

## 帯水層を利用した昼夜間蓄熱システムの研究

- 昼夜間・季節間蓄熱利用併用運転における蓄熱特性の同定及びエネルギー消費特性の試算 -

### STUDY ON DAILY THERMAL ENERGY STORAGE UTILIZING AQUIFER - IDENTIFICATION OF THERMAL STORAGE CHARACTERISTICS AND ENERGY CONSUMPTION ON THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM COMBINED DAILY AND SEASONAL -

地域環境計画分野 中島成章

我々は電力負荷平準化を目的とした帯水層を利用した昼夜間蓄熱利用の可能性を検討し、帯水層蓄熱特性同定法の確立を目指してきた。本研究では昼夜間蓄熱実験で得られたパラメータの季節間蓄熱への適用性の検証を目的に、実験とシミュレーションを行った。また、同システム的设计手法確立の次の一手として、蓄熱設備と建築設備を組み合わせたシステム全体のシミュレーションモデルの構築し、既存システムとの電力消費量の比較により、同システムのエネルギー消費特性の試算を実施した。

We focused on the possibility of utilizing Aquifer for daily thermal energy storage use contributes to electric-load leveling and aimed to establish the method for identifying aquifer thermal storage characteristics. The purpose of this study is to consider the possibility that the parameter indicating thermal storage characteristics identified by the daily thermal storage experiment apply to seasonal thermal storage through experiment and simulation studies. In addition, as the next step in establishment for design method of Aquifer thermal energy storage(ATES), using the model combined a thermal energy storage system model and an air conditioner model, coupled calculation of thermal storage system and an air conditioner is performed, and the performance of ATES is evaluated.

#### 1. 研究の背景

東日本大震災以降、電力のピーク供給力不足が顕在化しており、電力負荷低減が呼びかけられている。電力負荷平準化に向けた技術である蓄熱空調システムは、当初は熱源機の容量削減や容量制御による運転効率の低下を避ける事を目的に導入された。その後、昼間にピークを迎える電力消費の一部を夜間に移行できる事から、一般的な空調技術として建築設備設計指針にも採用されている。しかし、蓄熱槽の構築にコストやスペースが必要となるため、既存の建物への導入に支障がないとは言えない。そこで建物地下に存在する帯水層を蓄熱槽として利用すれば、槽構築自体のコストや設置スペースの確保が必要無くなる(図1)。

#### 2. 研究の目的

帯水層蓄熱システムは欧州においては、積極的な研究開発や導入事例が多く見られているが、日本での適用事例は、試験的な導入や融雪目的などに留まっており、導入件数も僅かである。我々の研究グループは今までの研究成果から昼夜間蓄熱における「蓄熱実験と熱水分移動シミュレーションの突き合わせによる蓄熱特性把握」<sup>1)</sup>の試験法を提案してきた。ただし、この

試験法により同定される蓄熱特性を表すパラメータは昼夜間蓄熱想定の実験から求められていた。我々は、帯水層蓄熱システムの新たな運転方法に、昼夜間蓄熱と季節間蓄熱を組み合わせることを考案している。そこで、昼夜間蓄熱実験で得られた同定モデルは季節間蓄熱にも対応しているのかを把握するべく、季節間蓄熱実験を行い、過去に同定されたパラメータと季節間蓄熱実験で得られたパラメータの精度の違いを検証する。また、帯水層蓄熱システムの導入を検討する際、帯水層の蓄熱特性のみの把握ではシステム設計は行えない。帯水層蓄熱システムの導入手法確立への次の一手として、蓄熱対象の帯水層の蓄熱特性だけではなく、熱源機や空調機などの二次側、つまり建築設備と組み合わせ、システム全体としての評価が必要となる。

本研究では、過去に提案された試験法にて、蓄熱利用方式の違いから現れる同定パラメータの精度の違いを把握すると同時に、建築設備と蓄熱設備を連成計算できるシミュレーションモデルの構築を行い、変流量制御に対応した帯水層蓄熱システムにおいて、蓄熱利用方式の違いがエネルギー消費量に与える影響を試算すること目的とする。

### 3. 帯水層蓄熱実験

帯水層の蓄熱特性把握法の精度を明らかにするために、季節間の帯水層蓄熱利用を想定した蓄熱実験を行う。2012年度には大阪市立大学構内の井戸2(GL-約21~24mの砂礫層を蓄熱対象)を使用した昼夜蓄熱想定での蓄熱実験<sup>1)</sup>を実施した。後のシミュレーション等の検討により、温度応答を再現する平均地下水流速は0m/s、縦分散長0.002m、横分散長0.0002mと同定された。2014年度は、同井戸を使用した季節間蓄熱想定での蓄熱実験を行う。

#### 3.1 実験設備概要&実験条件

実験設備は、異なる深度にストレーナを設ける2本の井戸と熱源機から構成されている(図2)。井戸2に注水を行うときは井戸1を水源とする。温度は各井戸の出入口とチラーの出入口に設置した测温抵抗体と井戸内の熱電対で、流量は地上配管部の電磁流量計で計測を行っている。また、開始前の地下水温計測から井戸2内の地下水基準温度は18.1℃とわかっている。実験条件を表1、実験運転スケジュールを表2に示す。

