



|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 帯水層熱利用を導入した複合型エネルギーシステムに関する研究   |
| Author(s)        | 濱田, 靖弘; 落藤, 澄; 中村, 真人 他   |
| Description      | 第8回衛生工学シンポジウム (平成12年11月16日 (木) -17日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 3 建築環境・エネルギー利用 . 3-5     |
| Citation         | 衛生工学シンポジウム論文集, 8, 149-154   |
| Issue Date       | 2000-11-01  |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/7225">https://hdl.handle.net/2115/7225</a> |
| Type             | departmental bulletin paper   |
| File Information | 8-3-5_p149-154.pdf  |



3-5

帯水層熱利用を導入した複合型エネルギーシステムに関する研究

濱田靖弘・落藤 澄・中村真人・〇淵上栄樹(北海道大学)・丸谷 薫(北海道立地質研究所)・瀧下裕明(日立ビルシステム)

1.はじめに

筆者らの研究室ではこれまで蓄熱体としてあるいは熱源としての多様な利用形態の可能性を持つ地下に着目し、実験と解析の両面から、その有効性について検討してきた<sup>1) 2)</sup>。本報では、まず札幌市厚別区の帯水層熱利用実験施設において1995年から2000年まで行った長期蓄熱および短期蓄熱実験により、各蓄熱特性を明らかにした。この地下帯水層の熱特性を踏まえ、地上部の多様な空調設備系と統合化した複合型エネルギーシステムの性能について、数値解析による評価を行うことを目的としたものである。この数値解析評価においてはまず、各種建物用途に対して、帯水層熱利用を導入した際の省エネルギー性を評価するためのシミュレータを作成した。次いで、札幌市厚別区の帯水層熱利用実験施設<sup>2)</sup>における長期蓄熱特性の実験結果を用いて、本シミュレータの再現性の検証を行った。さらに、札幌の事務所を対象として、ヒートポンプを用いた帯水層熱利用システムの解析を行い、その省エネルギー性について検討した。

2.帯水層熱利用の実験計画

2.1 実験施設概要

地下は大規模な蓄熱容量を有しており未利用エネルギーとしての活用が期待されているが、実際の利用例が少ないのが現状であり、その蓄熱特性を把握することが急務であると考えられる。そこで1995年、札幌市厚別区に長期蓄熱特性を把握するための実験施設を建設し、さらに1997年に短期蓄熱特性を把握するために施設の増設を行った。

1997年以降の実験施設の概要を図1に示す。注入、回収を行う蓄熱井戸を4本、その周囲への熱的影響を測定するための観測井戸を6本設置した。帯水層は地下深度約46m~58mにあり、厚さは約12mである。

2.2 実験条件

長期蓄熱実験では、蓄熱井戸①を温蓄熱井戸、蓄熱井戸②、④を冷蓄熱井戸として使用し、蓄熱運転を3箇月、放置期間を1箇月とする季節間サイクル運転を行った。循環流量は実験1では15-50L/minであり、実験2では50L/minである。また短期蓄熱実験では、蓄熱井戸①を蓄熱井戸、蓄熱井戸③を還元井戸として使用し、蓄熱運転および熱利用運転を12時間ごとに行う日サイクル運転を行った。循環流量は50L/minとした。また各実験の初期に測定した地盤の自然温度は10-12℃であった。

2.3 実験日程

表1に帯水層熱利用実験の運転日程を示す。表内には、注入井戸番号および注入温度を示す。1995-97年(実験1)および1999-2000年(実験2)において長期蓄熱に関する実験を3サイクル行った。また1997年の施設増設後、1999年3月までに短期蓄熱実験を4回行った。

