

■ 技術報告 ■

地中蓄熱技術

Underground Heat Storage Techniques

安江 進*

Susumu Yasue

1. はじめに

石油危機を境に、代替エネルギー、省エネルギーの技術開発が盛んとなった。その一つに太陽エネルギーがある。石油に将来代るエネルギー源としては原子力があるがこれは大規模な地域を対象とした電力供給システムであり、また廃棄物の処理など未解決の問題もあり、安全なローカルエネルギーとしては利用できない。そこで、石油に代るローカルなエネルギー源として、太陽エネルギーの開発が石油危機以後サンシャイン計画を通して盛んに行われた。しかし、現在石油危機は遠のき、その価格も下落しており、イニシャルコストがかさみ、ランニングコストをとってもメンテナンスコストを含めると在来システムと余り変らないソーラーシステムは経済的なメリットが少なく、普及にゆきづまりを見せている。

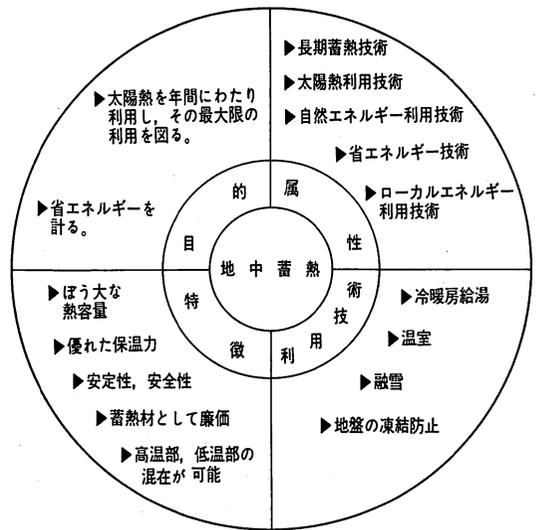
しかしながら、石油は限られた資源であり、燃料として使用するのは余りにも不適當である。太陽エネルギーの利用もこれで終焉するのではなく、地道ではあるが石油に代るローカルなエネルギーとして今後共発展してゆくものと考えて、ソーラーシステムの中で、季節蓄熱は年間にわたって太陽熱を利用することができ、太陽熱の欠点である稀薄なエネルギーをカバーするために、地中の莫大な熱容量を用いて数ヶ月間にわたり、太陽熱を地中に蓄え暖房等に利用する技術である。また、太陽熱を用いず例えばゴミ焼却場等ほかの廃熱を用いてもよく、必ずしも太陽熱の蓄熱にこだわる必要もない。小規模な集合住宅、病院、工場等のローカルエネルギーシステム（冷暖房システム）として今後利用される可能性は十分にあると考える。

2. 地中蓄熱の特徴

地中蓄熱の特徴は次の通りである。

- (1) 地中の土壌をそのまま用いるため、蓄熱材にはほとんど費用を要しない。
- (2) 地中を利用するため、地上のスペースを圧迫しない。
- (3) 地中の熱拡散はゆっくりとしているため、長期の蓄熱が可能となる。
- (4) 蓄熱部分の周りの土は、優れた保温材としての役目を果たす。
- (5) 大地はほぼ無限であり、大容量の蓄熱が可能となる。これら、地中蓄熱の特徴をまとめると表1のようになる。

表1 地中蓄熱の特性



3. 土の熱的特性

土は固相、液相、気相から形成されている。固相は石英、けい酸アルミナ、有機質等から成り、液相は水、気相は空気より成り立っている。石英、けい酸アルミナの比熱は0.2kcal/kg°C前後であるが、これに対して、有機質は0.5前後、水は1.0であり、したがって有機質分が多い程、また水分が多い程、土の比熱は大きくなる。一方、土の固相部分の比熱はその種類にかかわらず2,700kg/ m³程度ではほぼ一定であるため、液相、気相