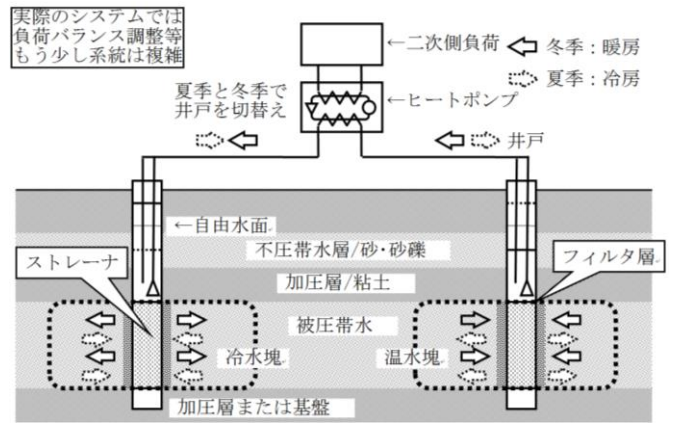
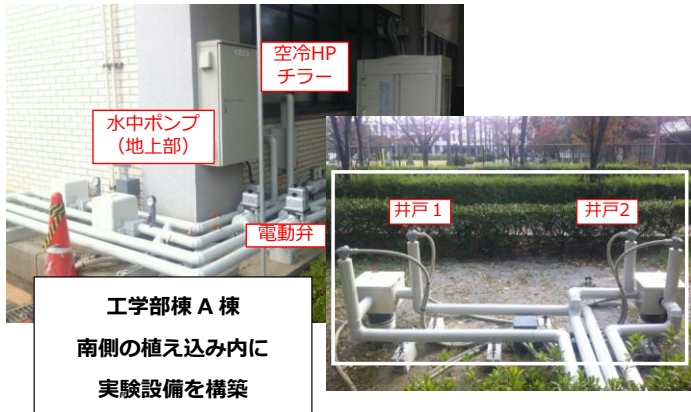


図1 帯水層蓄熱システム

表1 実験条件

帯水層位置[m]	GL-20.8~23.6m	
注水温度[℃]	5.2	注水揚水量[l/min] 40↓/38↑
運転条件	注水(15日)→停止(60日)→停止(52日,8h/日)	

表2 実験運転スケジュール

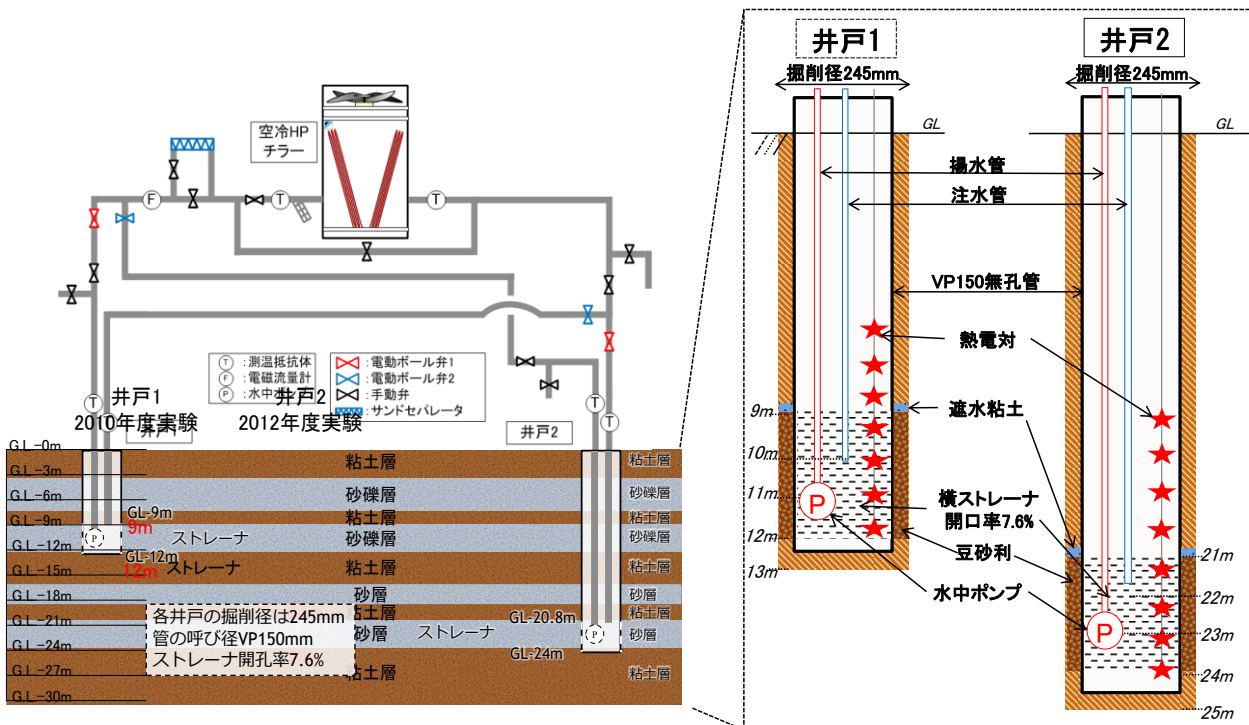
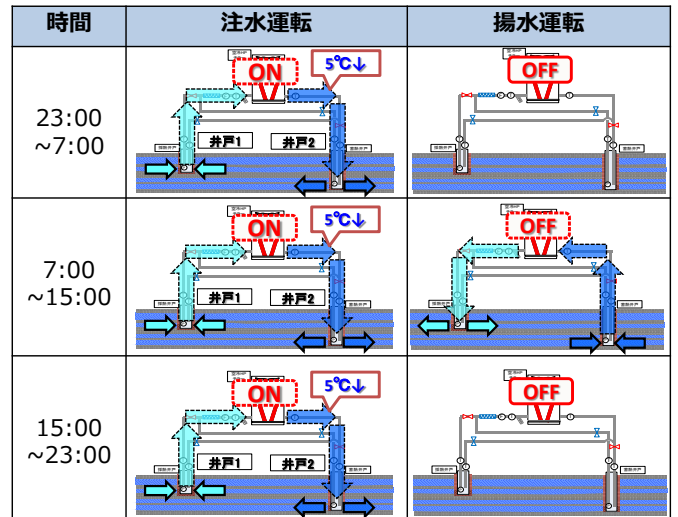


