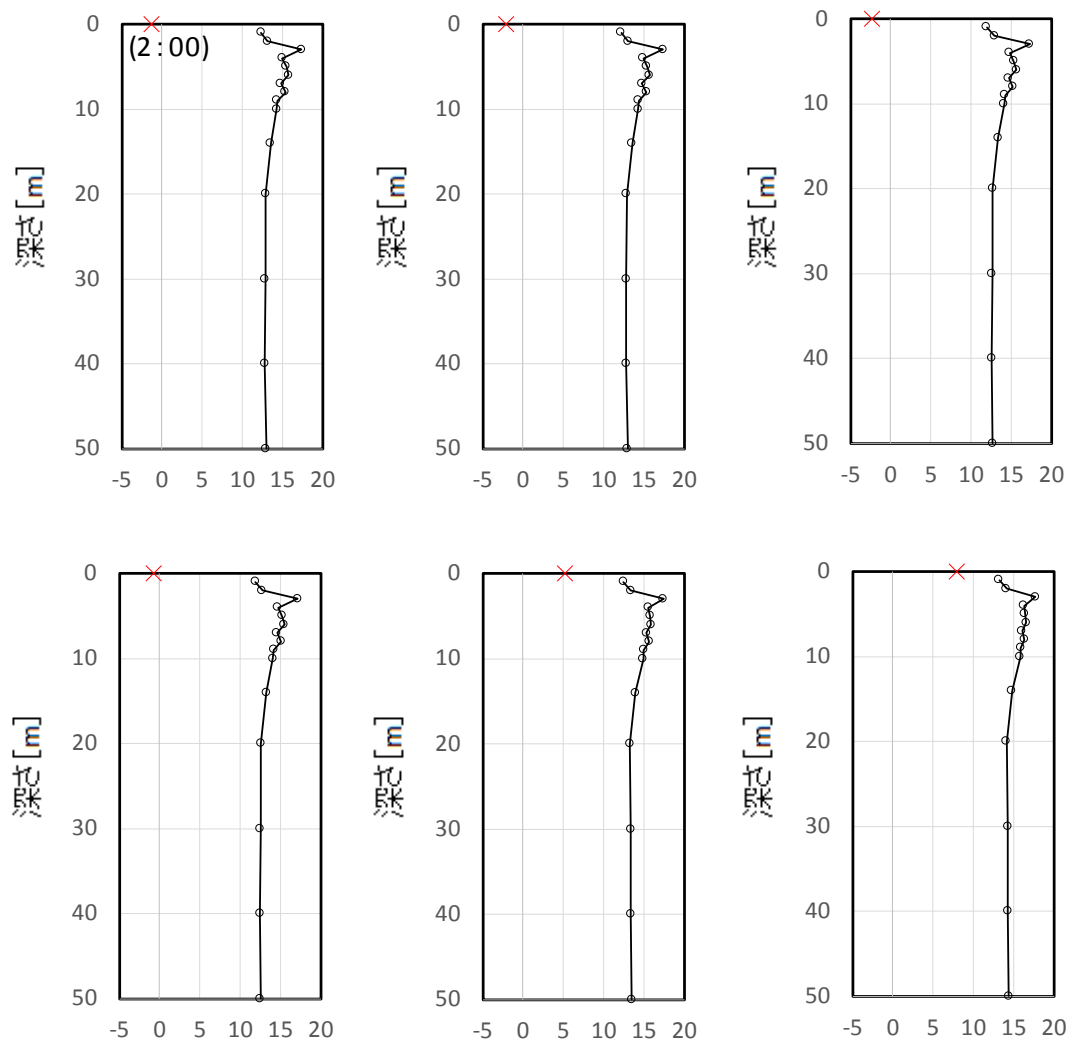


図3.36 室内機のボディサーモ及び吸込空気温度の日平均値(代表日1,2,3,4)