* ㈱大林組 技術研究所環境研究室

〒204 東京都清瀬市下清戸4-640

を含んだ土の単位容積あたりの熱容量は 300~1,200 kcal/m³°Cとなり、熱容量の大きい有機土、ローム、泥炭は水に負けない大きな熱容量を有している。

土の熱伝導率はコンクリートの1/2程度であり、土を蓄熱材として利用する場合、熱が拡散しにくく、長期にわたる蓄熱が可能となる。土はまた熱伝導率が小さいため保温材としても機能する。例えば、コイルによる地中蓄熱の場合、地中に埋設したコイルに温水を循環させて地中に蓄熱する。すなわち、熱はコイルの管壁を通じて周囲の土中に蓄えられる。蓄えられた熱は更にその周りを取り囲む大地の保温効果によって長期にわたって地中に蓄えられる。必要に応じて管内に冷水を通すことにより、蓄えられた熱を随時取り出すことも可能である。もちろんこの際、土とコイルとの熱交換を円滑にするためコイルを多数埋設することにより熱交換面積を十分確保する必要がある。

このようにして熱の出し入れの問題は解決されるので、熱伝導率が小さく、熱容量が大きく、化学的に安定し、毒性もなく、またその土地の土を利用できるため蓄熱材としての費用もかからない大地は、蓄熱および保温に適した材料といえる。

4. 地中蓄熱方式

地中蓄熱は短期、中期、長期に利用することが可能である。特に、中期、長期蓄熱に関してはこれ以外に潜熱蓄熱があるが、安全性、耐久性、コストの面から考えた場合、現在の時点では、地中蓄熱の方が有利と言える。地中蓄熱には次の方式がある。

- (1) 地下水槽方式
- (2) 地中水平コイル方式
- (3) 地中垂直コイル方式
- (4) 地下帯水層方式
- (5) その他

各方式の特徴について、以下詳しく述べることにする。

4.1 地下水槽方式

建物直下または屋外の地中に大きな水槽をつくり、温冷熱を長期間蓄熱し、冷暖房給湯に利用する方式である。地下水槽の周壁はコンクリート製で内側に断熱防水を施すのが一般的であるが、断熱をかねて軽量コンクリート板が使用されている場合もある。蓄熱温度は例えば暖房の場合だと、50~90°Cとできる限り高くとり水槽の容積を極力小さくする必要がある。

特徴 (1)水を蓄熱媒体として用いるため、熱の出し入れが容易である。

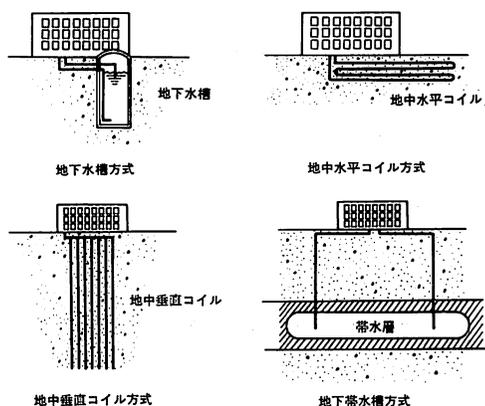


図-1 地中蓄熱方式の種類

(2)断熱、防水を十分に行えば、地下水、地中温の影響を受けにくい。

4.2 地中水平コイル方式

寒冷地におけるヒートポンプの暖房用熱源、太陽熱利用グリーンハウスにおける蓄熱システムとして欧米を中心にかなりの実施例がある。水平コイルの埋設位置は5m深以下と浅いために地中に太陽熱を蓄熱する場合は地表面からの放熱が大きく建物直下に埋設する場合が多い。コイルの材質としては、ポリエチレン系のプラスチックが一般的に用いられている。