図2 蓄熱実験設備 (左: 実験設備全体像 右: 各実験井戸の構造)

### 3.2 実験結果

実験実施時の温度応答を図3に、実験結果を表3に示す。注水停止区間はGL-23m, GL-24m熱電対温度の平均値を、揚水区間は揚水管地上部の测温抵抗体温度(ポンプ発熱≒0.3℃は除去)を採用している。なお、熱回収率は式1で定義している。

$$\eta_H = \frac{c\rho_w \sum q_{out}(T_{out} - T_0)}{c\rho_w \sum q_{in}(T_{in} - T_0)} \quad \text{式1}$$

ここに、 $\eta_H$ は熱回収率、 $c\rho_w$ は水の熱容量、 $q_{in}$ は注水量、 $T_{in}$ は注水温度、 $q_{out}$ は揚水量、 $T_{out}$ は揚水温度、 $T_0$ は実験開始前の初期地中温度を指す。

図3より、停止区間及び揚水区間に大きく温度上昇を示す事がわかる。これは、注水した冷熱が周囲への熱伝導と移流による熱拡散の影響を受けるためである。熱回収率は28.6%と昼夜間蓄熱(1サイクル目で約75%)と比較すると小さい熱回収率となった。これは、停止期間の影響が大きいと考えられる。

### 3.3 シミュレーション検討

大学構内の地盤を独WASY社の地下水流動解析ツールであるFEFLOW<sup>2)</sup>にて再現(図4)し、昼夜間蓄熱実験から同定されたパラメータを用い、本年度実施した季節間蓄熱実験結果の再現を試みた。図5より、昼夜間蓄熱同定モデルでは本年度の季節間蓄熱実験は再現出来ていない。そこで、季節間蓄熱実験結果より再度パラメータ同定を実施した。その結果を図6~図8に示す。自然地下水流速、分散長、熱伝導率の3つのパラメータを変化させパラメータ同定を行なった結果、自然地下水流速0.050[m/day]、縦分散長0.005m、横分散長0.0005m、熱伝導率4.125[W/mK]で実験結果を精度

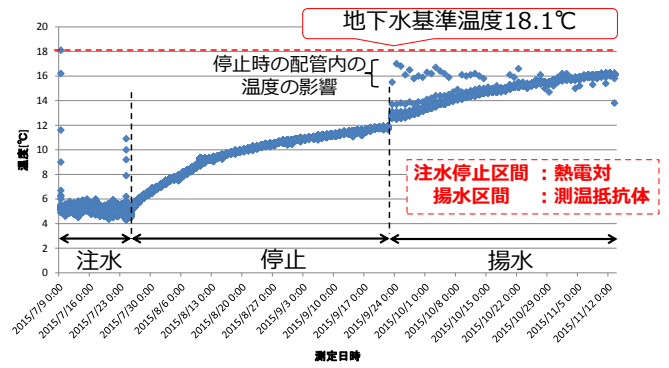


図3 実験温度応答

表3 実験結果

投入熱量	48.83GJ	回収熱量	13.97GJ
平均揚水温度	14.4℃	熱回収率	28.6%

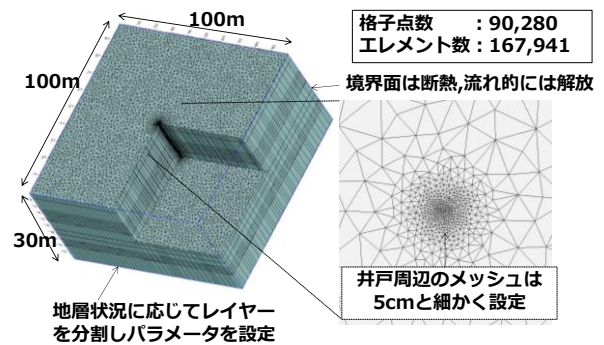


図4 FEFLOWによる実験地盤の設定

よく再現出来た。パラメータ同定の結果、昼夜間蓄熱実験から得られる同定パラメータと季節間蓄熱実験から得られる同定パラメータにはバラつきがあり、昼夜間蓄熱では分散長、季節間蓄熱では地下水流速と熱伝導率が感度の高いパラメータであることがわかった。

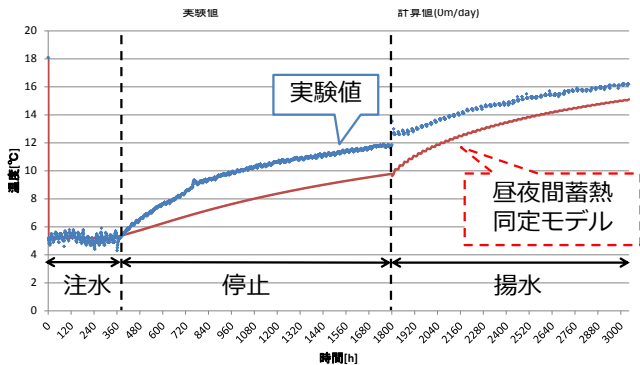


図5 実験値と昼夜間蓄熱同定モデルの計算値の比較

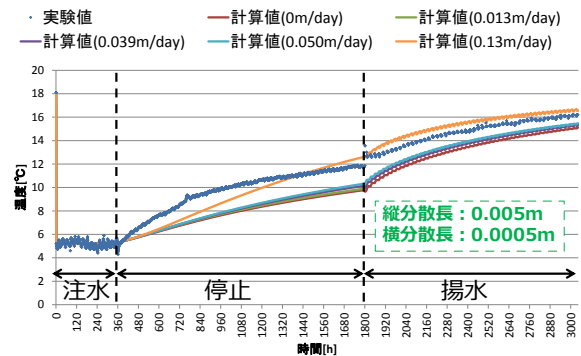


図6 地下水流速の同定(流速変更)