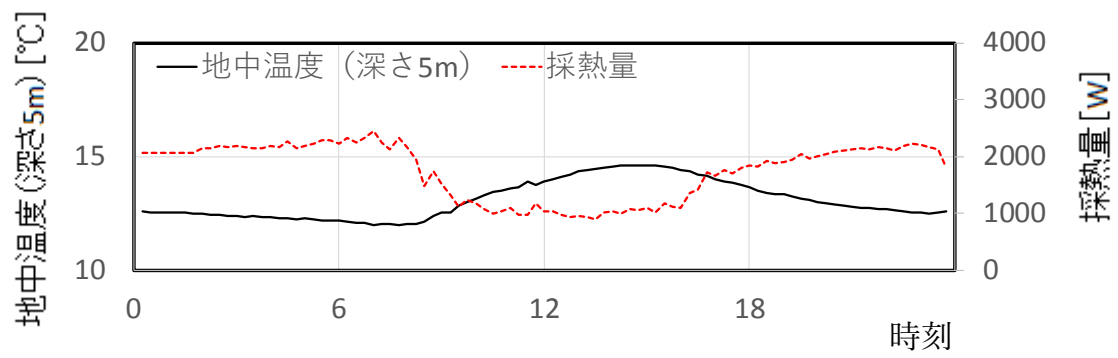
(a) 地中温度（深さ 5m）及び採熱量の日変動



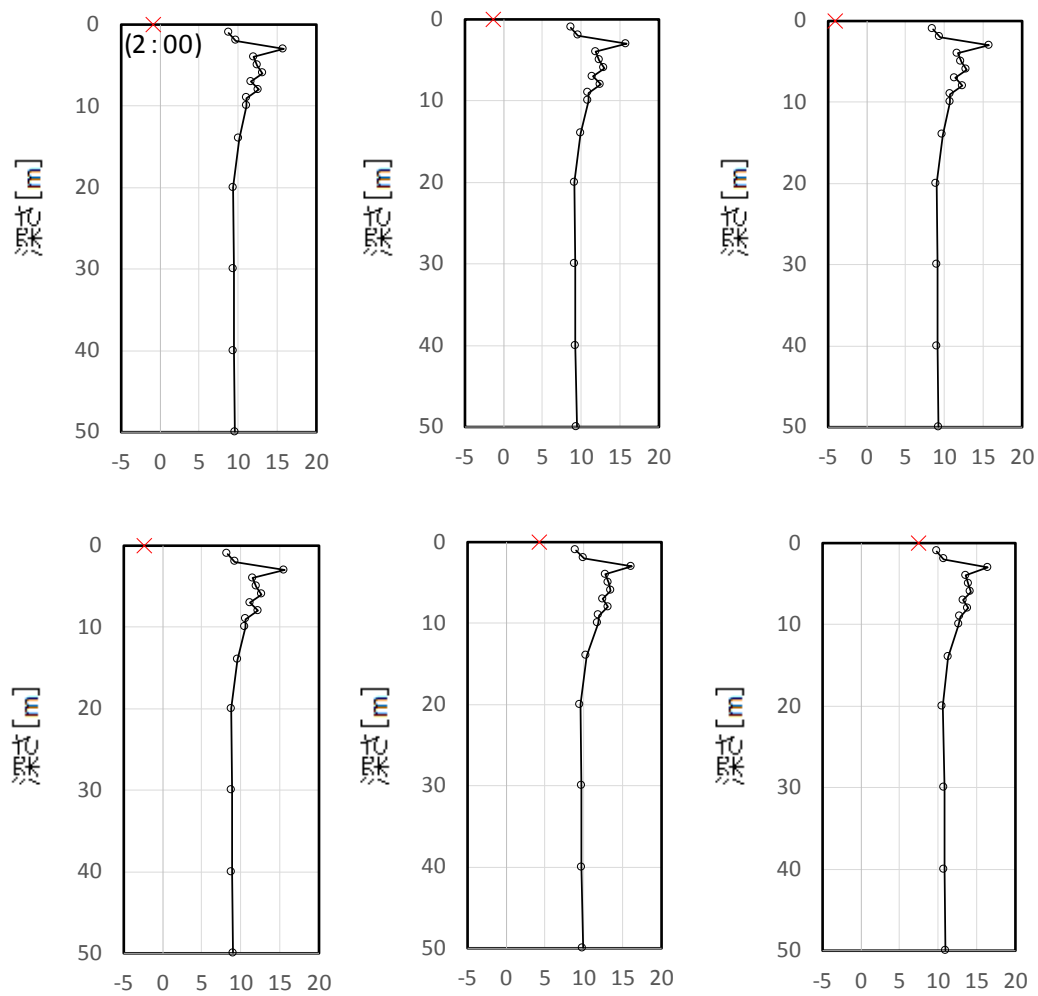
(b) 地中温度分布

図 3. 3 2 採熱量及び地中温度分布（地中熱室）

（代表日 1：2013 年 12 月 25 日）



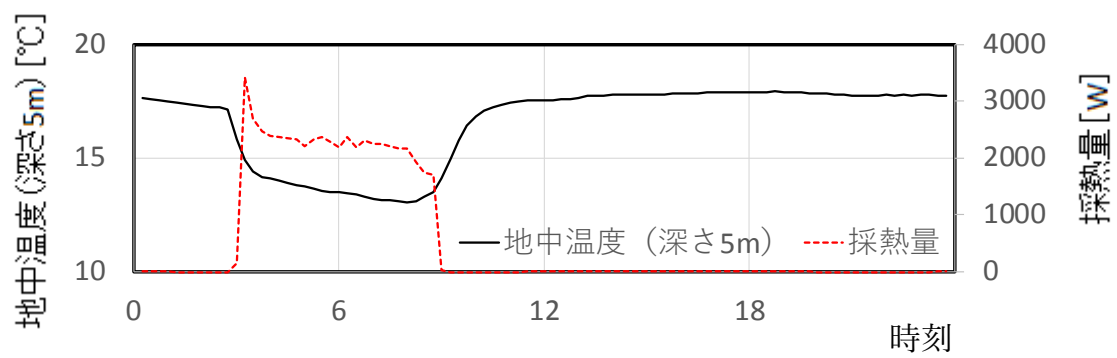
(a) 地中温度（深さ 5m）及び採熱量の日変動



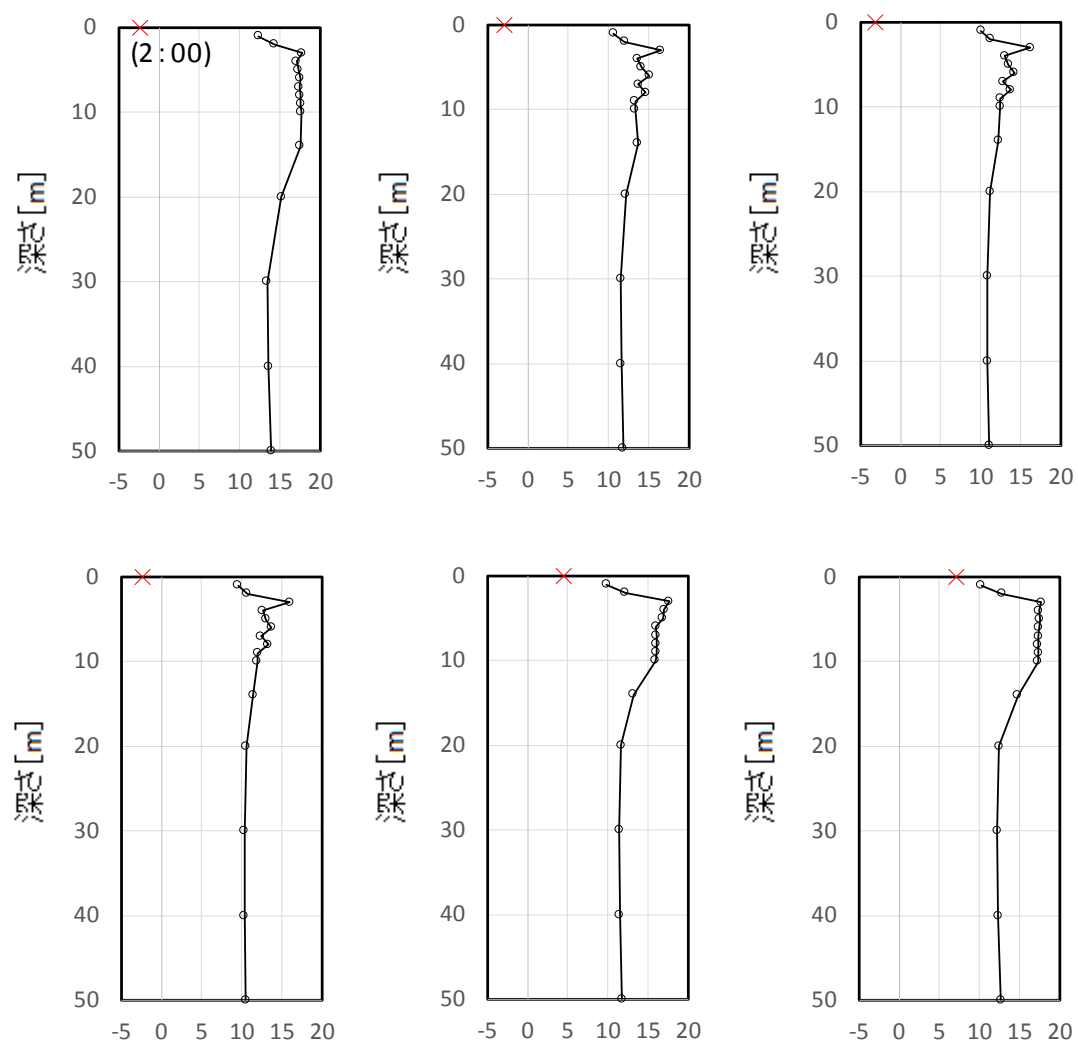
(b) 地中温度分布

図 3. 3 3 採熱量及び地中温度分布（地中熱室）

（代表日 2：2014 年 1 月 6 日）



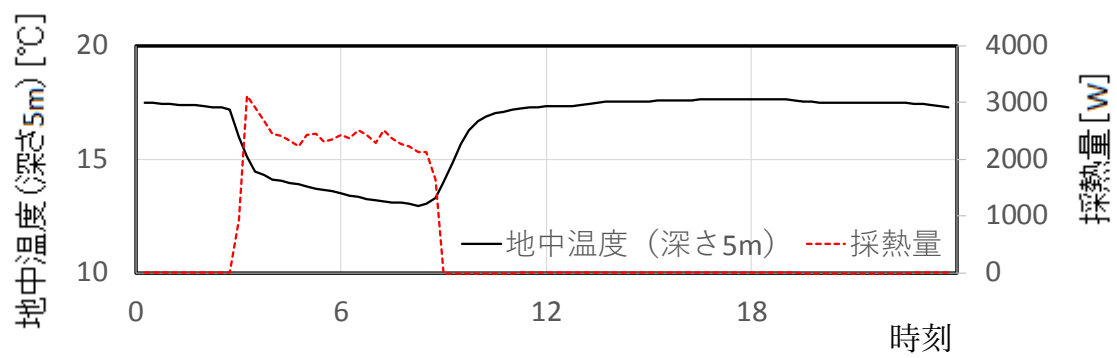
(a) 地中温度（深さ 5m）及び採熱量の日変動



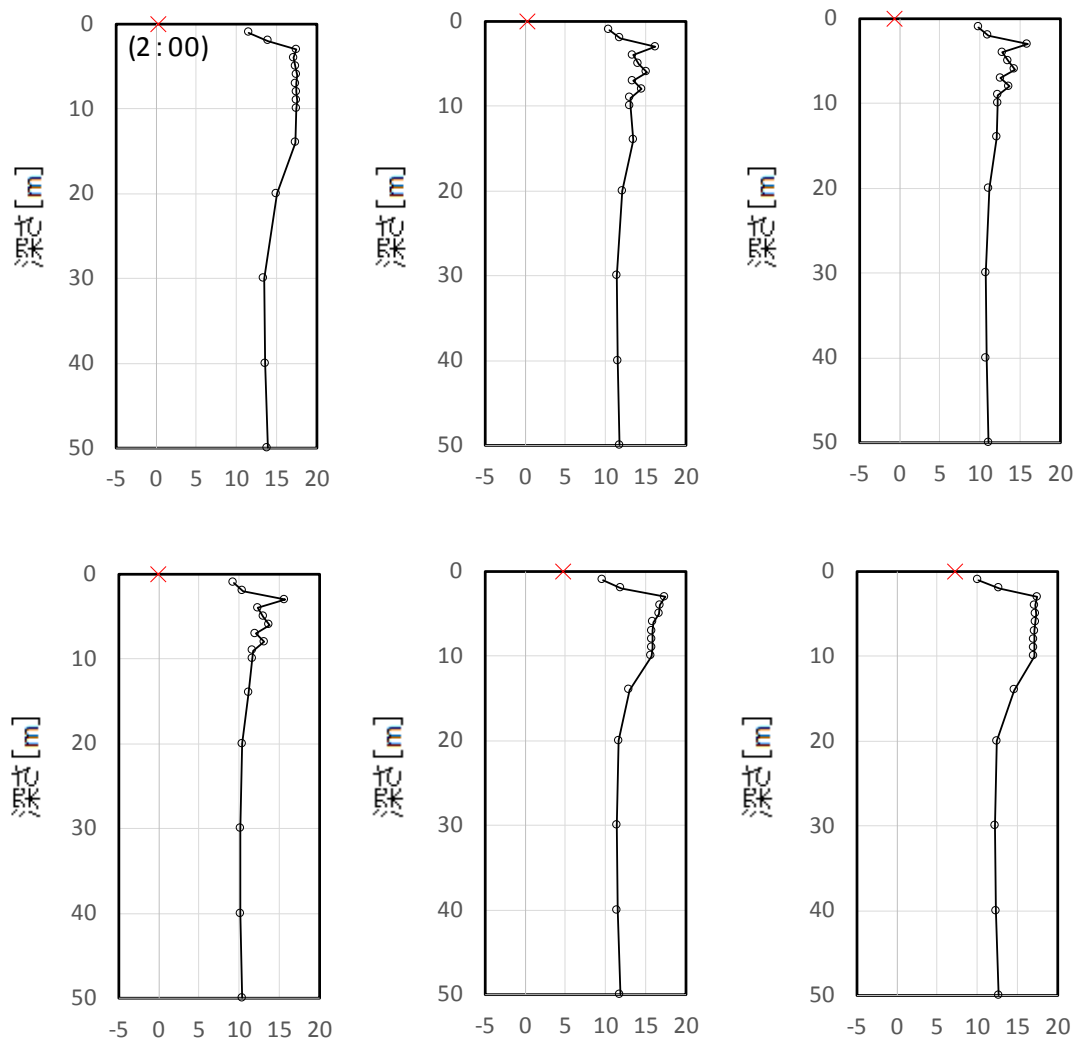
(b) 地中温度分布

図 3. 3 4 採熱量及び地中温度分布（地中熱室）

（代表日 3：2014 年 1 月 6 日）



(a) 地中温度(深さ 5m) 及び採熱量の日変動



(b) 地中温度分布

図 3. 3 5 採熱量及び地中温度分布(地中熱室)

(代表日 4 : 2014 年 1 月 12 日)

(8) 1次、2次の熱量比較

地中熱採熱管の循環ポンプは熱負荷と連動しており、流量が変化する。メーカーより流量と循環ポンプの電力消費量のデータを取り寄せ、図化したのが図3.37である。

1次側の熱量として室内空調負荷量、2次側の熱量として、採熱量+システムの電力消費量－循環ポンプの電力消費量の関係を表したのが図3.38である。両者は良く合致しており、計測精度の妥当性を確認することができた。

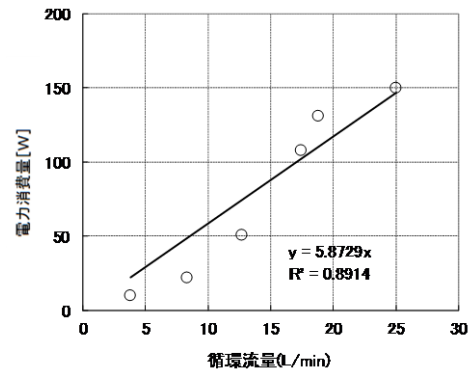


図3.37 循環ポンプの電力消費量

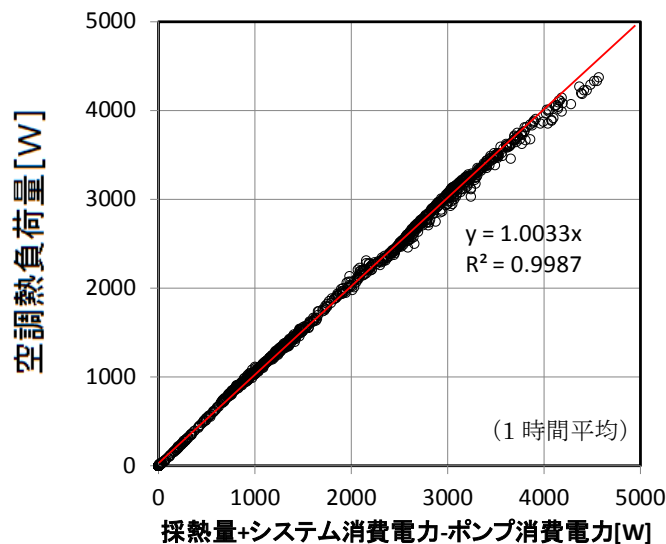


図3.38 1次、2次の熱量比較 (2013年11月27日～2014年1月31日)

3.4 まとめ

地中埋設管 50m を設置し、地中熱ヒートポンプと空気熱ヒートポンプによる建築物の空調を行う実証実験から以下の結果を得た。

- 1) 冬季の暖房に要する電力消費量は地中熱室の方が空気熱室より低く、電力消費削減率で見ると 3.6～21.9%であった。
- 2) 地中熱システムの場合、熱源温度が有利となり、システム COP が、空気熱源に比べて 0.3～0.8 向上した。
- 3) 室内空調負荷は地中熱室の方が空気熱室よりわずかに高く、外気温度の低下に伴うデフロスト運転の影響やボディーサーモの個体感度の相違などが原因として考えられる。
- 4) 地中からの採熱量と室内空調負荷の熱量バランスを調べ、十分な精度で合致することを確認した。

第4章 再生可能エネルギーの評価技術

4.1 再生可能エネルギーの評価技術の概要

本章では、太陽光、地中熱などの再生可能エネルギーを建築物に導入した場合の1次エネルギー消費量の評価技術について説明する。図4.1に本研究で開発した建築物における再生可能エネルギーの評価技術の概要を示す。地域、気象データ、建築物の仕様、室使用条件から、建築物の空調、照明、給湯、換気、昇降機のエネルギー消費量を算定する一連の流れ（既往）において、新たに、太陽光発電設備、地中熱利用設備を追加する。地中熱利用に関しては地盤の熱応答モデルを開発し、地中熱利用に伴う地盤の温度変化、地中熱の蓄採熱量や地中熱ヒートポンプの効率を予測し、空調のエネルギー消費量を算出する。太陽光発電に関しては、気象条件、太陽光パネルの条件からJISに基づいて発電量及び自己消費量を算定することにより、全体の（1次）エネルギー消費量から差し引く。建築物の仕様や地域気象は様々であり、これらに対応して再生可能エネルギーの評価を行うことにより、新技術の適切な導入方法を検討することができると考えられる。