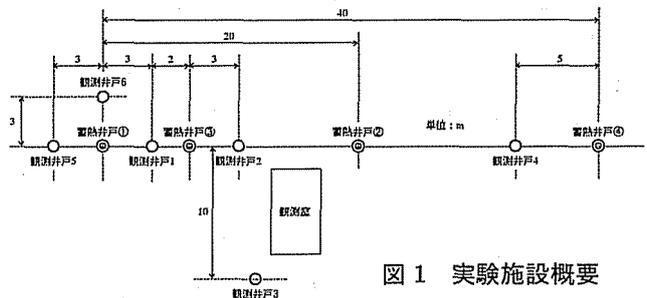


図1 実験施設概要

表1 帯水層熱利用実験の運転日程

| 期間         | 1995        |    |    | 1996        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 1997        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 1998        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 1999        |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 2000        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |
|------------|-------------|----|----|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|-------------|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|
|            | 10          | 11 | 12 | 1           | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1           | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1           | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1           | 2 | 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |
| 注熱注入(冷熱回収) | ①30℃        |    |    | ①30℃        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ①30℃        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ①30℃        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ①10℃        |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | ①自然温度       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |
| 冷熱注入(注熱回収) | ②25℃        |    |    | ②25℃        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ②25℃        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ②25℃        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ②25℃        |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | ②25℃        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | ②自然温度 |  |  |
| 蓄熱回収       | 長期蓄熱 第1サイクル |    |    | 長期蓄熱 第2サイクル |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 長期蓄熱 第3サイクル |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 長期蓄熱 第4サイクル |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 長期蓄熱 第5サイクル |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 長期蓄熱 第6サイクル |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |
| 放置         | ←→          |    |    | ←→          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ←→          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ←→          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ←→          |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | ←→          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |
| 建設期間等      | ←→          |    |    | ←→          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ←→          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ←→          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | ←→          |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | ←→          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |

表 2 短期蓄熱実験の運転実績

| 実験 | 運転期間                    | 日数<br>[日] | 設置<br>[m <sup>3</sup> ] | 温度 [°C] |      |      |       | 蓄熱 [GJ] |       | 熱回収率 [%] |      | エクセルギー [%] |      | SCOP |
|----|-------------------------|-----------|-------------------------|---------|------|------|-------|---------|-------|----------|------|------------|------|------|
|    |                         |           |                         | 基準      | 注入   | 回収   | 注入・回収 | 注入      | 回収    | 注入       | 回収   | 注入         | 回収   |      |
| 1  | 1997/12/16<br>~1998/2/6 | 49        | 1326<br>(13.26)         | 10.2    | 48.4 | 39.8 | 8.6   | 210.4   | 170.5 | 81.0     | 13.0 | 8.6        | 66.5 | 26.6 |
| 2  | 1998/7/16<br>~9/7       | 14        | 505<br>(5.05)           | 11.8    | 29.5 | 27.4 | 2.1   | 37.7    | 32.8  | 87.0     | 1.3  | 1.1        | 79.3 | 18.2 |
| 3  | 1998/10/19<br>~11/9     | 14        | 476<br>(4.76)           | 12.1    | 6.1  | 7.7  | -1.6  | -11.9   | -8.7  | 73.1     | 0.13 | 0.08       | 62.4 | 4.8  |
| 4  | 1999/1/23<br>~3/31      | 9         | 296<br>(2.96)           | 11.7    | 18.8 | 16.3 | 2.5   | 8.7     | 5.5   | 63.2     | 0.11 | 0.04       | 41.2 | 4.6  |

表 3 長期蓄熱実験の運転実績

| 実験 | 期間         |            | 運転モード        | 日数<br>[日] | 自然地下水温度<br>[°C] | 循環流量<br>[L/min] | 注入・回収量<br>[m <sup>3</sup> ] |                 | 温度(熱負)<br>[°C] (GJ) |                  |      |                | 熱回収率<br>[%]    |                 |
|----|------------|------------|--------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|------------------|------|----------------|----------------|-----------------|
|    | 開始         | 終了         |              |           |                 |                 | 温水注入                        | 冷水注入            | 温水回収                | 冷水回収             | 冷水注入 | 冷水回収           |                |                 |
| 1  | 1999/12/18 | 1998/3/18  | 温水注入         | 82        | 10              | 14.4            | 1901                        | 31.6<br>(170.2) | -                   | -                | -    | -              | -              |                 |
|    | 1996/4/18  | 1998/7/10  | 温水回収<br>冷水注入 | 92        |                 |                 |                             |                 | 19.2<br>(96.9)      | 6.4<br>(44.7)    | -    | -              | 56.9<br>(35.4) |                 |
|    | 1996/8/4   | 1998/11/5  | 温水注入<br>冷水回収 | 93        |                 |                 |                             |                 | 23.1<br>(115.5)     | 30.0<br>(150.0)  | -    | -              | 9.8<br>(49.3)  | 28.2<br>(141.0) |
|    | 1996/12/6  | 1997/3/3   | 温水回収<br>冷水注入 | 88        |                 |                 |                             |                 | 28.5<br>(142.5)     | 3615<br>(180.75) | -    | -              | 16.7<br>(83.5) | 6.0<br>(30.0)   |
| 2  | 1999/5/6   | 1999/7/19  | 冷水注入         | 74        | 10.7            | 49.6            | 5285                        | -               | -                   | -                | -    | -              | -              |                 |
|    | 1999/8/9   | 1999/11/12 | 冷水回収<br>温水注入 | 74        |                 |                 |                             | 47.7<br>(238.5) | 16.8<br>(84.0)      | -                | -    | 8.4<br>(42.0)  | 57             |                 |
|    | 1999/12/3  | 2000/2/14  | 温水回収         | 74        |                 |                 |                             | 47.5<br>(237.5) | 6062<br>(303.1)     | -                | -    | 15.3<br>(76.5) | -              | 75              |