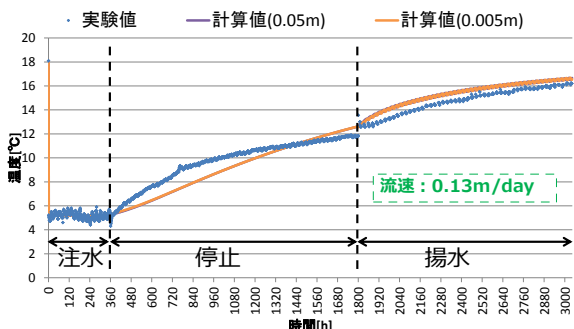


図7 地下水流速の同定(分散長変更)

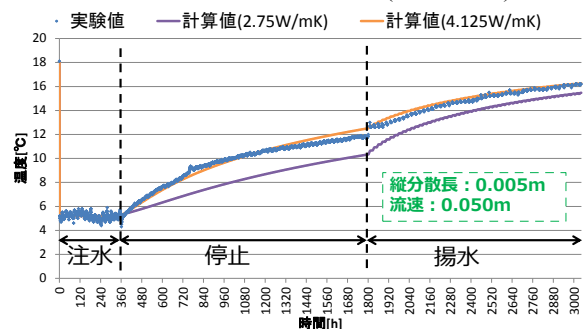


図8 地下水流速(熱伝導率変更)

4. 帯水層蓄熱システムエネルギーシミュレーション  
 帯水層蓄熱システム(以下 ATEs)の省エネルギー効果及びピークカット効果などの性能を把握することを目的として、シミュレーションソフト Dymola を用い、帯水層の集中定数モデル及び 2 本井戸での ATEs 全体のシミュレーションモデルの構築を行い、既存システムを冷却塔システムとした場合の変流量制御を組み込んだ昼夜間 ATEs と季節間+昼夜間 ATEs のエネルギーシミュレーションを行った。

#### 4.1 帯水層蓄熱利用方式

本研究では、ATEs の蓄熱利用方式として 2 つ挙げている。それぞれの運転構成及び特徴を以下に示す。

##### ・昼夜間 ATEs

昼夜間蓄熱利用では、夜間電力が適用される時間帯に 1 つの井戸から揚水し、もう 1 つの井戸に蓄熱を行う。そして、冷房負荷が大きくなる時間帯に採熱することで、ピークカットによる電力負荷平準化を主な目的とした運転である。夜間蓄熱運転の運転構成を図 9、昼間採熱運転を図 10 に示す。

##### ・季節間+昼夜間 ATEs

季節間+昼夜間蓄熱併用利用では、冬期に暖房排熱を利用して蓄熱を行なう。なお、蓄熱した冷排熱は夏期の初期に採熱し、使用する。つまり、季節間蓄熱である。しかし、日本では一般に暖房負荷より冷房負荷のほうが大きいので、冬期の冷排熱を用いて夏期の冷房を行なう季節間蓄熱利用のみでは、夏期の冷房負荷の全てを賄うことは出来ない。そこで、冬期に蓄熱した冷排熱を使い終わり次第、昼夜間蓄熱利用に切り替える蓄熱利用方式が本方式である。この蓄熱利用方式は季節間蓄熱利用のメリットである省エネルギー効果と昼夜間蓄熱利用のメリットである電力負荷平準化の両方のメリットを持ちつつ、昼夜間蓄熱の増エネルギーになりやすいというデメリットを軽減する利用方式である。本蓄熱利用方式の熱利用概念を図 11 に示す。季節間蓄熱の採熱運転及び昼夜間蓄熱運転の構成については昼夜間 ATEs と同様(図 9、図 10)である。

次に比較対象である既存システムである冷却塔システムの運転構成を図 12 に示す。冷却塔システムは、冷却塔と冷凍機を用いた熱源システムである。

#### 4.2 設定条件

##### ・想定建物及び熱負荷

想定する建物は、業務施設を対象とする。また、建物規模は帯水層集中定数モデル<sup>3)</sup>の数値計算上の適用範囲を考慮し、使用している冷凍機の定格冷水量を 100L/min とした場合に夏期冷房負荷を処理できる規模である 1000m<sup>2</sup> にした。熱負荷は年間熱負荷原単位と冷房・暖房月別、時刻別負荷変動<sup>4)</sup>を参考とし、建物の延べ床面積を乗じるにより算出した。(図 13)