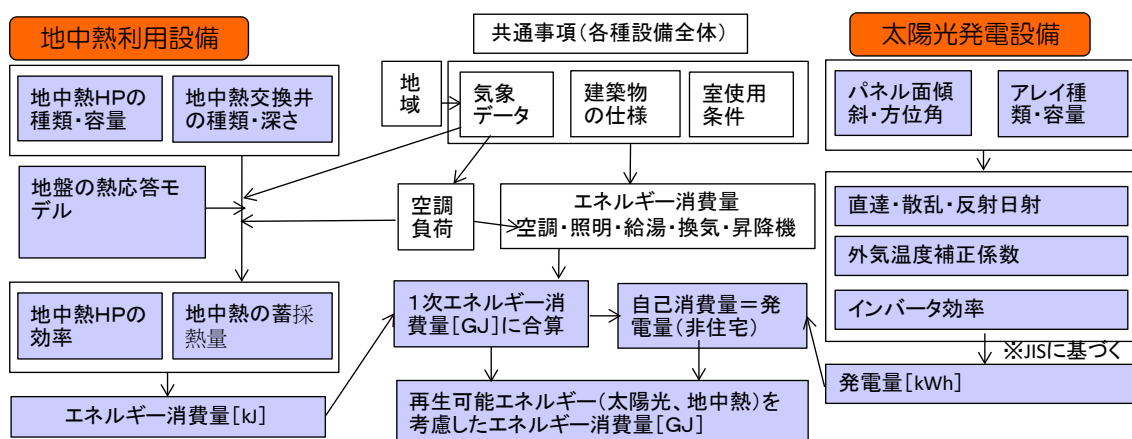


図4.1 建築物における再生可能エネルギーの評価技術の概要

4.2 地中熱利用設備

(1) 地盤の熱応答モデル

地中温度の形成においては、地盤内の熱伝導や地下水流動、地上気象など様々な要因が関係していると考えられる。自然状態の地温不易層の深さは約10mと言われているが、地中埋設管はこれより深く、50～100mの深度まで達する。モデルの概要を表したのが図4.2である。地盤は不飽和帯（地表から地下水面までの範囲）と飽和帯（地下水によって飽和している帯水層）に分類され、土壌水分の圧力（水頭）は、不飽和帯では負となり、飽和帯では正となる。地盤の基礎方程式を以下に示す⁴⁰⁾。

・不飽和帯

$$\text{熱の輸送方程式：} \rho_s C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(L \cdot D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) \quad (4.1)$$

$$\text{水分の輸送方程式：} \rho_w \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + g \frac{\partial K}{\partial z} \quad (4.2)$$

・飽和帯（帯水層）

$$\text{熱の輸送方程式：} \rho_s C_s \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (4.3)$$

$$\text{水分の輸送方程式：} n_e \frac{\partial h_L}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{g}{\rho_w} K_s h_L \frac{\partial h_L}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{g}{\rho_w} K_s h_L \frac{\partial h_L}{\partial y} \right) \quad (4.4)$$

ここで、 C_s ：土壌の比熱[J/(kg・K)]、 D_{θ} ：含水率勾配による水分拡散係数[kg/(m・s)]、 D_T ：温度勾配による水分拡散係数[kg/(m・s・K)]、 g ：重力加速度[m/s²]、 h_L ：地下水位[m]、 K ：透水係数[kgs/m³]、 L ：蒸発潜熱[J/kg]、 n_e ：空隙率[m³/m³]、 T ：土壌温度[℃]、 θ ：体積含水率[m³/m³]、 λ ：熱伝導率[W/(m・K)]、 ρ_s ：土壌の密度[kg/m³]、 ρ_w ：水の密度[kg/m³]である。

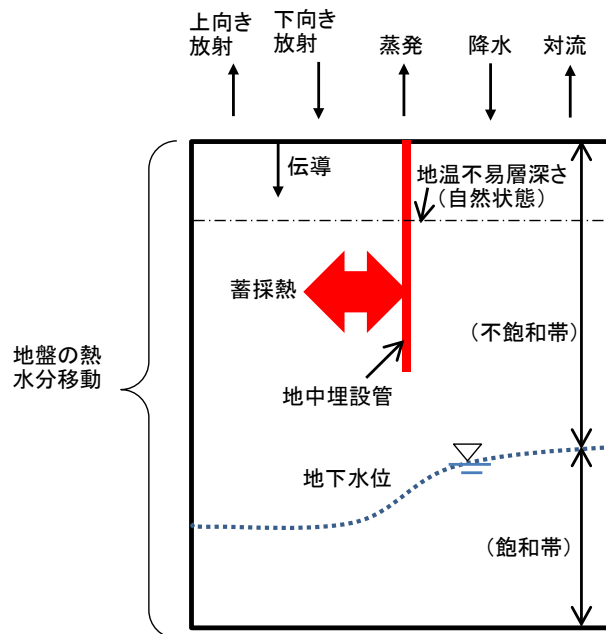


図4. 2 地中熱利用における地盤の熱応答モデル

Uチューブの熱交換量については、1次元非圧縮性流れ場を仮定し、次のように表す⁴¹⁾。

$$\bullet \text{ Uチューブの熱輸送方程式: } \rho_c C_c \left[\frac{\partial T_c}{\partial t} + u_{in} \frac{\partial T_c}{\partial x} \right] = \frac{2\pi n N \bar{h}_c}{A_c} (T - T_c) \quad (4.5)$$

ここで、 ρ_c : 循環液の密度[kg/m³]、 C_c : 循環液の比熱[J/(kg・K)]、 T_c : 循環液の温度[K]、 A_c : 管路断面積[m²]、 N : Uチューブ本数[本] (シングル : N=1、ダブル : N=2)、 n : 補正係数[-](n=0.12)である。 $\bar{h}_c$ は、Uチューブ 1m 当たりの有効熱伝達係数[W/(m・K)]であり、次式で表される。

$$\frac{1}{\bar{h}_c} = \frac{1}{r_{in} h_{in}} + \frac{\ln(r_{out}/r_{in})}{\lambda_c} \quad (4.6)$$

ここで、 r_{in} : 埋設管内側半径 (=内径×0.5) [m]、 r_{out} : 埋設管外側半径 (=外径×0.5) [m]、 R_b : 熱抵抗[m・K/W]、 λ_c : 循環液の熱伝導率[W/(m・K)]である。 h_{in} は、管内壁と循環液の熱伝達率[W/(m²・K)]であり、管内熱伝達の関係式から求める。

$$\bullet \text{ Petukov の式 } R_e > 10^4 \quad N_u = \frac{\frac{f}{2} R_e P_r}{1.07 + 12.7 \sqrt{\frac{f}{2}} (P_r^{2/3} - 1)} \quad (4.7)$$

$$\bullet \text{ Gnielinski の式 } R_e \leq 10^4 \quad N_u = \frac{\frac{f}{2} (R_e - 1,000) P_r}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{f}{2}} (P_r^{2/3} - 1)} \quad (4.8)$$

ここで、 f : 管摩擦係数[-] $\left(f = \frac{0.079}{R_e^{0.25}} (R_e < 10^5), f = (3.64 \log_{10} R_e - 3.28)^{-2} (R_e \geq 10^5) \right)$ 、

N_u : Nu 数[-] $\left(N_u = \frac{h_{in}(2r_{in})}{\lambda_c} \right)$ 、 P_r : Pr 数[-] $\left(P_r = \frac{C_c \eta}{\lambda_c}, \eta \text{は粘性係数} [\text{Pa} \cdot \text{s}] \right)$ 、 R_e : Re 数[-] $\left(R_e = \frac{u_{in}(2r_{in})}{\nu}, \nu \text{は動粘性係数} [\text{m}^2/\text{s}] \right)$

地表面の熱水分の収支式を以下に示す。

$$\bullet \text{ 熱収支 } S_n + L_n + H + \ell E + G = 0 \quad (4.9)$$

$$\bullet \text{ 水分収支 } R - E - D + W = 0 \quad (4.10)$$

ここで、 S_n : 短波放射収支量[W/m²]、 L_n : 長波放射収支量[W/m²]、 H : 対流顕熱 [W/m²]、 ℓ : 蒸発潜熱[J/kg]、 E : 蒸発 [kg/(m²s)]、 G : 熱伝導 [W/m²]、 R : 降水量[kg/(m²s)]、 D : 流出量[kg/(m²s)]、 W : 地中水分移動[kg/(m²s)]

(2) 計算方法

不飽和・飽和帯における熱、水分の輸送方程式(式(4.1)～式(4.4))は、有限差分法を適用し、時間積分は Euler 陽解法、拡散項は2次精度中心差分法で離散化した。係数行列は ICCG 法、または前処理付き BiCGstab 法を用いて計算を行った。

Uチューブの熱輸送方程式(式(4.5))は、有限差分法を適用し、時間積分は Euler 陰解法、拡散項は1次精度風上差分法で離散化した。

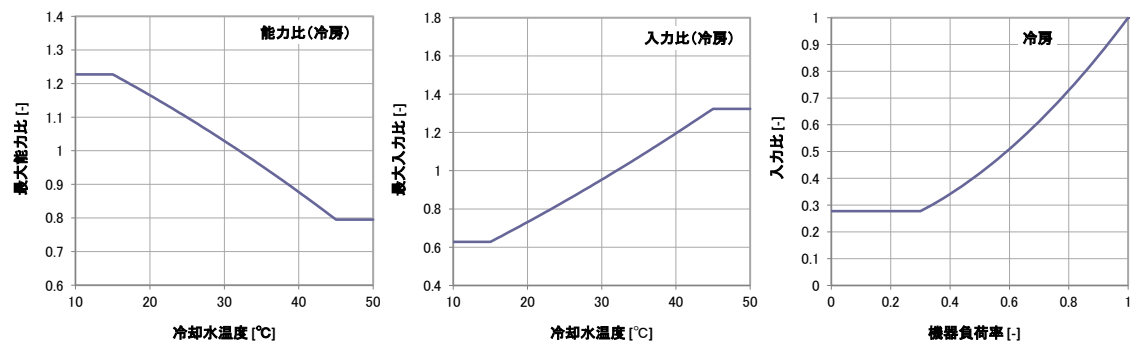
地表面における熱、水分の収支式(式(4.9)、式(4.10))は、非線形となるので、Newton 法により、表面温度を未知数とした繰り返し・収束計算を行った。

(3) 地中熱ヒートポンプ

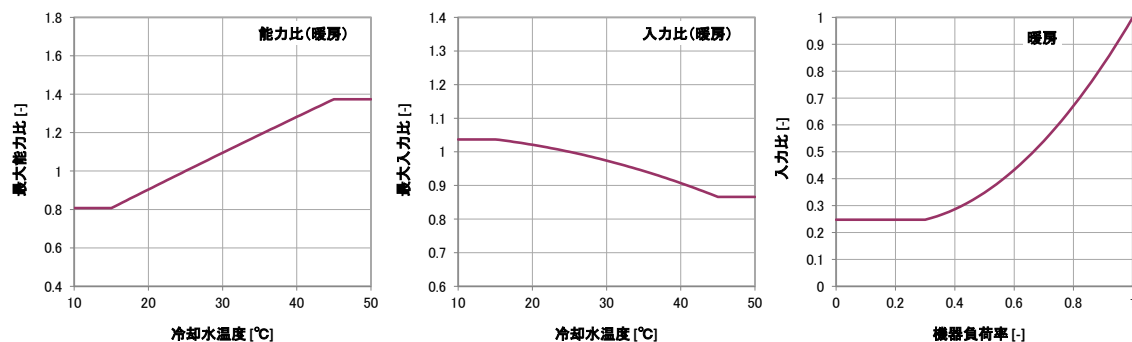
熱源機器は、事務所、商業施設等の建築物の用途について中央空調方式の地中熱ヒートポンプチラーを採用する。メーカーの仕様等を参考として、地中熱ヒートポンプチラーの仕様を以下のように設定した。

- ・冷房：COP4.86、熱源水 32-37℃、冷水 7-12℃
- ・暖房：COP6.92、熱源水 25-20℃、温水 45-40℃

地中熱ヒートポンプチラーの性能特性を図4. 3に示す⁴²⁾。



(a) 冷房



(b) 暖房

図4. 3 熱源機器の性能特性(地中熱ヒートポンプチラー・パッケージ)

4.3 太陽光発電設備

(1) 全体の流れ

太陽光発電設備については、JIS C8905（独立形太陽光発電システム通則）、JIS C8906（太陽光発電システム運転特性の測定方法）、JIS C8953（太陽電池アレイ出力のオンサイト測定方法）、JIS C8961（太陽光発電用パワーコンディショナの効率測定方法）、JIS C8971（太陽光発電用鉛蓄電池の残存容量測定方法）、JIS C8960（太陽光発電用語）、及び JIS C8972（太陽光発電用長時間率鉛蓄電池の試験方法）の 7 規格を参考として、年間のシステム発電電力量の推定方法を整理する。