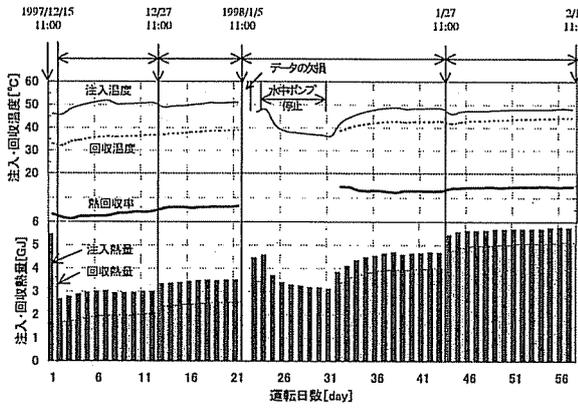


図 2 短期蓄熱実験 1 における蓄熱井戸の各蓄熱特性の経時変化

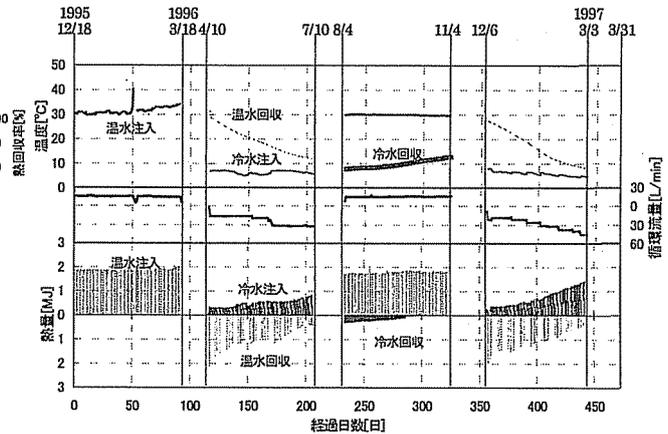


図 3 長期蓄熱実験 1 における各蓄熱特性の経時変化

### 3. 帯水層熱利用の実験結果及び考察

#### 3.1 短期蓄熱実験

短期蓄熱実験の運転実績を表 2 に示す。実験 1, 2, 4 では温蓄熱実験を、実験 3 では冷蓄熱実験を行った。実験 1, 2 では暖房(50°C, 30°C)を、実験 3 では冷房(5°C)を想定した。その蓄熱特性として注入熱量に対する回収熱量の比(熱回収率)を明らかにした。実験 1, 2, 3 におけるそれぞれの期間全体の熱回収率は 81.0%, 87.0%, 73.1%となった。実験 1, 2 の温蓄熱実験における熱回収率の相違は注入温度と自然温度との温度差により周囲への熱拡散が異なるためであると考えられる。また図 2 に示した実験 1 における熱回収率の経時変化より、運転を継続することにより熱回収率が增加することがわかる。実験 1, 2, 3 における最終的な熱回収率はそれぞれ 87.3%, 89.5%, 84.5%となり、直接利用可能な温度条件において、高い熱回収率が得られることがわかった。またエクセルギー回収率も 62~80%の範囲であり、質的な観点からみても省エネルギー効果が高いといえる。またシステム成績係数は温蓄熱では 26.6, 18.2, 冷蓄熱では 4.8 であった。

#### 3.2 長期蓄熱実験

長期蓄熱実験の運転実績を表 3 に示す。長期蓄熱実験ではヒートポンプ、冷凍機の熱源利用または導入外気の予熱、予冷を想定し、温水注入温度は 30°C、冷水注入温度は 5°Cとした。実験 2 は実験 1 に対して循環流量を大きくした実験を行っている。実験 1 の熱回収率は温熱実験では 56.9%, 60.9%となり、また冷熱実験では 28.2%となった。冷熱実験は回収に対する注入の流量が大きく、十分な回収量が得られなかったため比較的小さな値となった。しかし、注入・回収量をほぼ同量として行った実験 2 の冷熱実験における熱回収率は 57.0%となった。つまり長期蓄熱においても温蓄熱・冷蓄熱共に熱回収率は約 60%の値を得ることができた。