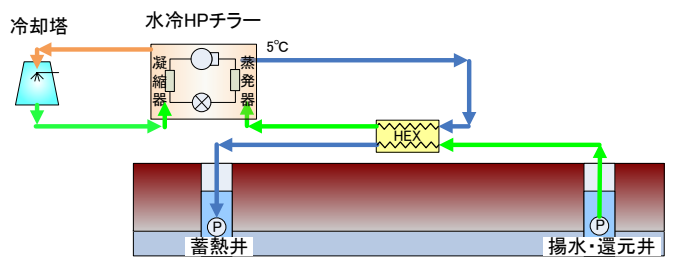


図 9 夜間蓄熱運転概要

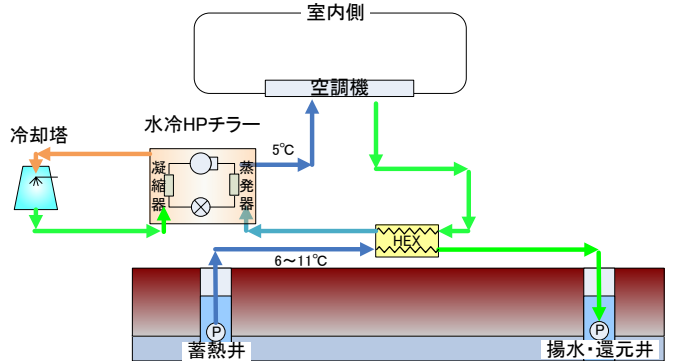


図 10 昼間採熱蓄熱運転概要

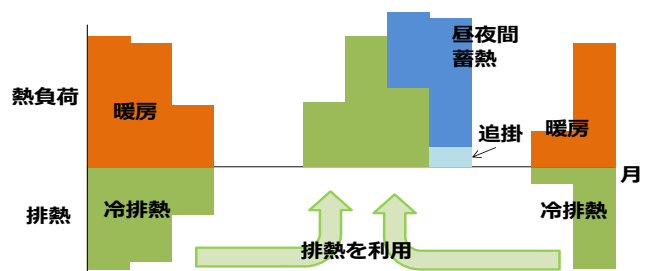


図 11 季節間+昼夜間蓄熱併用利用の概念図

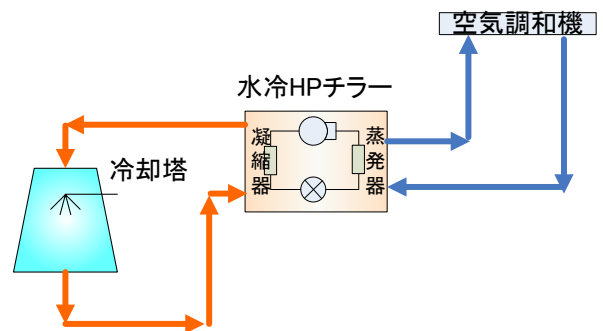


図 12 冷却塔システムの運転概要

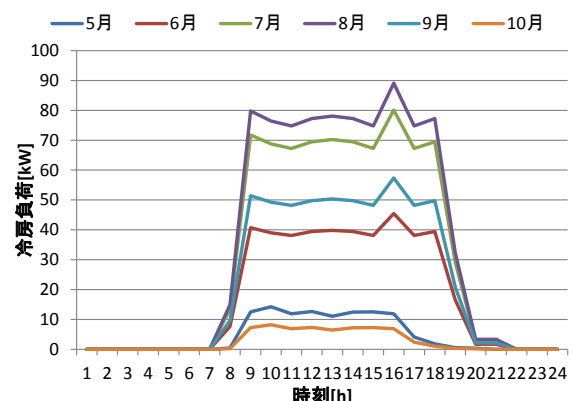


図 13 時刻別冷房負荷

・運転モードの切り替えと変流量制御

運転モードの切り替えは時間で制御しており、各モジュールに運転モード別にパラメータを設定し、切り替えを行っている。運転スケジュールは、昼夜間蓄熱運転時は23時～7時が夜間蓄熱、負荷がある時間帯が採熱運転、その他が停止運転である。季節間運転時は負荷がある時間は採熱運転、その他が停止運転である。

変流量制御には2パターンの制御ロジックがある。

- (1)空調機から戻ってきた冷水と揚水した地下水が熱交換を行なった後の地下水温度を検出し、その温度が一定(11℃～14℃)になる様に揚水流量を操作
- (2)空調機から戻ってきた冷水温度と地下水の揚水温度の差を検出し、その差の大きさによって、揚水流量を操作

4. 3 シミュレーションケース

ATESのエネルギー消費特性を把握するため、冷却塔システムと変流量制御(1)を組み込んだ昼夜間 ATES と季節間+昼夜間 ATES の連続計算による冷房期間(季節間+昼夜間 ATES は暖房期間も計算実施)の導入効果の試算を行った。また、変流量制御(1)では現実とは違う運転が生じたため、変流量制御(1)を改良した変流量制御(2)を組み込んだ季節間+昼夜間 ATES(以下、季節間+昼夜間 ATES(改))の各月代表日の計算も行った。

4. 4 シミュレーション結果

シミュレーション結果のうち、代表日の時刻別の電力消費量の試算結果を用いて、冷却塔システムと3つの帯水層蓄熱システムの計算結果との比較を行う。本報告では代表として8月の結果を図14、図15に示す。

8月は昼夜間 ATES と季節間+昼夜間 ATES とともに昼夜間蓄熱運転となっているため、季節間+昼夜間 ATES においても季節間蓄熱の影響は受けておらず、電力消費量に大差はない。

冷却塔システムのピーク電力消費量は、16時となっている。それと比較して昼夜間 ATES と季節間+昼夜間 ATES は同様の電力消費量の推移を示しており、ピーク電力消費量は夜間蓄熱運転中となっているため、ピークシフトが行われている。ただし、1日の後半の冷房負荷が小さくなる時間帯において、地下水が負荷になり電力消費量が増加している。一方、季節間+昼夜間 ATES(改)では、変流量制御の改善より、負荷平準化を行うために適切な流量に制御できていることから、他の ATES と比較すると、ピーク負荷が生じる16時でも大幅に電力消費量を低減できている。また、冷房負荷が小さくなる時間帯における地下水が負荷になる運転も改善されている。

次に、月別積算消費電力量の比較結果を図16に示す。代表日による比較と同様に、昼夜間蓄熱システムでは5月、6月、9月、10月は電力消費量がそれぞれ63%

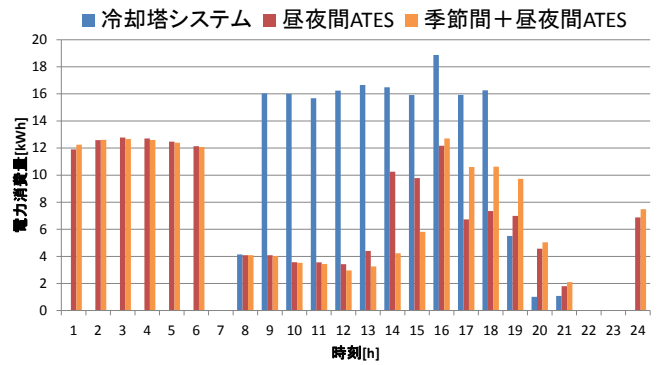


図14 冷却塔システムと昼夜間 ATES 及び季節間+昼夜間 ATES の時刻別消費電力(8月15日)