推定方法の整理に当たっては、製造業者の仕様書又は技術資料などに記載された太陽電池モジュール 1 枚当たりの標準試験条件における出力(W)、及び太陽電池モジュール数量(枚)の積が、システム発電電力量になる訳ではないことに留意し、日射量の変動、太陽電池モジュール面の汚れ・劣化、温度上昇における変換効率の低下等によるエネルギー変換損失があるため、これらの損失分を考慮する必要がある。

システム発電電力量は、標準太陽電池アレイ出力に総合設計係数を乗じることとし、総合設計係数は、各種損失を係数化したものの積で評価する。

$$\text{総合設計係数} = \text{日射量年変動補正係数} \times \text{経時変化補正係数} \times \text{アレイ負荷総合補正係数} \times \text{アレイ回路補正係数} \times \text{インバータ回路補正係数} \times \text{温度補正係数} \quad (4.11)$$

標準状態の日射強度は 1kW/m^2 とする。したがって、太陽電池アレイの発電量を求めるには、システム発電電力量に、標準状態の日射強度に対する太陽電池アレイの設置面の日射強度を時間ごとに重みづけて算出する（式(4.12)）。

$$\text{太陽電池アレイの発電量} = \text{システム発電電力量} \times \frac{\text{太陽電池アレイの設置面の日射強度}}{\text{標準状態の日射強度}} \quad (4.12)$$

(2) 日射量年変動補正係数

日射量年変動補正係数は、長期における気象の変動に伴う日射量の不足を見込む係数のことである。日射量年変動補正係数は 0.97 とする。

(3) 経時変化補正係数

経時変化補正係数は、太陽電池モジュールガラス表面の汚れ又は劣化による出力電力量の低下、太陽光の分光分布の変動に伴う出力電力量の変化、モジュールガラス表面の反射又は透過による出力電力量の変化、充填材による吸収等を補正する係数のことである。経時変化補正係数は結晶系で 0.95 とする。

(4) アレイ負荷総合補正係数

アレイ負荷総合補正係数は、太陽電池アレイ出力の最適動作点からのずれによって生じる出力電力量の変化を補正する係数のことである。アレイ負荷総合補正係数は系統連系 0.94、独立直流 0.89、日射に追従した負荷のみで 0.91 とする。

(5) アレイ回路補正係数

アレイ回路補正係数は、太陽電池アレイの配線抵抗等によって生じる抵抗損失及び逆流防止デバイスによる損失を補正するための係数のことである。アレイ回路補正係数は 0.97 とする。

(6) インバータ回路補正係数

インバータ回路補正係数は、太陽電池アレイのインバータ回路において生じる変換効率や伝送損失等による出力電力量の変化を補正する係数のことである。インバータ回路補正係数は連系形ではインバータ製造業者から実効効率（JIS C8961 に基づく）が提示されている場合は、その値を用い、それ以外の場合は 0.9 とする。

(7) 温度補正係数

温度補正係数は太陽電池アレイの温度レベルに応じて出力電力量の変化を補正する係数のことである。温度補正係数は次式で表される。

$$\text{温度補正係数} = 1 + \alpha(\theta - 25) \quad (4.13)$$

ここで、 α ：太陽電池アレイの最大出力温度係数[1/K]、 θ ：太陽電池モジュール温度[°C]である。最大出力温度係数は製造業者等から入手できない場合は、結晶系 $-0.004 \sim -0.005$ (1/K) とする。太陽電池モジュール温度は次式で求める。

$$\text{太陽電池モジュール温度} = \theta_a + \Delta T \quad (4.14)$$

ここで、 θ_a ：外気温[°C]、 ΔT ：温度上昇（設置方式による値）[°C]である。 ΔT は裏面開放形（架台設置形）18.4、屋根置き形 21.5、屋根一体形 25.4、裏面密閉形（建材一体形）28.0 とする。

(8) 太陽電池アレイの設置面の日射強度

太陽電池アレイの設置面の日射強度 I は、傾斜角 β を有するパネル面について、パネル面日射量の直達成分 I_b 、パネル面日射量の散乱成分 I_s 、パネル面日射量の反射成分 I_r の和である。

$$I = I_b + I_s + I_r \quad (4.15)$$

斜面の法線ベクトルと太陽光の入射方向との角度を θ とすると、

$$I_b = I_{bn} \cos \theta / \cos \theta_z \quad (4.16)$$

ここで、 I_{bn} ：水平面直達日射量[W/m²]、 θ_z ：垂直ベクトルと太陽光の入射方向との角度[rad.]である。

曇天の場合は散乱成分が太陽光周辺で強度が強くなる。また、パネル面の傾斜により地面等の周辺からの反射成分が入ってくる。これらを考慮すると、

$$\bar{I}_s = \bar{I}_{sn} \left[\left(\frac{\bar{I}_n - \bar{I}_{sn}}{\bar{I}_0} \right) \cos \theta / \cos \theta_z + \left(1 - \frac{\bar{I}_n - \bar{I}_{sn}}{\bar{I}_0} \right) (1 + \cos \beta) / 2 \right] \quad (4.17)$$

$$I_r = I_n \rho (1 - \cos \beta) / 2 \quad (4.18)$$

ここで、 $\bar{I}_s$ ：散乱日射量の月平均時間積算値、 $\bar{I}_{sn}$ ：水平面散乱日射量の月平均時間積算値、 $\bar{I}_n$ ：水平面全天日射量の月平均時間積算値、 $\bar{I}_0$ ：大気外全天日射量の月平均時間積算値、 I_n ：水平面の全天日射量、 ρ ：反射条件パラメタ（通常 0.2、積雪時 0.7 程度）である。

表 4. 1 は太陽光発電量の計算事例である（容量 20kW の場合）。太陽高度が高い 5-7 月ではパネル面の傾斜がつかない方が発電するのに対して、太陽高度が低い 11-2 月ではパネル面の傾斜に伴う反射成分の捕捉分も相まってそれとは逆の傾向が表れている。年平均ではパネル面の傾斜角 30 度が最適となり、既往の知見と合致する。

現実の市街地において建築物の周辺からの反射日射を正確に知るには極めて複雑な計算式を適用する必要がある。安全側に配慮した実務設計では、反射影響を見込まない式(4.19)、式(4.20)が用いられる。

$$I_s = I_{sn} (1 + \cos \beta) / 2 \quad (4.19)$$

$$I_r = 0 \quad (4.20)$$

表 4. 1 太陽光発電の計算事例（容量：20kW、場所：茨城県土浦市） 単位：kWh/day

	傾斜角									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1月	39.4	45.7	50.4	53.6	55.3	56.1	56.1	55.5	54.2	51.7
2月	50.2	55.2	58.3	60.2	60.9	61.0	60.4	59.0	56.7	53.1
3月	57.5	59.9	61.1	61.3	60.9	59.8	58.1	55.4	51.6	46.2
4月	66.5	67.3	67.2	66.4	64.9	62.6	59.2	54.5	48.1	40.5
5月	62.5	62.1	61.1	59.3	56.9	53.6	49.4	43.9	37.3	29.7
6月	51.2	50.8	49.9	48.3	46.0	42.8	38.8	34.2	29.2	23.2
7月	61.8	61.3	60.0	58.0	55.1	51.1	46.2	40.6	33.9	26.8
8月	63.1	63.5	63.1	61.9	59.8	56.9	52.8	47.5	41.2	33.5
9月	49.3	50.5	50.8	50.3	49.1	47.3	44.9	41.7	37.6	32.4
10月	42.7	45.6	47.5	48.3	48.5	47.9	46.7	44.8	42.1	38.4
11月	38.0	42.8	46.2	48.3	49.4	49.8	49.4	48.4	46.6	43.7
12月	34.4	40.8	45.7	48.9	50.8	51.5	51.5	51.1	49.6	47.5
年間平均	51.4	53.8	55.1	55.4	54.8	53.3	51.1	48.0	43.9	38.8

4.4 再生可能エネルギーの技術導入によるエネルギー消費量の評価事例

(1) 評価対象

評価対象は事務所（延床面積：約 10,000 m²、RC 造、地上 7 階、地下 0 階）である。地域は温暖地、準寒冷地、蒸暑地の 3 つとする。図 4. 4 に平面図・断面図、表 4. 2 に断熱仕様、表 4. 3 に設備仕様を示す。再生可能エネルギーについては地中熱利用設備、太陽光発電設備を考え、各仕様を表 4. 4、表 4. 5 に示す。太陽光発電設備は屋上面積の 50% に設置としており、他の設備機器の存在を考慮すると屋上部分ではほぼ上限である。地中熱利用設備では、地中熱交換井 200 本程度を見込んでおり、地中熱交換井を 3m 間隔で正方設置すると 1,521m²の土地を必要とする（建築面積とほぼ同じ）。

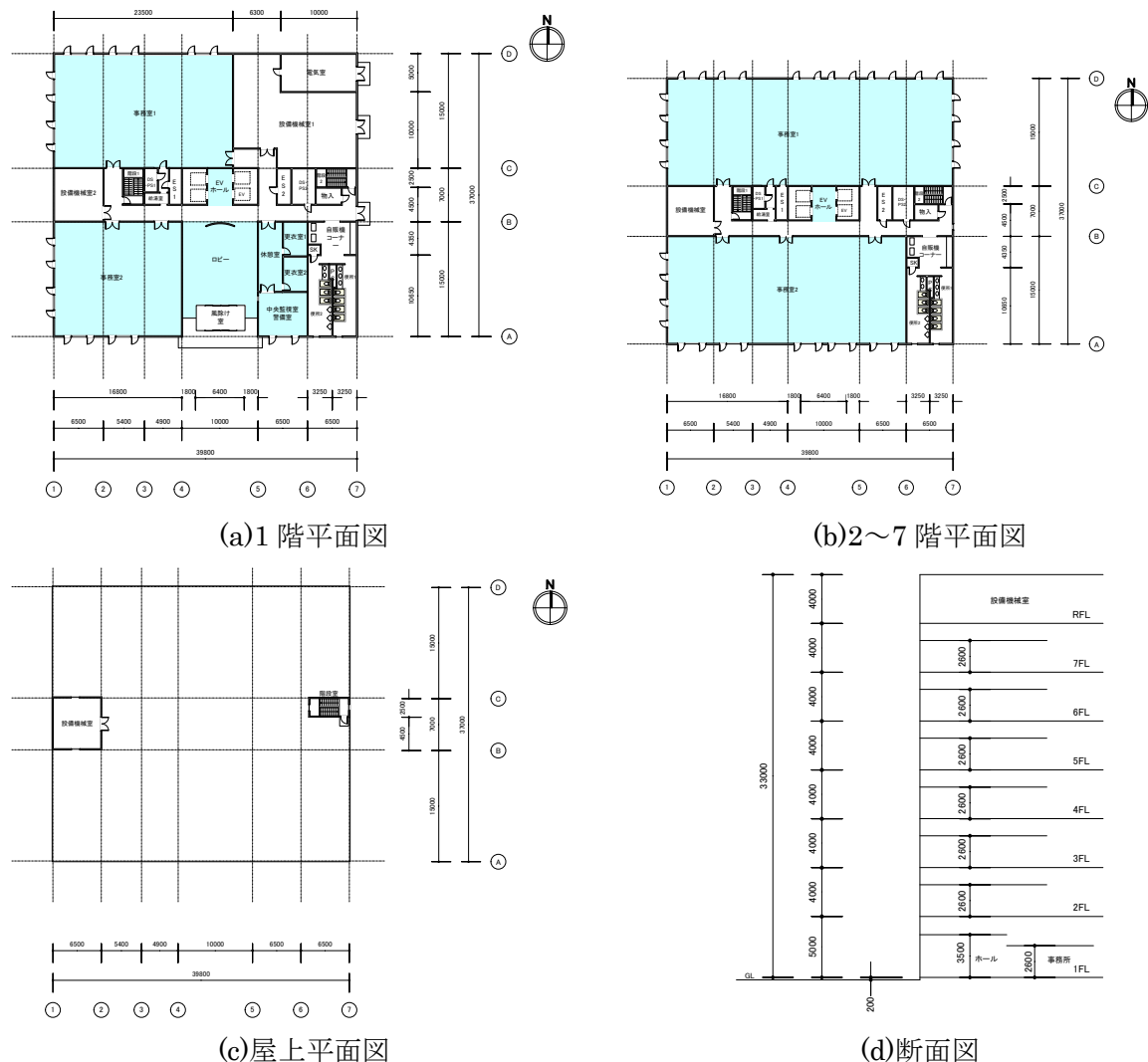


図 4. 4 平面図・断面図

表 4. 2 断熱仕様

地域	外壁仕様		窓仕様
	断熱材厚さ[mm]		
	外壁	屋根	
準寒冷地（3 地域）	25	50	複層（空気層 6mm）透明＋透明 8mm
温暖地（6 地域）	25	50	単層 透明 8mm
蒸暑地（8 地域）	-	25	単層 透明 8mm