#### 3.3 水質分析結果

帯水層熱利用による地下水の性状への影響を把握するために蓄熱実験の前後に地下水を採取して分析試験を行った。1996 年の実験開始から 1999 年の 11 月まで 8 回にわたって試験を行ったが、表 4 に示される通り、その間ほとんど変化していないことがわかった。

表 4 水質分析結果

| 項目        | 単位                            | 検査日時      |            | 分析方法           |           |
|-----------|-------------------------------|-----------|------------|----------------|-----------|
|           |                               | 1996.1.17 | 1999.11.15 |                |           |
| 水素イオン濃度   | PH                            | 7.3       | 7.4        | JIS K0102 50.2 |           |
| 導電率       | EC                            | [mS/m]    | 45.5       | 47.5           | 同上 51.2   |
| カルシウムイオン  | Ca <sup>2+</sup>              | [mg/L]    | 34.4       | 32.3           | 同上 48.2   |
| マグネシウムイオン | Mg <sup>2+</sup>              | [mg/L]    | 16.1       | 15.3           | 同上 49.2   |
| ナトリウムイオン  | Na <sup>+</sup>               | [mg/L]    | 34.3       | 36.5           | 同上 35.3   |
| カリウムイオン   | K <sup>+</sup>                | [mg/L]    | 7.7        | 7.74           | 同上 41.3   |
| 塩化物イオン    | Cl <sup>-</sup>               | [mg/L]    | 12.4       | 11.7           | 同上 15.1   |
| 硫酸イオン     | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | [mg/L]    | 0.2        | 0.1            | 同上 43.2.5 |
| M-アルカリ度   | BX                            | [me/L]    | 4.6        | 4.93           | 同上 57.1   |
| 硝酸性窒素     | NO <sub>3</sub> -N            | [mg/L]    | <0.01      | <0.01          | 同上 12.1   |
| アンモニア性窒素  | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | [mg/L]    | 4.3        | 4.43           | 同上 13     |
| 第一鉄       | Fe <sup>2+</sup>              | [mg/L]    | 12.2       | 13.6           | 同上 57.2   |
| 全鉄        | T-Fe                          | [mg/L]    | 16.7       | 16.6           | 同上 57.2   |
| 建酸        | SiO <sub>2</sub>              | [mg/L]    | 55.3       | 53.8           | 同上 44.2   |
| 溶存酸素      | DO                            | [mg/L]    | 0.4        | 2.6            | 同上 32     |
| 溶解性マンガ    | D-Mn                          | [mg/L]    | 0.4        | 0.4            | 同上 56.2   |

#### 4. 帯水層熱利用を導入した複合型エネルギーシステムの解析と評価

##### 4.1 複合型エネルギーシステムの考え方

本研究でめざす複合型エネルギーシステムは、以下の項目を前提としている。

- ①自然エネルギーおよび未利用エネルギーの徹底活用
- ②蓄熱サイクルの導入
- ③集住化、広域化による集積的エネルギー利用
- ④各種建築物における省エネルギーの積極的推進
- ⑤周囲環境への影響の低減化

このうち、特に季時別の再生可能エネルギーの賦存量とエネルギー需要量の差を解消するための蓄熱方式として、有効と考えられる帯水層熱利用を取り上げ、対象建築物の暖冷房に利用することによる省エネルギー性を明らかにし、このシステムの導入可能性についての検討を行った。

##### 4.2 評価シミュレータの概要

###### 4.2.1 シミュレータの全体構成

各種建物用途に対して、帯水層熱利用を導入した際の省エネルギー性を評価するための解析プログラムを作成した。この解析プログラムにより帯水層の直接利用、ヒートポンプ利用、太陽熱利用、都市排熱利用等の様々なシステムの省エネルギー性の評価が可能である。対象とする各種建物用途は、事務所、集合住宅、店舗、宿泊、公共文化、病院、学校等である。図 4 に本解析プログラムの全体構成を示す。まず入力部では建物用途、建物規模の設定を行い、そしてその建物規模における暖冷房需要を求めるとともに、地盤側の条件として帯水層厚さ、井戸間隔等の設定を行う。地盤蓄熱特性計算ブロックでは、建物側