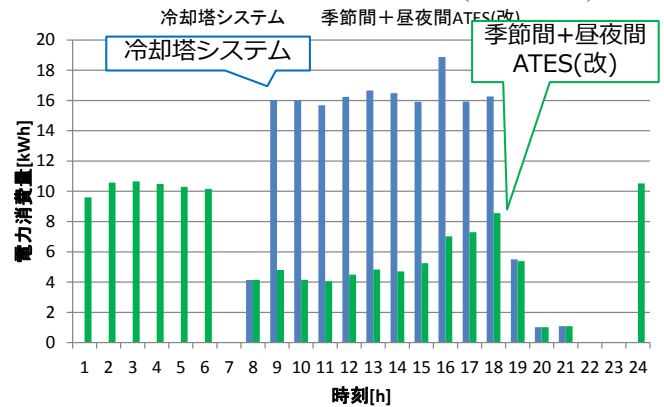


図15 冷却塔システムと季節間+昼夜間 ATES(改)の時刻別消費電力(8月代表日)

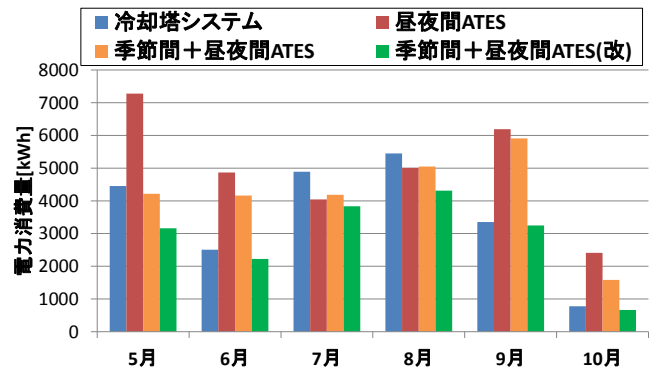


図16 各システムの月別積算消費電力

94%, 85%, 211%増加しているが、7月、8月は17%, 8%低減することができている。次に、季節間+昼夜間蓄熱システムは季節間蓄熱を組み合わせることにより7月、8月に加えて、5月も電力消費量を低減することができおり、低減の比率としては5月が5%, 7月が14%, 8月が7%となっている。6月、9月、10月は昼夜間 ATES と同様に消費電力量が増加している。一方、季節間+昼夜間 ATES(改)では、制御ロジックを改良したことと中間期の夜間蓄熱量を調整したことにより、冷房期間全ての月において、冷却塔システムの電力消費量より低減することができている。低減率は、5月は29%, 6月は11%, 7月は22%, 8月は21%, 9月は3%, 10月は14%である。

冷房期間の積算電力消費量を図 17 に示す。冷却塔システムの電力消費量を基準とした場合、昼夜間 ATES が約 40%増加、季節間+昼夜間 ATES が約 19%増加となった。一方、季節間+昼夜間 ATES(改)は、約 19%低減可能ということがわかった。これより、昼夜間蓄熱だけではなく季節間蓄熱も組み合わせ、また、変流量制御を適切に行い、夜間蓄熱量を翌日の負荷に合わせ、適切な熱量を蓄熱することによって、ピークカット効果とともに、電力消費量も低減でき、省エネルギーになることがわかった。

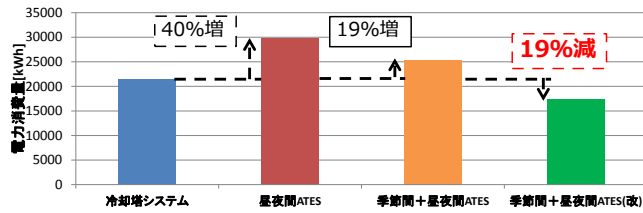


図 17 冷房期間積算電力消費量比較

次に、ピーク電力消費量と夜間電力料金を昼間の 1/2 とした場合の電気料金について、冷却塔システムを基準とした場合の増減率を図 18 に示す。

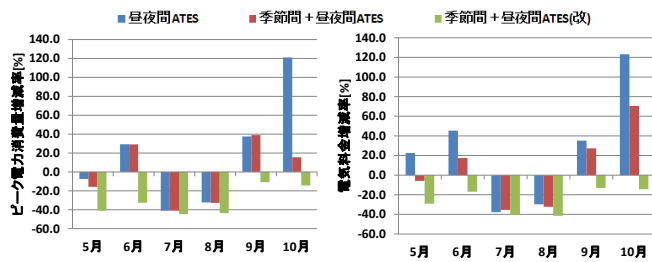


図 18 ピーク電力消費量増減率及び電気料金増減率

昼夜間 ATES を導入すると、ピーク電力消費量は 5 月、7 月、8 月、また、電気料金は 7 月、8 月は低減できることがわかった。しかし、その他の月については増加してしまい、冷房期間の合計電気料金は増加してしまう結果となった。一方、季節間蓄熱も組み合わせた季節間+昼夜間 ATES(改)を導入すると、ピーク電力消費量、電気料金ともに全ての月で低減できることがわかった。また、冷房期間全体でみると、電気料金は約 30.2%低減することが出来ることがわかった。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 昼夜間蓄熱実験から得られる同定パラメータと季節間蓄熱実験から得られる同定パラメータにはバラつきがあり、昼夜間蓄熱では分散長、季節間蓄熱では地下水流速と熱伝導率が感度の高いパラメータである事を示した。
- (2) 建築設備と蓄熱設備を連成させ、連続計算を実施した結果、変流量制御と夜間蓄熱量の調整を実施した場合、昼夜間蓄熱利用に季節間蓄熱利用を組み合わせることにより、ピークカット効果に加え、