表 4. 3 設備仕様（標準）

種別	地域	仕様
空調	（共通）	熱源機：空冷ヒートポンプチラー ×2 台 冷房 COP3.24、暖房 COP3.42 空調機：吹出温度差 11K 定風量方式 全熱交換器付 外気カットあり
	（温暖地）	冷房能力：450kW、暖房能力：450kW （1 台能力） 一次ポンプ：77m³/h×15m×5.5kW ×2 台 （温度差 5K） 二次ポンプ：38m³/h×22m×3.7kW ×2 台 （温度差 7K） 全空調機動力合計：86.6kW（14 台）
	（準寒冷地）	冷房能力：450kW、暖房能力：450kW （1 台能力） 一次ポンプ：77m³/h×15m×5.5kW ×2 台 （温度差 5K） 二次ポンプ：34m³/h×22m×3.7kW ×2 台 （温度差 7K） 全空調機動力合計：83.1kW（14 台）
	（蒸暑地）	冷房能力：450kW、暖房能力：450kW （1 台能力） 一次ポンプ：77m³/h×15m×5.5kW ×2 台 （温度差 5K） 二次ポンプ：39m³/h×22m×5.5kW ×2 台 （温度差 7K） 全空調機動力合計：86.6kW（14 台）
換気	（温暖地）	・個別換気方式 ・各室換気量、換気種別、ダクト全静圧は基準設定仕様に準拠
	（準寒冷地）	
	（蒸暑地）	
照明	（温暖地）	・Hf 照明器具相当 ・各室照度は基準設定仕様に準拠 ・照明制御なし
	（準寒冷地）	
	（蒸暑地）	
給湯	（温暖地）	・熱源機：都市ガス温水器 効率 0.85 ・加熱能力：212kW 効率 0.85 口径 40mm
	（準寒冷地）	
	（蒸暑地）	
昇降機	（温暖地）	・VVVF 制御方式、回生電力なし
	（準寒冷地）	
	（蒸暑地）	

表 4. 4 地中熱利用設備仕様

地域	仕様
(共通)	熱源機：空冷ヒートポンプチラー（空冷 HP） ×1 台 冷房 COP3.24、暖房 COP3.42 地中熱ヒートポンプチラー（地中熱 HP） ×1 台 冷房 COP4.86、暖房 COP6.92 ・ 二次ポンプは標準（省エネ基準仕様）と同様 ・ 地盤の熱伝導率：2.0W/(m・K)、固定 ・ 地中熱交換井：ダブル U チューブ（100m） ・ 地中熱交換井の使用ブライン：ナイブライン Z-1（33wt%）
(温暖地)	空冷 HP 冷房能力：990kW、暖房能力：990kW 一次ポンプ：170m³/h×15m×11kW ×2 台（温度差 5K） 地中熱 HP 冷房能力：990kW、暖房能力：990kW 一次ポンプ：170m³/h×15m×11kW ×2 台（温度差 5K） 地中熱ポンプ：224m³/h×27m×26kW ×1 台（温度差 5K） 地中熱交換井：198 本
(準寒冷地)	空冷 HP 冷房能力：990kW、暖房能力：990kW 一次ポンプ：170m³/h×15m×11kW ×2 台（温度差 5K） 地中熱 HP 冷房能力：900kW、暖房能力：900kW 一次ポンプ：155m³/h×15m×11kW ×1 台（温度差 5K） 地中熱ポンプ：203m³/h×27m×22kW ×1 台（温度差 5K） 地中熱交換井：180 本
(蒸暑地)	空冷 HP 冷房能力：1,080kW、暖房能力：1,080kW 一次ポンプ：186m³/h×15m×11kW×1 台（温度差 5K） 地中熱 HP 冷房能力：1080kW、暖房能力：1080kW 一次ポンプ：186m³/h×15m×11kW ×1 台（温度差 5K） 地中熱ポンプ：244m³/h×27m×26kW ×1 台（温度差 5K） 地中熱交換井：215 本

表 4. 5 太陽光発電設備仕様

地域	仕様
(共通)	・ 太陽光アレイは建築物の屋上面積の 50%に設置 ・ 発電能力 40kW ・ 太陽光アレイの発電能力：185W/m² ※現行メーカー値相当 ・ 種類：結晶シリコン系 ・ 発電した電気は全て自己消費 ・ パワーコンディショナの定格負荷効率：89.5%
(温暖地)	・ 年間日射量地域区分：A4 地域 480 四日市 ・ 太陽光アレイの設置：温暖地（6 地区）南面向き、傾斜角 30°
(準寒冷地)	・ 年間日射量地域区分：A2 地域 230 大迫 ・ 太陽光アレイの設置：準寒冷地（3 地区）南面向き、傾斜角 30°
(蒸暑地)	・ 年間日射量地域区分：A4 地域 836 多良間 ・ 太陽光アレイの設置：蒸暑地（8 地区）南面向き、傾斜角 10°

（２）地中熱利用設備の計算結果

地中熱利用設備の導入により熱源システムのエネルギー消費が変化することから、ここでは設備システムのうち熱源システムの計算結果について述べる。図４．５は、熱源システムについて月別１次エネルギー消費量を標準ケースと対比したものである。地中熱利用の熱源システムの月別１次エネルギー消費量は、標準ケース（空冷ヒートポンプチャラー）のそれと比較して１年を通して低くなっている。月削減率では１１～４４％の効果があり、年平均削減率は２９％である。

暖房期、冷房期における温度、空調設備の電力消費及びCOPの１０日間データを抽出し、経時的にそれぞれ図４．６、図４．７に示す。標準システム、地中熱システムともに空調スケジュールに即して、熱源システムが稼働しており、採熱管内の循環水と外気の温度レベルの相違を反映した電力消費量と熱源COPの挙動が得られている。

表４．６は、各地域の熱源システムに関する年間の１次エネルギー消費量及び標準ケースとの比較による１次エネルギー消費量の削減率を一覧したものである。標準ケースにおける熱源システムの１次エネルギー消費量は、蒸暑地が最も高く３,８６０GJ、次いで温暖地３,１７５GJ、準寒冷地２,８２１GJとなった。地中熱利用設備の導入による１次エネルギー消費削減率は、準寒冷地が最も高く３３％、次いで温暖地２９％、蒸暑地１０％となった。

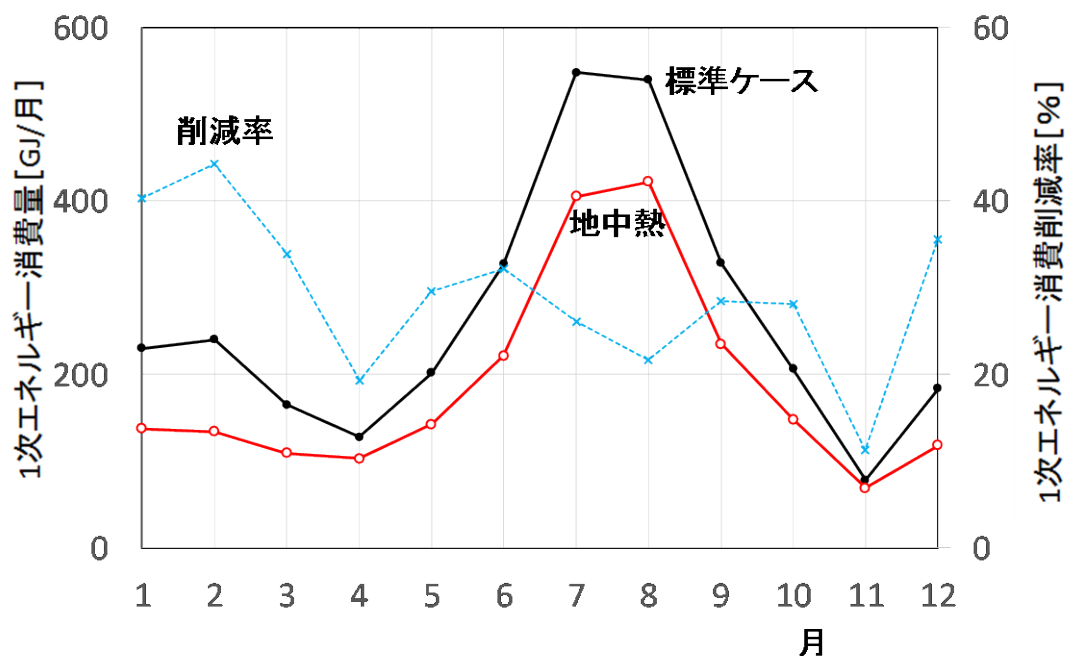
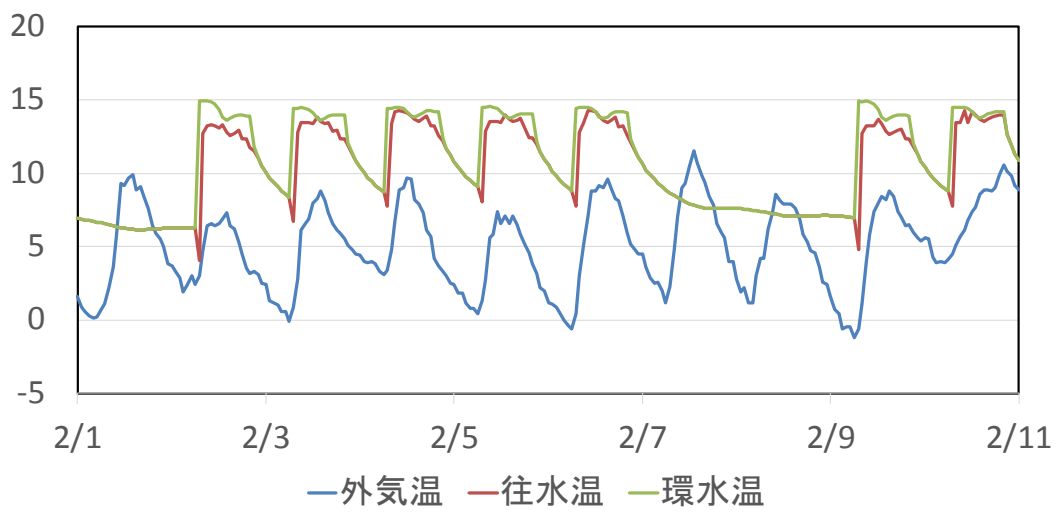
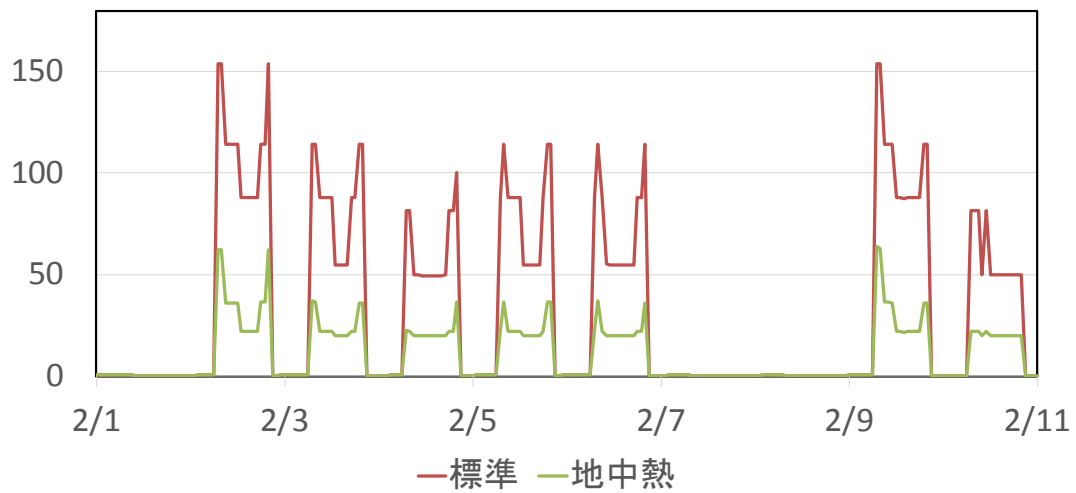