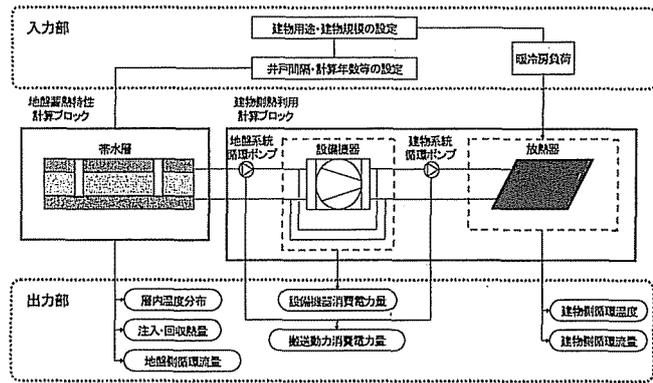


図 4 複合型エネルギーシステム解析プログラムの全体構成

の暖冷房需要に合わせて必要な温冷熱を帯水層より回収し、または暖冷房によって生じる温冷排熱を蓄熱することによる地盤内の熱移動の計算を行う。本研究で用いた三次元直交座標系の熱収支式を以下に示す<sup>3)</sup>。

$$c\rho_a \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - c\rho_w \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad 1)$$

$$u = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad 2)$$

$T$ : 温度[°C],  $t$ : 時間[s],  $x$ :  $x$ 方向距離[m],  $y$ :  $y$ 方向距離[m],  $u$ :  $x$ 方向地下水流速[m/s],  $v$ :  $y$ 方向地下水流速[m/s],  $\lambda_a$ : 土壌の熱伝導率[W/(m·°C)],  $c\rho_w$ : 土壌の体積比熱[J/(m<sup>3</sup>·°C)],  $c\rho_a$ : 水の体積比熱[J/(m<sup>3</sup>·°C)]

ただし帯水層内は鉛直方向に均質であると仮定し、帯水層内における自然地下水流および注入・回収により発生する地下水流動に関しては、水平方向の二次元問題として近似した。また地下水流動に関してはダルシー則(式 2)を適用し、帯水層および周囲地盤はいずれも水平方向に等方均質であると仮定している。また水位ポテンシャルの非定常性は考慮していない。境界は断熱境界とし、水平方向は井戸から 40m、鉛直方向は帯水層から 20m に設定している。また調査結果に基づき、各物性値を設定し、自然地下水流はないものとした。そして建物側熱利用計算ブロックでは、帯水層から回収された地下水の温度レベルが建物側の利用温度に十分に達している場合には、直接暖冷房に利用し、利用温度に対して地下水の温度レベルが不十分な時には帯水層から回収した地下水をヒートポンプ等の省エネルギー機器の熱源として利用するが、その際の土壌側および建物側への送水温度、蓄熱

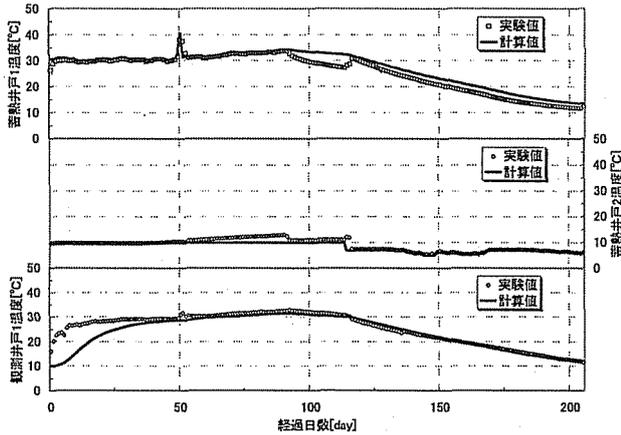


図5 実測値と計算値の比較

量、回収熱量，それに伴う機器の消費電力量等の計算を行う．このシステムにおける搬送動力は，配管および機器等の損失水頭を合計し，以下の式により算出した<sup>4) -8)</sup>．

$$E_p = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_g \cdot \Delta H \cdot L}{\eta_p \cdot \eta_m} \quad 3)$$

$E_p$ ：搬送動力[W]， $\rho$ ：水の密度[kg/m<sup>3</sup>]， $g$ ：重力加速度[m/s<sup>2</sup>]， $Q_g$ ：土壌側循環流量[m<sup>3</sup>/s]， $\Delta H$ ：単位配管長さ当たりの摩擦損失水頭[mH<sub>2</sub>O/m]， $L$ ：配管長さ[m]， $\eta_p$ ：ポンプ効率[-]， $\eta_m$ ：電動機効率[-]