省エネルギー効果も得ることができるとわかった。

## [FEFLOW の基礎式]

FEFLOW では適切な layer 分割と各層への物性値の付加により実験地盤を再現し、土壌粒子、液体、気体それぞれに対し、以下の 3 つの保存則からなる基礎式をベースに地下水流動や熱収支を有限要素法により算定する。

<質量保存則>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_{\alpha}\rho^{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_{\alpha}\rho^{\alpha}v_i^{\alpha}) = \varepsilon_{\alpha}\rho^{\alpha}Q_{\rho}^{\alpha} \quad \dots(2)$$

<運動量保存則>

$$v_i^{\alpha} + \frac{k_{ij}^{\alpha}}{\varepsilon_{\alpha}\mu^{\alpha}}\left(\frac{\partial p^{\alpha}}{\partial x_j} - \rho^{\alpha}g_j\right) = 0 \quad \dots(3)$$

<エネルギー保存則>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_{\alpha}\rho^{\alpha}E^{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon_{\alpha}\rho^{\alpha}v_i^{\alpha}E^{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(j_{iT}^{\alpha}) = \varepsilon_{\alpha}\rho^{\alpha}Q_T^{\alpha} \quad \dots(4)$$

ここで  $\alpha$  は各相を表している。また  $j_{iT}$  は熱フラックスとして式(5)で表される。

$$j_{iT}^{\alpha} = -(\lambda_{ij}^{cond\alpha} + \lambda_{ij}^{disp\alpha})\frac{\partial T^{\alpha}}{\partial x_j} \quad \dots(5)$$

$$= -\varepsilon_{\alpha}\left[(\lambda^{\alpha} + c^{\alpha}\rho^{\alpha}\alpha_T V^{\alpha})\delta_{ij} + c^{\alpha}\rho^{\alpha}(\alpha_L - \alpha_T)\frac{v_i^{\alpha}v_j^{\alpha}}{V^{\alpha}}\right]\frac{\partial T^{\alpha}}{\partial x_j}$$

式(5)に含まれる  $\alpha_L$  と  $\alpha_T$  は縦分散長と横分散長であり、土壌内の伝熱機構において重要な因子である。横分散長は縦分散長の 1/10 である。

<記号一覧>

$\varepsilon$ : 間隙率	$\rho$ : 密度
$v_i, v_j$ : 速度ベクトル	$Q_{\rho}$ : 質量発生項
$k_{ij}$ : 浸透テンソル	$k$ : 透水係数
$\mu$ : 粘性係数	$p$ : 圧力
$g_j$ : 重力加速度	$E$ : 内部エネルギー
$j_{iT}$ : 熱フラックス	$Q_T$ : 熱量発生項
$\lambda_{ij}^{cond}$ : 移流熱伝達率	$\lambda_{ij}^{disp}$ : 分散熱伝達率
$T$ : 温度	$\lambda$ : 熱伝導率
$c$ : 比熱	$\alpha_L$ : 縦分散長
$\alpha_T$ : 横分散長	$V$ : 絶対速度
$\delta_{ij}$ : クロネッカーテンソル	

<参考文献>

- 1) 佐々木健太: 帯水層を利用した昼夜間蓄熱システムの研究-長期運転時の蓄熱モデルの実験検証- 大阪市立大学大学院修士論文 2013年2月
- 2) WASY Software: FEFLOW 5.3 Reference Manual
- 3) 伊藤貴之: 帯水層を利用した昼夜間蓄熱システムの研究-帯水層の温度応答を予測する集中定数モデルの構築-大阪市立大学大学院修士論文 2012年2月
- 4) 社団法人空気調和衛生工学会: 『蓄熱空調システムの計画と設計』 丸善株式会社

討議

◆討議 [大島教授]

- 1)実験では異なる帯水層を用い実施しているが実際の導入時は同じ帯水層を対象とするのか？
- 2)揚水した場合の地下水位低下量は？
- 3)今年度実験を実施している帯水層の流速は大きいのか？

◆回答

- 1)帯水層蓄熱システムの導入を検討する際、本研究では取水と蓄熱を同じ帯水層で行う方式(=タブレット式)を検討対象としているが、学内実験設備のように取水と蓄熱を異なる帯水層で行う方式(=モノウェル式)も実在し、欧州ではどちらの方式も導入事例はある。
- 2)今年度実施した実験の地下水位の推移を以下に示す。

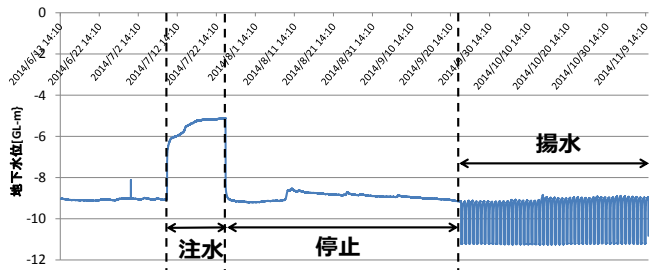


図1 季節間蓄熱実験における地下水位の推移

図1より、地下水位の変動は注水時に約3.0~4.0m上昇し、注水終了とほぼ同時初期状態に回復している。そして、揚水時は約2.0m低下しているが、1日ごとに初期状態に戻っていることが分かる。またこの変動傾向はサイクルを重ねても変化しない事がわかる。