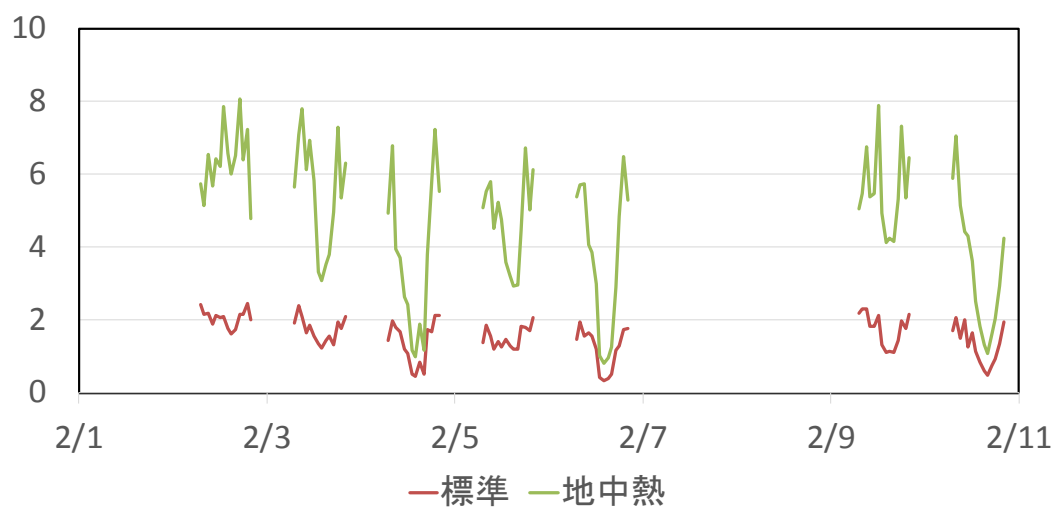
図４．５ 熱源システムの月別１次エネルギー消費量（標準及び地中熱システム）及び地中熱利用による１次エネルギー消費削減率（標準システムを基準とする）



(a) 外気温度及び循環水温

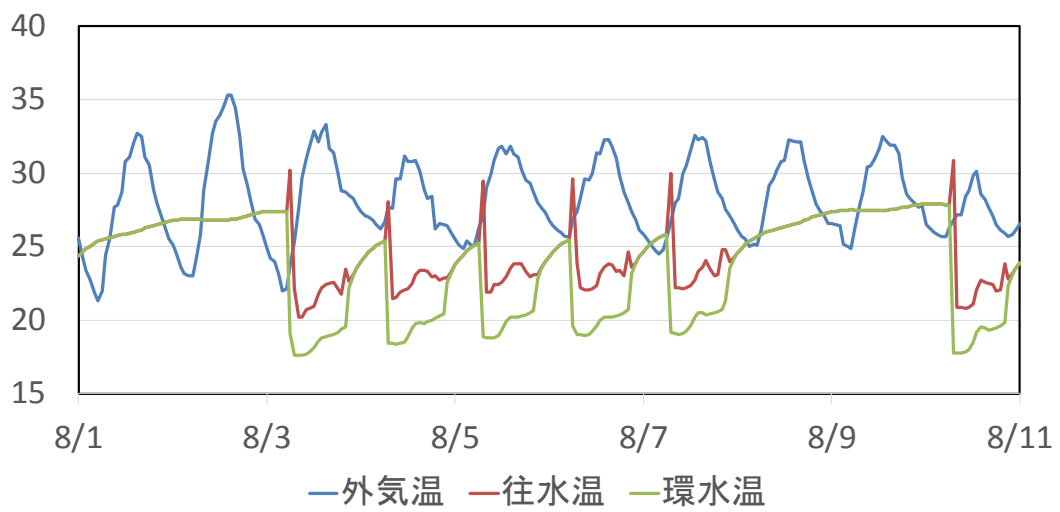


(b) 熱源システムの電力消費量

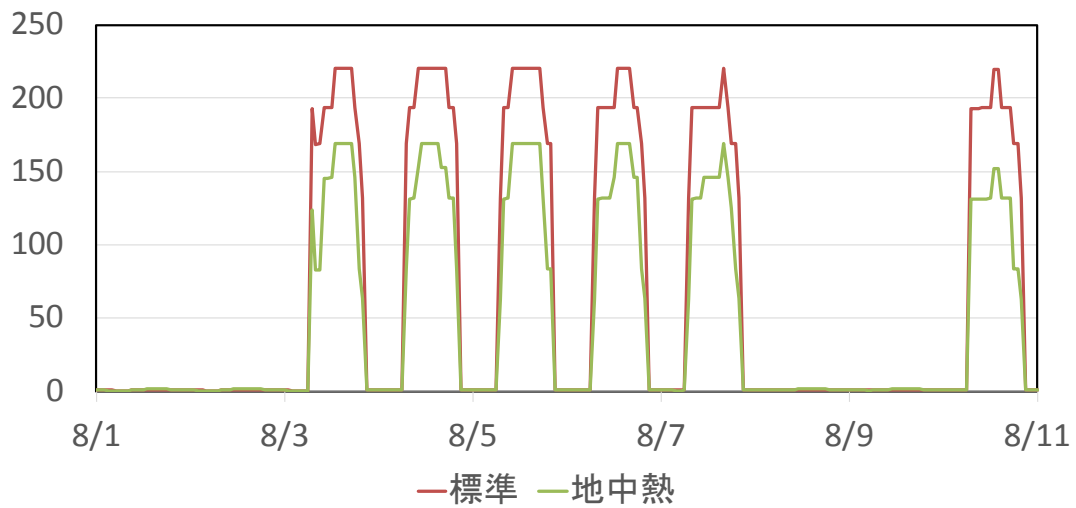


(c) 熱源機器の COP

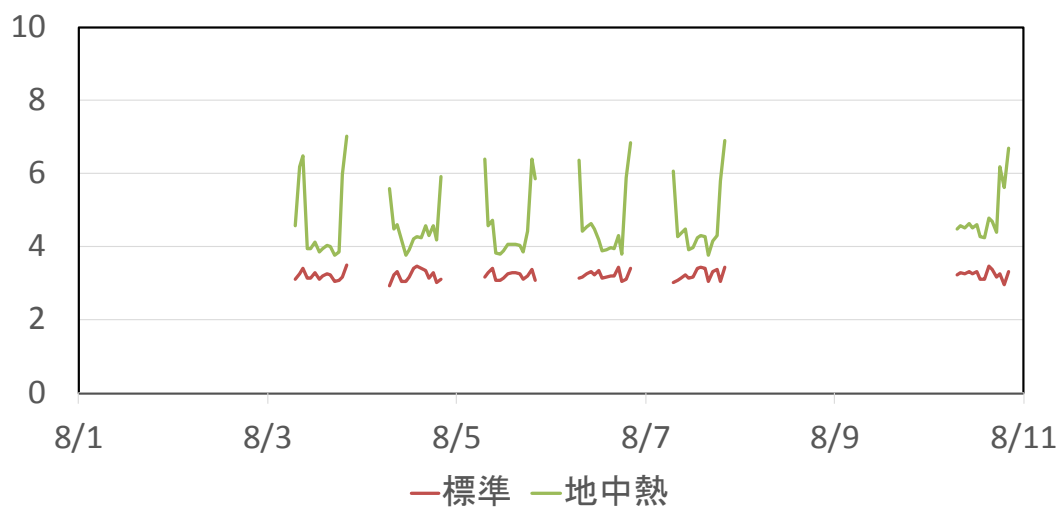
図 4. 6 標準システム及び地中熱利用設備の熱源システムの日挙動 (2/1～2/10)



(a) 外気温度及び循環水温



(b) 熱源システムの電力消費量



(c) 熱源機器の COP

図 4. 7 標準システム及び地中熱利用設備の熱源システムの日挙動 (8/1～8/10)

表 4. 6 熱源システムの 1 次エネルギー消費量及び地中熱による 1 次エネルギー消費削減率（標準ケースを基準とする）

地域	年間1次エネルギー消費量 [GJ]		年間1次エネルギー消費 削減率[%]
	標準ケース	地中熱利用 ケース	
準寒冷地	2,821	1,886	33.13
温暖地	3,175	2,245	29.30
蒸暑地	3,860	3,459	10.37

（3）太陽光発電設備の計算結果

太陽光発電設備の導入による電力消費量の軽減について述べる。太陽光発電設備の月別発電量及び発電量の差し引きによる設備システム全体の月別 1 次エネルギー消費削減率を図 4. 8 に示す。太陽光発電による 1 次エネルギー消費量は、標準ケースのそれと比較して月削減率では 3～5%の効果があり、年平均削減率は 3%である。今回のケースは 7 層の建築物を対象にしており、建築物全体では屋上面敷設の太陽光の効果は限定的となる。

暖房期、冷房期における外気温、日射量、各設備の電力消費及び太陽光発電量の 10 日間データを抽出し、経時的にそれぞれに図 4. 9、図 4. 10 に示す。熱源、換気、照明、昇降機等の設備がスケジュールに即して稼働し、天候状況を反映して発電量の日挙動が見られる。