#### 4.2.2 長期蓄熱の実測値と計算値の比較

作成したシミュレータの妥当性を検討するために，実験結果と計算値の比較を行った．比較に用いた実験結果は1995年に札幌市厚別区に建設した帯水層熱利用実験施設(図1)にて1995/12/18から1996/8/3まで行った長期蓄熱実験1の第1サイクルのものであり，計算条件は表3に示した運転条件及び調査結果に基づいており，自然地盤温度は10°C，注入温度は温水が30°C，冷水が5°C，各運転期間ともに3箇月とした．蓄熱井戸1を温蓄熱井戸，蓄熱井戸2を冷蓄熱井戸とし，二本井戸還元方式にて運転を行った．図5に井戸内温度の経時変化に関して長期蓄熱実験の結果と計算値の比較を示すが，比較的高い再現性が得られることが確認された．

### 5. 事務所を対象とした省エネルギー効果の解析

#### 5.1 計算条件

札幌の事務所を対象としてヒートポンプを用いた複合型システムを導入した際の省エネルギー性の評価を行った．図6に検討対象としたシステムの概要図を，表5に計算条件を示す．電力は商用電源を，給湯はガスボイラ

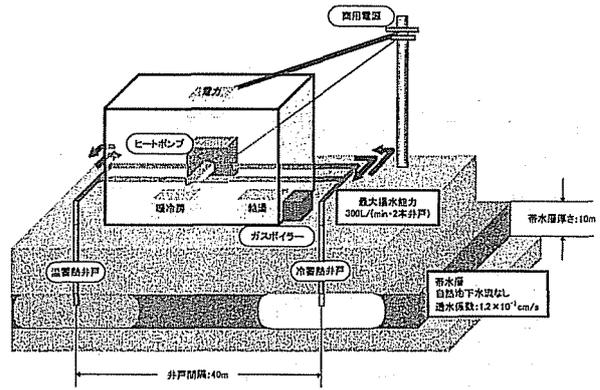


図6 検討対象としたシステムの概要図

表5 計算条件

| 建物条件 | 用途     | 事務所                         |   |
|------|--------|-----------------------------|---|
|      | 年間暖房負荷 | 263[MJ/(m <sup>2</sup> ・a)] |   |
|      | 年間冷房負荷 | 135[MJ/(m <sup>2</sup> ・a)] |   |
|      | 延床面積   | 800m <sup>2</sup> (2本井戸)    |   |
| 設備条件 | 暖冷房    | 地盤熱利用システム                   | 帯水層熱利用<br>2本井戸還元方式<br>井戸間隔 40m<br>帯水層厚さ 10m<br>自然地下水流なし<br>透水係数 1.2×10 <sup>-3</sup> cm/s |
|      |        | ヒートポンプ                      | 凝縮器定格出力 98.9kW<br>蒸発器定格出力 77.5kW  |
|      | 比較システム | ガス冷温水機                      | 暖房時COP 0.8<br>冷房時COP 1.0  |
|      | 給湯     | ガスボイラー                      | ボイラー効率 0.8  |
| 電力   | 商用電源   | 受電端効率 0.351                 |   |
|      |        | 搬送系                         | 搬送動力  |

一を，暖冷房は地盤熱の直接利用及びヒートポンプの熱源利用により賄うものとした．暖冷房負荷は総エネルギー需要の25.4%を占めている．また帯水層熱利用は大規模建築物への導入が想定されるが，図1の実験施設における揚水試験結果<sup>9)</sup>に基づき，井戸一本あたりの最大流量を300L/min，対象建築物の延べ床面積は800m<sup>2</sup>に設定した．また注入・回収井戸の距離は40m，帯水層厚さは10mに設定した．土壌側および建物側の運転方法には，定流量(以下CWV)方式および変流量(以下VWV)方式を導入した．CWV方式は熱利用時および熱回収時における循環流量が一定とした運転方式であり，VWV方式は，熱利用および熱回収における熱媒の送り・返り温度差を一定として，それに合わせて流量を変化させる運転方式である．また冬期の暖房運転は地下水をヒートポンプの熱源として利用し，夏期の冷房運転は帯水層冷熱を直接利用する条件とした．また従来型システムの暖冷房負荷はガス冷温水機により賄うものとし，暖房時のCOPは0.8，冷房時のCOPは1.0とした<sup>10)</sup>．