- 3)今年度実施したパラメータ同定により、自然地下水流速は0.050[m/day]と同定された。このパラメータを用いた場合と昼夜間蓄熱実験で同定されたパラメータ(自然地下水流速0m/s)の両条件でそれぞれ注水8h⇒揚水8h⇒停止8hを1サイクルとしたサイクルシミュレーションを14サイクル実施した。以下に結果を示す。

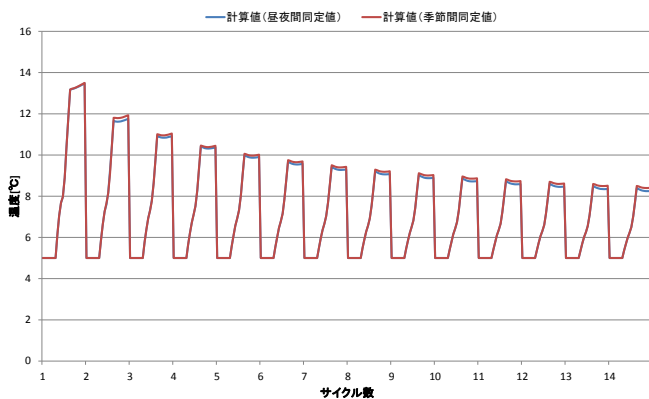


図2 昼夜間蓄熱の温度応答の比較

図2より、2つのシミュレーション結果に殆ど差がないことが分かる。つまり、この自然地下水流速の差は昼夜間蓄熱の温度応答には影響を与えないことがわかる。一方、季節間蓄熱では梗概内の図6のように自然地下水流速により温度応答大きくが変化する。

◆討議 [水谷准教授]

- ・井戸間の距離は最低どのくらい離さないといけないのか？

◆回答

井戸間の距離は注水・揚水量や帯水層厚さ、間隙率など導入する帯水層蓄熱システムの条件や対象地盤によって変化する。そのため、導入検討の際にその都度検討する必要がある。つまり、井戸間距離を算出するには、自然地下水流速、注水・揚水量、帯水層厚さ、間隙率が必要である。

◆討議 [鍋島准教授]

- 1)既存システムは冷却塔を用いたシステムとしたのはなぜか？
- 2)昼夜間蓄熱と季節間蓄熱を併用する場合、必要な帯水層のパラメータはなにか？

◆回答

- 1)既存システムを冷却塔を用いたシステムとしたのは、過去に行われた代表日によるATESのエネルギーシミュレーションとの比較を行うため、そのシミュレーションと同様のシステムとした。また、シミュレーションを実施するには空冷のモデルを新たに構築する必要があるため、空冷のシステムとの比較は今後の課題とした。

- 2)本研究のパラメータ同定により、昼夜間蓄熱実験から得られる同定パラメータと季節間蓄熱実験から得られる同定パラメータにはバラつきがあり、昼夜間蓄熱では分散長、季節間蓄熱では地下水流速と熱伝導率が感度の高いパラメータである事が分かった。よって、昼夜間蓄熱と季節間蓄熱を組み合わせる場合、自然地下水流速、分散長、熱伝導率の全てを精度よく把握する必要がある。また、透水係数と貯留係数は揚水試験にて求め、両蓄熱利用方式にてそれほど感度が低いその他のパラメータは文献値の引用によって決定する。

◆討議 [西岡准教授]

・年間の熱バランスを考慮する必要があるが、どのようなバランスとなっているか？

◆回答

季節間+昼夜間 ATES のシミュレーションにおける地下水基準温度(18℃)を基準とした際の月積算蓄熱量と採熱量を以下に示す。

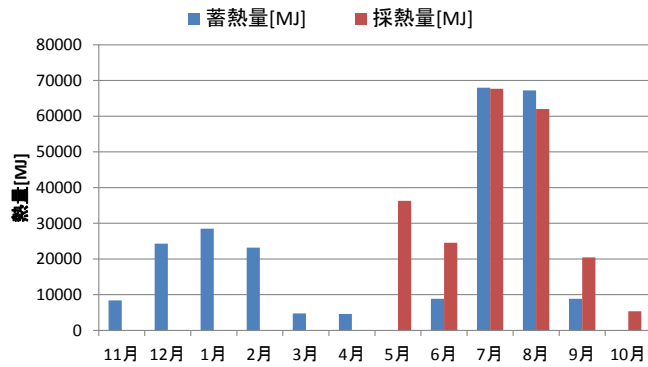


図3 月別積算蓄熱量・採熱量

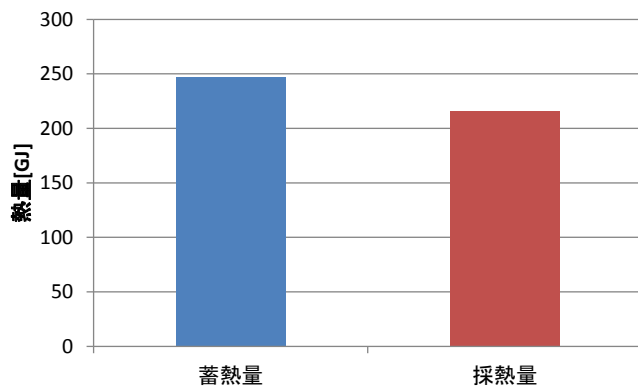


図4 年間積算蓄熱量・採熱量

図3と図4より、冬期の蓄熱量の大部分は5月の採熱運転により回収されていることが分かる。また、年間の積算熱量を熱回収率で評価すると87.7%となった。そのため、蓄熱量の約12.3%は回収しきれず、帯水層に残ったままとなっている。本シミュレーションでは変流量制御を導入したため、熱量を正確にバランスさせることは難しい。しかし、より蓄熱量と採熱量をバランスさせるには、変流量制御ロジックにどのくらい採熱を行っているかをモニタリングし、揚水量を調節するロジックを組み込むことが必要であると考えられる。