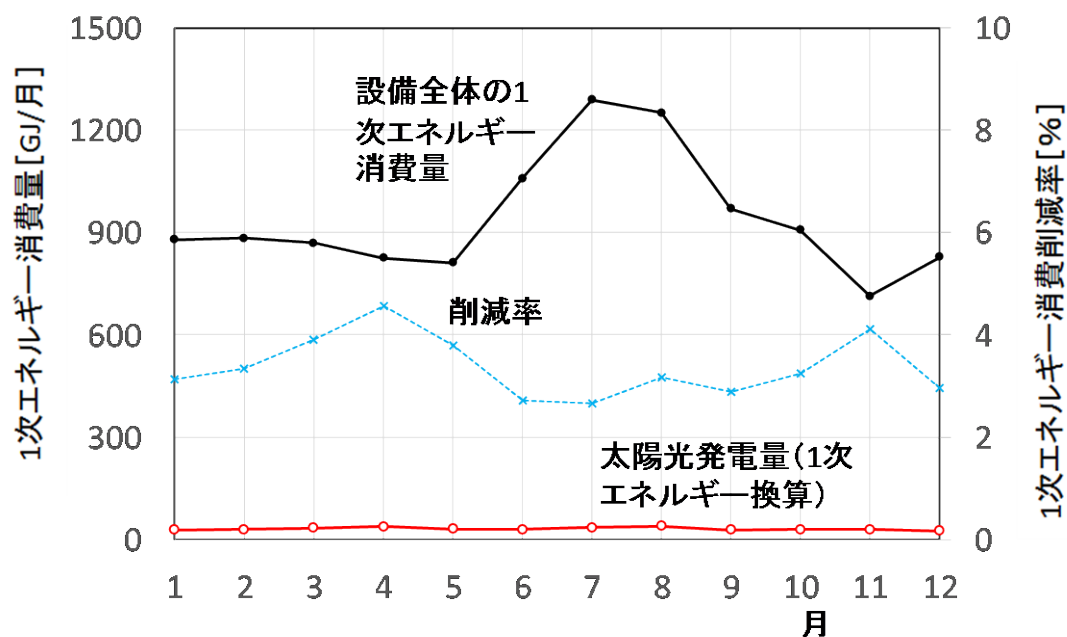
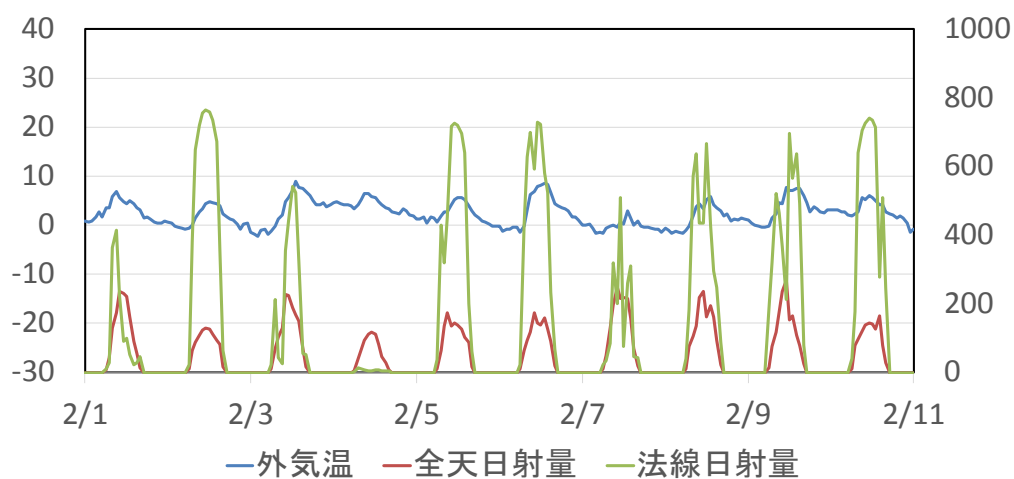
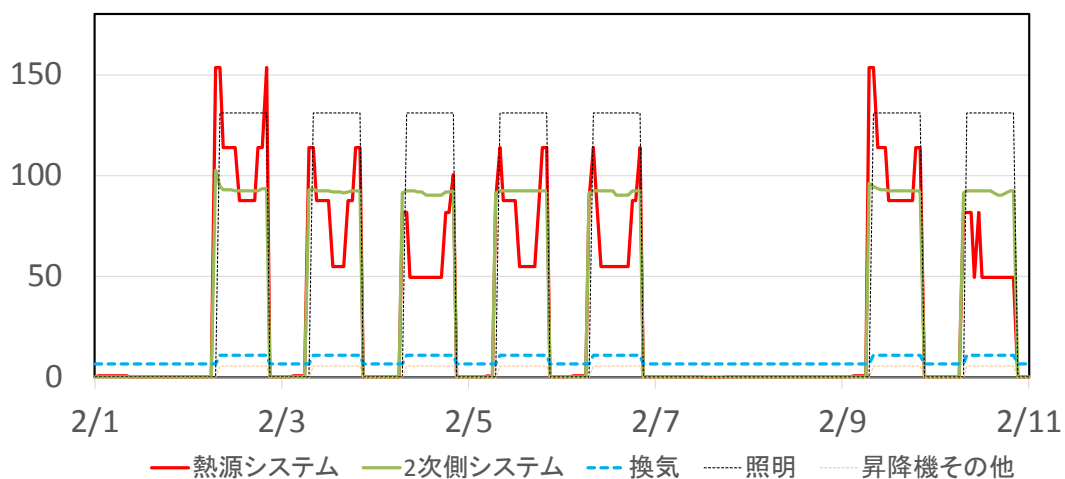


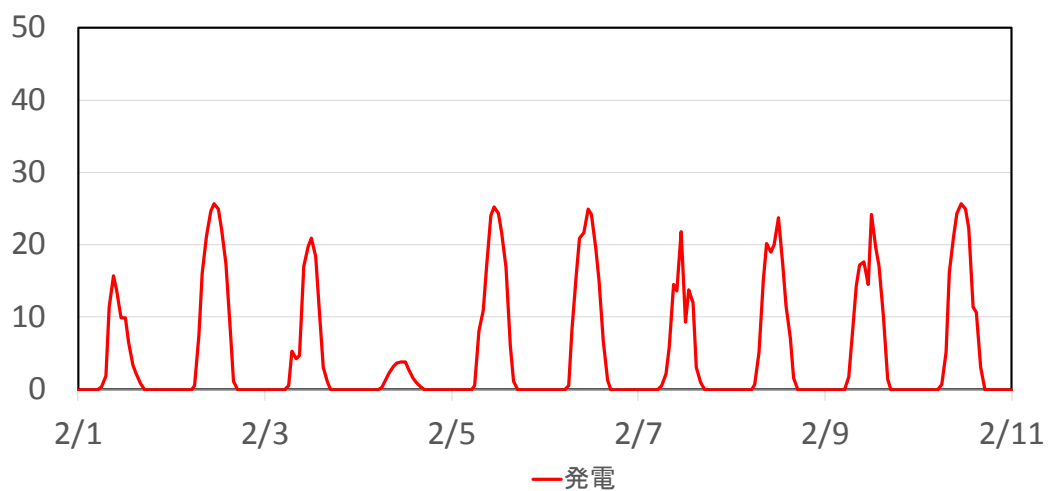
図 4. 8 月別発電量、設備全体の 1 次エネルギー消費量及び太陽光発電による 1 次エネルギー消費削減率（標準ケースを基準とする）



(a) 外気温度及び日射量

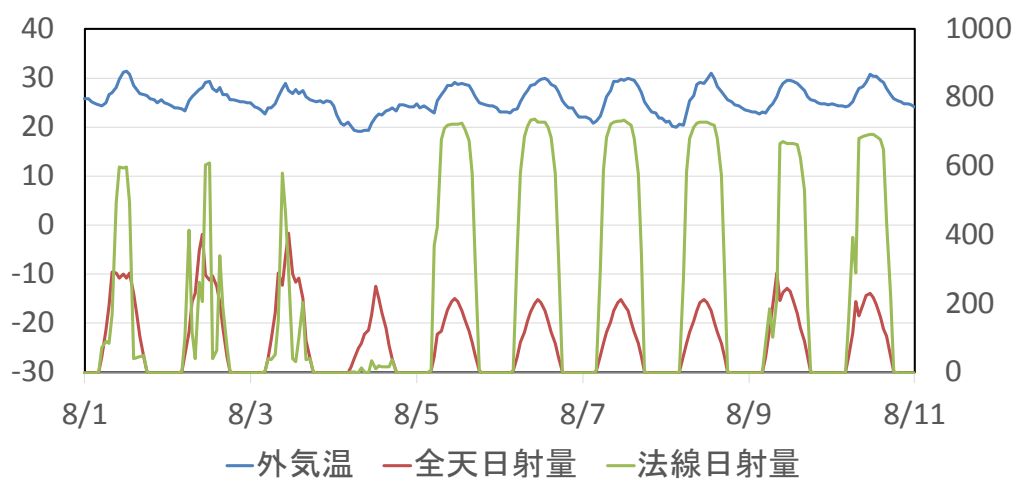


(b) 各設備の電力消費量（標準ケース、太陽光発電ケースで共通）

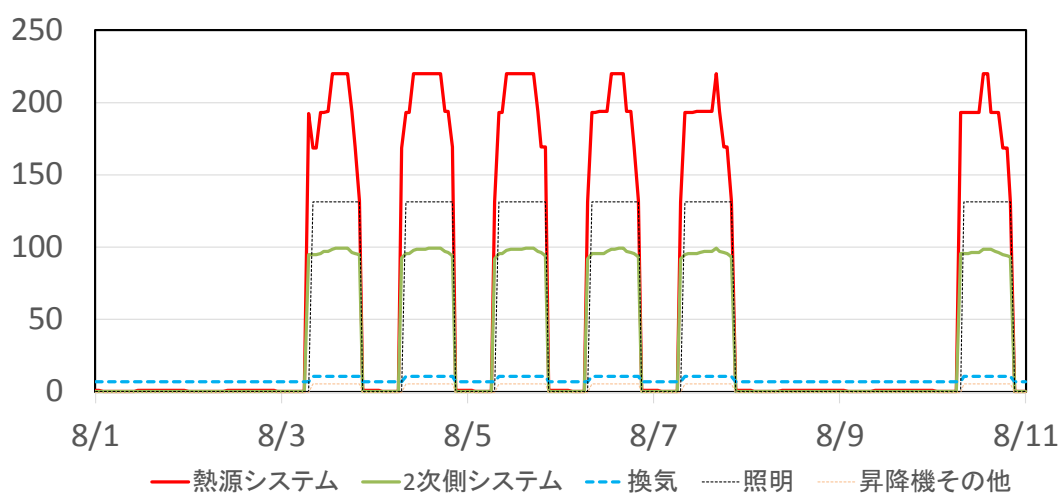


(c) 発電量

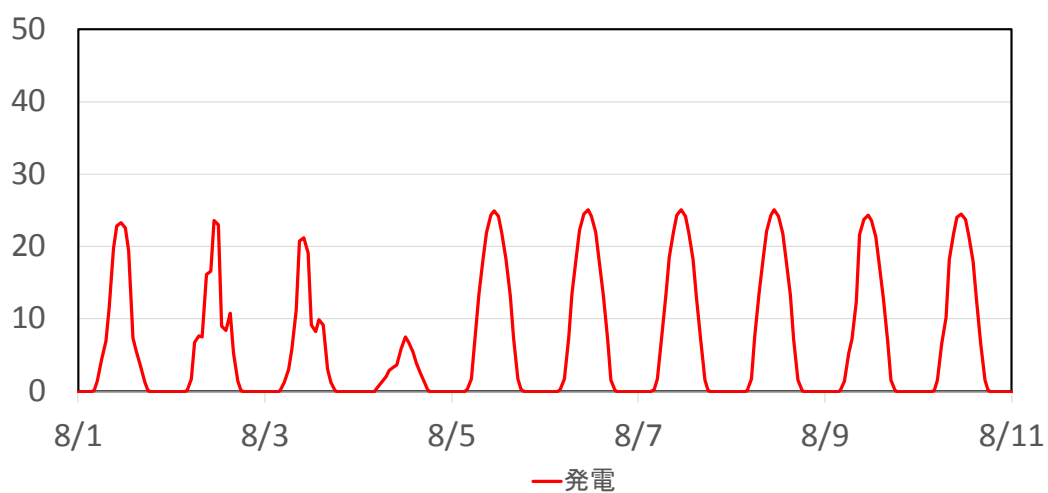
図4. 9 標準システム及び太陽光発電設備の電力量の日挙動（2/1～2/10）



(a) 外気温度及び日射量



(b) 各設備の電力消費量（標準ケース、太陽光発電ケースで共通）



(c) 発電量

図4. 10 標準システム及び太陽光発電設備の電力量の日挙動（8/1～8/10）

表 4. 7 は、各地域の設備全体の年間の 1 次エネルギー消費量及び太陽光発電分を差し引いたケースとの比較による 1 次エネルギー消費量の削減率を一覧したものである。標準ケースにおける設備全体の 1 次エネルギー消費量は、蒸暑地が最も高く 12,039GJ、次いで温暖地 11,289GJ、準寒冷地 10,831GJ となった。太陽光発電設備の導入による 1 次エネルギー消費削減率は、各地域概ね 3%であった。

表 4. 7 設備全体の 1 次エネルギー消費量及び太陽光発電設備による 1 次エネルギー消費削減率（標準ケースを基準とする）

地域	年間1次エネルギー消費量 [GJ]		年間1次エネルギー消費 削減率[%]
	標準ケース	太陽光利用 ケース	
準寒冷地	10,831	10,511	2.95
温暖地	11,289	10,915	3.31
蒸暑地	12,039	11,691	2.90