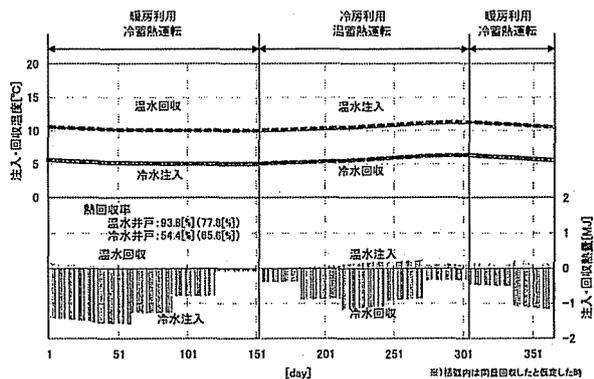


図7 注入・回収温度および熱量の経時変化 (VVW方式:5年目)

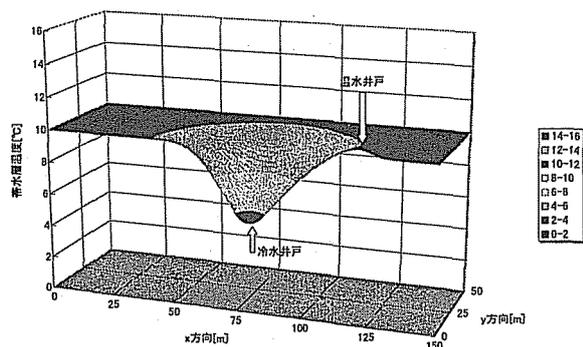


図8 帯水層内温度分布 (VVW方式:5年目)

表6 各運転パターンの暖房時のヒートポンプ成績係数

| 5年目         | 部分負荷運転 |      | 台数制御運転 |      |
|-------------|--------|------|--------|------|
|             | COP    | SCOP | COP    | SCOP |
| CWV (標準HP)  | 3.7    | 3.0  | 4.4    | 3.4  |
| VWV (標準HP)  | 4.0    | 3.7  | 4.6    | 4.3  |
| VVW (高効率HP) | 6.0    | 5.4  | 7.0    | 6.2  |

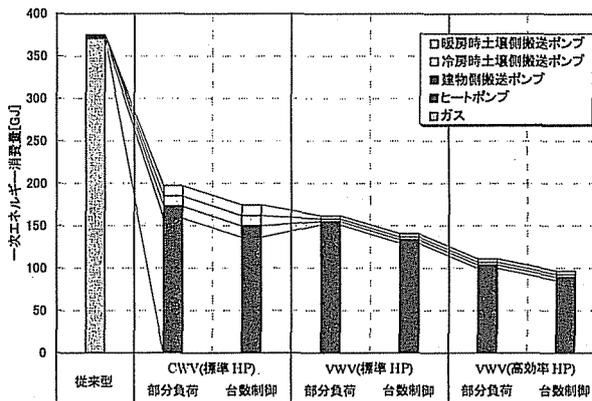


図9 各運転パターンにおける暖冷房一次エネルギー消費量の比較

## 5.2 計算結果

### ①注入、回収温度および熱量

図7に運転5年目の注入・回収温度および熱量の経時変化を示す。温水回収温度は年間を通して約10°C前後であり、冷水回収温度は年間を通して5~7°Cとなった。年間を通じて温水、冷水とも自然地盤温度に近い温度レベルでの運転が行われていることがわかる。

### ②土壌温度分布

図8に5年目の運転終了後の土壌温度分布を示す。年間の暖房需要および冷房需要の比が1:0.51であるため、地盤には暖房時の冷排熱が残存する結果となった。冷水井戸周囲10mの層内平均温度は1年目では8.0°C、5年目では6.6°Cであり、この条件下では補助設備なしでも十分に冷房が可能である。

### ③省エネルギー性

表6に各流量方式およびヒートポンプの部分負荷、台数制御運転を行った場合のCOP

およびSCOPを示す。CWV方式の循環流量は300L/minとした。VVW方式においてSCOPは高い結果を示し、高効率ヒートポンプの台数制御を行ったときのCOPは7.0、SCOPは6.2となった。またダイレクトクーリング時のSCOPは29.3に達した。図9に従来型と比較した場合の暖冷房に関する各運転パターンにおける一次エネルギー消費量を示す。VVW方式を行い、高効率ヒートポンプの台数制御運転を行ったときの一次エネルギー削減率は74.1%となった。また給湯、照明他を加えた総エネルギー需要に関して、従来型、コージェネレーション型、複合型(帯水層熱利用+ヒートポンプ)における一次エネルギー消費量の比較を図10に示す。従来方式に対する一次エネルギー削減率はコージェネレーション型が7.8%、複合型が19.0%となりコージェネレーション型と比較しても有効なシステムであることが確認された。

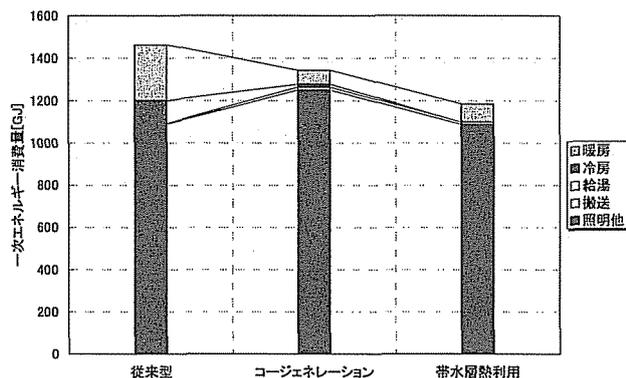


図 10 各システムにおける年間の総一次エネルギー消費量

## 6.まとめ

1)札幌市厚別区に帯水層熱利用実験施設を建設し、4年3箇月にわたる蓄熱実験を行った。その結果、日サイクルの実験では、暖房(30-50℃)および冷房(5℃)に直接利用可能な温度条件において、84~90%の高い熱回収率を達成し、エクセルギー回収率も62~80%の範囲となり、質的な観点からみても省エネルギー効果が高いことがわかった。またシステム成績係数は4.6~26.6となった。

2)ヒートポンプ・冷凍機の熱源、導入外気の予熱・予冷などへの適用を考慮した季節間サイクルの蓄熱実験を行った結果、温熱、冷熱貯蔵のいずれの運転においても熱回収率は約60%になった。

3)各種建物用途に対して、帯水層熱利用を導入した際の省エネルギー性を評価するためのシミュレータを作成した。長期蓄熱実験における結果との比較を行った結果、比較的高い再現性が得られることがわかった。

4)札幌の事務所を対象として、ヒートポンプを用いた帯水層熱利用システムの解析を行った。高効率ヒートポンプの台数制御を考慮した場合の暖房期間における成績係数、システム成績係数は、それぞれ7.0, 6.2であった。また、冷房期間におけるダイレクトクーリングのシステム成績係数は29.3に達した。

5)従来方式と比較した場合の暖冷房の一次エネルギー削減率は74.1%であった。また給湯、照明他を含めた総エネルギー需要に関する一次エネルギー削減率は19.0%となり、コ

ージェネレーション方式と比較しても、有効なシステムであることを示した。

【謝辞】本研究の一部は、科学技術振興事業団の戦略的基礎研究推進事業における“環境低負荷型の社会システム”研究領域[研究総括：茅陽一教授(慶応義塾大学)]の公募研究“自立型都市をめざした都市代謝システムの開発”[研究代表者：柏木孝夫教授(東京農工大学)]によった。

【参考文献】(1)落藤 澄, 中村真人ら: 帯水層の蓄熱効果に関する長期測定とその考察, 空気調和・衛生工学会論文集, 50 (1992-10), pp.53~61 (2)永坂茂之, 落藤 澄ら: 帯水層による短期・長期蓄熱とその応用 (第1~7報), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1998~1999) (3)落藤 澄, 中村真人ら: 二本井戸方式による地下帯水層の長期蓄熱特性に関する実証試験およびシミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1997-8), pp.669~672 (4)安孫子 雅史, 落藤 澄ら: 土壌熱を利用した戸建て住宅の暖冷房方式に関する実験と解析, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (1999-9), pp.725~728 (5)空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧, 第12版第6編 (6)三菱工業株式会社: プレート式熱交換器設計仕様書 (7)Stephen P. Kavanaugh, Kevin Rafferty: GROUND-SOURCE HEAT PUMPS: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings (8)空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧, 第12版第2編 (9)基礎地盤コンサルタンツ株式会社: 広域熱供給システムの都市施設への有効利用調査業務報告書, (1998-1) (10)空気調和・衛生工学会: 都市ガスによるコージェネレーション評価プログラム