（4）再生可能エネルギーの導入効果

各地域の年間の 1 次エネルギー消費量を基に、標準ケースとの比較による 1 次エネルギー消費量の削減率を図 4. 11 に示す。地中熱利用設備による 1 次エネルギー消費削減率は準寒冷地、温暖地で 8%台であるのに対して蒸暑地では 3%と半分以下である。太陽光発電設備による 1 次エネルギー消費削減率は 3 地域であり変わらず、概ね 3%であった。地中熱と太陽光を組み合わせた場合、1 次エネルギー消費削減率は 6～12%となった。以上より、再生可能エネルギーの導入効果を定量化することができた。

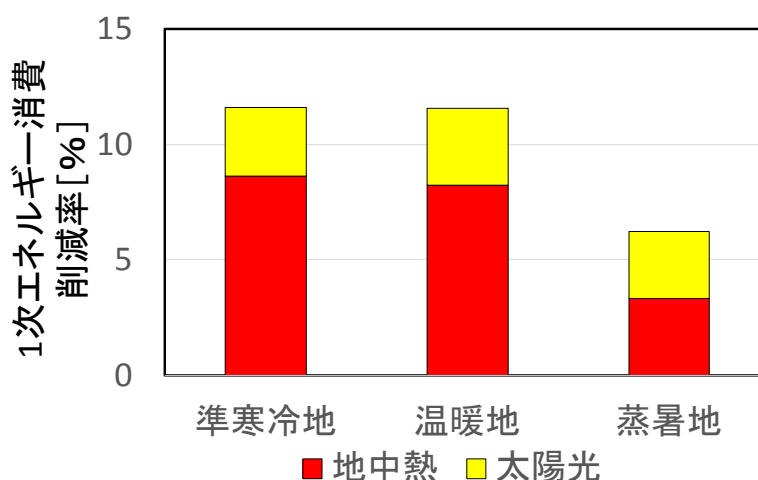


図 4. 11 再生可能エネルギーの導入効果（地中熱、太陽光の場合）

4.5 まとめ

建築物が利用対象とする再生可能エネルギーとして、地中熱、太陽光を取り上げ、これらの評価技術に関する検討を通じて以下の結果を得た。

- 1) 地中熱利用に関しては、地盤の熱応答モデル及び地中熱ヒートポンプの特性を考慮して、採熱管からの戻り水温を動的に予測し、建築物のエネルギーシステム計算に反映することで、1次エネルギー消費量を算定する手法を開発した。
- 2) 太陽光発電に関しては、パネル面の傾斜を考慮して日射強度から発電量を、日射量年変動、経時変化補正、アレイ負荷・回路補正、インバータ回路補正等の影響を加味した総合設計係数から見積もり、建築物のエネルギーシステム計算に反映することで、1次エネルギー消費量を算定する手法を開発した。
- 3) モデル建物（用途：事務所、床面積：約1万 m²）に開発手法を適用し、温暖地、準寒冷地、暑熱地の3地域に地中熱、太陽光の利用設備を導入した場合の試算を行い、両方の設備導入による1次エネルギー消費削減率は、6～12%であることを示した。

第5章 総括

本研究は、住宅を含む建築物において、太陽光、地中熱等の再生可能エネルギーの導入による省エネルギー効果の評価技術を開発することを目的として、再生可能エネルギーの事例調査、地中熱利用の実証実験を行い、再生可能エネルギーの評価技術の開発に取り組んだものである。本研究で得られた成果について以下に述べる。

(1) 再生可能エネルギー事例調査

国内外で再生可能エネルギーが先進的に導入されている 19 の事例調査より、建築物の敷地内で得られる太陽光、地中熱を利用したものが数多く見られ、全体的には再生可能エネルギーを建築物で利用する技術は実用段階に入っていることが示された。太陽光発電については効率・性能の表示に関する標準化が着実に進められており、コストについても太陽光発電の減価償却年数が 7～11 年と手頃な価格設定であることが分かった。一方、地中熱利用設備は初期コストの影響が大きく、掘削工事の合理化など経費削減の工夫が今後求められる。

(2) 地中熱利用の実証実験

地中熱利用に関しては、地中温度の挙動やヒートポンプの稼働時のエネルギー効率などが不明なため、実際に地中埋設管 50m を設置し、地中熱ヒートポンプと空気熱ヒートポンプによる建築物の空調を行う実証実験を実施した。その結果、冬季の暖房に要する電力消費量は地中熱室の方が空気熱室より低く、電力消費削減率で見ると 3.6～21.9%であること、熱源温度が有利な地中熱システムの場合、システム COP が、空気熱源に比べて 0.3～0.8 向上すること、地中熱の場合、デフロスト運転が不要であるため安定した室内環境を達成することが取得データから示された。

(3) 再生可能エネルギーの評価技術

地域、気象データ、建築物の仕様、室使用条件から、建築物の空調、照明、給湯、換気、昇降機のエネルギー消費量を算定する一連の流れ（既往）において、新たに、太陽光発電設備、地中熱利用設備を追加することにより、太陽光、地中熱などの再生可能エネルギーを建築物に導入した場合の 1 次エネルギー消費量の評価技術を開発した。さらに、開発した評価技術をモデル建物（用途：事務所、床面積：約 1 万 m²）に適用し、温暖地、準寒冷地、暑熱地の 3 地域に地中熱、太陽光の利用設備を導入した場合の試算を行った結果、両方の設備導入による 1 次エネルギー消費削減率は、6～12%であることを示した。

今後の課題として以下の事項が考えられる。

- ・評価技術の省エネルギー基準への反映
- ・地中熱利用効率への地下水流動の影響分析
- ・多様な地中熱利用システムへの対応（例えば、杭利用方式、水平埋設方式など）

参考文献

- 1) 地球温暖化対策推進本部: COP19 に向けた温室効果ガス削減目標について
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai27/siryou1_1.pdf (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 2) 経済産業省・国土交通省・環境省: 低炭素社会に向けた住まいと住まい方」の推進方策について中間とりまとめ、2012.7
<http://www.mlit.go.jp/common/000216966.pdf> (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 3) 資源エネルギー庁資料、2014.4
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/setsubi/201401setsubi.pdf (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 4) 国際再生可能エネルギー機関憲章:
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/treaty174_13.html (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 5) 電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法
- 6) エネルギー基本計画、2014.4
- 7) 経済産業省: 北海道洞爺湖サミットにおける『ゼロエミッションハウス』展示について
<http://www.meti.go.jp/topic/data/e80617aj.html> (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 8) 北海道大学地中熱利用システム工学講座: 地中熱ヒートポンプシステム、オーム社、pp. 129-134、2005.9
- 9) 武田清香、長野克則、葛隆生、堀彰吾、射場本忠彦、成田樹昭: 札幌市立大学桑園キャンパスの地中熱ヒートポンプシステムの運転評価 その 1 地中熱ヒートポンプシステムの概要と冷房運転の評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.1785-1788、2007.9
- 10) 学校法人東北公益文科大学 太陽光発電システム、フォーカス NEDO、No.35、pp.8-9、2010
- 11) 雪冷房システム・エコスノードーム、山形県川西町ホームページ
<http://www.town.kawanishi.yamagata.jp/machidukuri/ecosnowdome.html> (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 12) 集中連系型太陽光発電システム実証研究、NEDO ホームページ
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZ_00229.html (2016 年 11 月 2 日閲覧)

- 13) 新エネ百選 選定！、のざわ特別支援学校ホームページ
http://www.tochigi-edu.ed.jp/nozawatoku/nc2/index.php?page_id=51 (2016 年 11 月 2 日
閲覧)
- 14) 環境学習施設「吉田元気村」、秩父市ホームページ
<http://www.city.chichibu.lg.jp/1480.html> (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 15) NEDO：劇団四季太陽光発電システム、新エネ百選、p.36、2009.6
- 16) 緑翠亭景水：地下水を利用した空調、給湯熱源機へのリニューアル
http://www.geohpaj.org/wp/wp-content/uploads/20120229_4.pdf (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 17) エコスクールを目指す設備施設の環境教育への活用、静岡県ホームページ
<http://www.pref.shizuoka.jp/sangyou/sa-150/workon/prize/prize10.html> (2016 年 11 月 2
日閲覧)
- 18) 全戸に太陽光と貯蔵タンク採用／パナホーム「西神南」、週刊住宅オンライン
<https://www.shukan-jutaku.com/article/11618/> (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 19) 足田昌之：サンポート高松地区地域冷暖房施設の運用実績、ヒートポンプとその応用、No.73、
pp.2-7、2007. 7.
- 20) 新日鉄エンジニアリング株式会社：新日鉄エンジニアリング戸畑に「次世代ゼロ・エミッション・
ビル(「ZEB」)を建設、Cool Kyushu Project Stage 2008~2009、pp.42-43
- 21) <http://www.masdar.ae/> (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 22) Burkhard Sanner: Market and potential for geothermal energy in Europe
[http://cger.no/doc//02-EGEC%20bergen%2020915%20\[Compatibility%20Mode\].pdf](http://cger.no/doc//02-EGEC%20bergen%2020915%20[Compatibility%20Mode].pdf)
(2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 23) Denmark: Sol 300, IEA-PVPS-Task 10: Community-scale PV: real examples of PV based
housing and public developments
<http://www.pvdatabase.org/pdf/Sol300.pdf> (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 24) Stad van de Zon
<http://www.heerhugowaardstadvandezon.nl/Stad+van+de+Zon/default.aspx> (2016 年 11 月
2 日閲覧)
- 25) Australia: Olympics Village, Sydney, IEA-PVPS-Task 10: Community-scale PV: real
examples of PV based housing and public developments
<http://www.pvdatabase.org/pdf/OlympicsVillage.pdf> (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 26) JIS C8907: 2005(太陽光発電システムの発電電力量推定方法)
- 27) JIS C8905: 1993(独立形太陽光発電システム通則)
- 28) JIS C8906: 2000(太陽光発電システム運転特性の測定方法)
- 29) JIS C8953: 2006(結晶系太陽電池アレイ出力のオンサイト測定方法)

- 30) JIS C8961: 2008 (太陽光発電用パワーコンディショナの効率測定方法)
- 31) JIS C8971: 1993 (太陽光発電用鉛蓄電池の残存容量測定方法)
- 32) JIS C8960: 2012 (太陽光発電用語)
- 33) JIS C8972: 1997 (太陽光発電用長時間率鉛蓄電池の試験方法)
- 34) 太陽光発電協会: 太陽光発電協会 表示ガイドライン (平成 28 年度)
<http://www.jppea.gr.jp/pdf/t16072201.pdf> (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 35) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監修: 国土交通省建築設備設計基準、p. 131、
2006.9
- 36) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課: 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
- 37) NPO 法人地中熱利用促進協会 編: 一定加熱・温水循環方式熱応答試験 (TRT) 技術書
(案) Ver. 3.2(公開)、2016.2
http://www.geohpaj.org/wp/wp-content/uploads/trt_draft_v3_2.pdf (2016 年 11 月 2 日閲覧)
- 38) 同上
- 39) JIS B 8615-2:1999 (エアコンディショナ)
- 40) 例えば、Milly, P.C.D.: Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous
media: a matric head-based formulation and a numerical model, Water Resour. Res, 18, pp.
489-498, 1982
- 41) 例えば、Ronald N. Horne: Modern well test analysis second Edition, 1995
- 42) 監修国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所: 平成 25 年省エネ
ギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 I 非住宅建築物、2013.5

関連論文等一覧

- 1) 足永靖信、西澤繁毅、原英嗣：地中熱又は空気熱を利用したヒートポンプ空調の実証研究
(第1報)サーマルレスポンス試験及び自然地中温度、空気調和・衛生工学会大会学術講演
論文集、pp. 21-24、2014.9
- 2) 原英嗣、足永靖信、西澤繁毅：地中熱又は空気熱を利用したヒートポンプ空調の実証研究
(第2報)冬期実験、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp. 25-28、2014.9
- 3) 足永靖信：再生可能エネルギーの利活用－太陽光や地中熱の評価技術－、ベース設計資
料、建設工業調査会、No. 167、建築編 2015 年後期版、pp. 41-45、2015.12
- 4) 地中熱の建物利用、国総研レポート2013、No.12、p.111、2013.4

国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告

PROJECT RESEARCH REPORT of N I L I M

N o . 5 4

March 2017

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675