特徴 (1)施工が比較的容易であり、イニシャルコストも他の方式に比べ安くなる。

(2)ソーラーコレクターを用いた蓄熱を行わなくても、大地を熱源として熱回収を行うことも可能である。

(3)多段に埋設すれば蓄熱・回収を空間的にコントロールできる。つまり熱回収時においては放熱しやすい部分から回収し、以後放

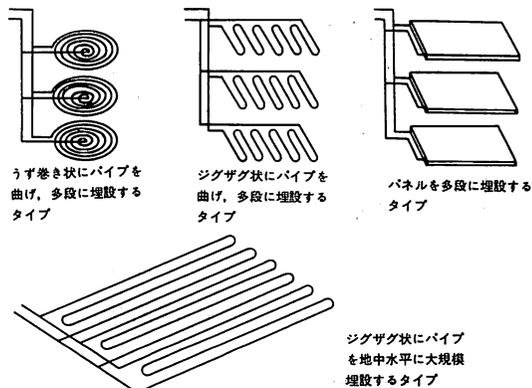


図-2 地中水平コイルの形状

熱しにくいコイルへと切り換えて回収位置を空間的に移動する。蓄熱時においては放熱しにくい地中の深い部分より蓄熱し、高温になり次第上部へと蓄熱位置を移動させる。

(4)地中コイルは水平方向に広がっているためそのまま床暖房システムとしても利用できる。

4.3 地中垂直コイル方式

大地を垂直方向に利用するため、使用する土地面積が少なく済む。地表面でのヒートロスが水平コイルの場合より少ないため、直上に建物がない場合でも設置することができる。コイルの埋設深さは数十mから数百mまでも及ぶことがある。コイルにはプラスチックパイプの他、二重管などが用いられる。

特徴 (1)施工には特殊な掘削機械を用いれば、それ程手間を要しない。

(2)掘削する地表面部分は最小限におさえられるので、狭い敷地の場合にも適用できる。

(3)地表面からのヒートロスが少ない。

(4)故障時の補修も容易である。

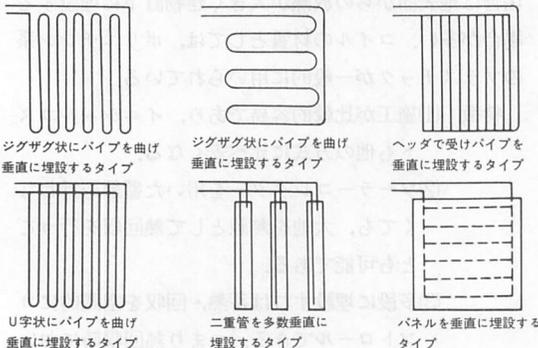


図-3 地中垂直コイルの形状

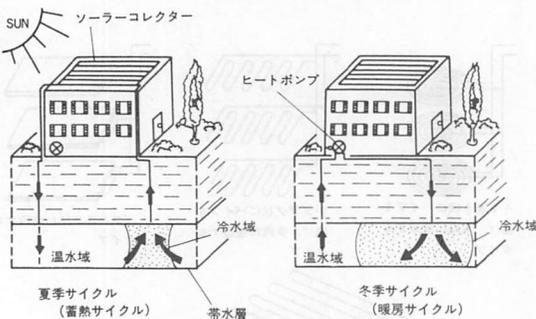


図-4 帯水層における冷温水蓄熱のしくみ

4.4 地下帯水層方式

地下帯水層（砂礫から成る地層で、層の上下に不透

水層があり、層内の砂礫の間には地下水が蓄えられている。）を長期蓄熱の媒体として利用する方式である。

- 特徴 (1)大規模なシステムでも2本の井戸で済み、イニシャルコストが安く済む。
- (2)帯水層砕石内の水に蓄熱されるから、ヒートロスが地下帯水層に比べて非常に小さい。
- (3)帯水層周りの大地を保温材として利用できる。

5. 地中蓄熱に適した建物

地中蓄熱システムは地中蓄熱槽の容積の取り方により短期蓄熱から中・長期蓄熱まで可能となる。地中蓄熱の実際の利用分野としては次のものがある。

(1) 寒冷地のヒートポンプ熱源システム

寒冷地では空冷式のヒートポンプが冬季において高効率で運転できない。地中蓄熱システムと組み合わせた水冷式ヒートポンプシステムを用いれば、空冷式に比べCOPを1.0程度改善することができる。また、寒冷地でなくとも水冷式ヒートポンプのCOPを高く保ちたい場合には利用できる。

(2) 蓄熱槽のほか床パネルヒーティングも兼ねた蓄熱システム

例えば、微温暖房でよい工場、体育館（従来からの天井高温輻射暖房の代りとなり、太陽熱・廃熱を利用する場合には蓄熱タンクが不要となる。）、床パネルヒーティングが要求される建物などに利用できる。

(3) 施設園芸用温室の暖房システム

(4) 地盤の凍結防止のためのヒートフェンス

(5) 融雪

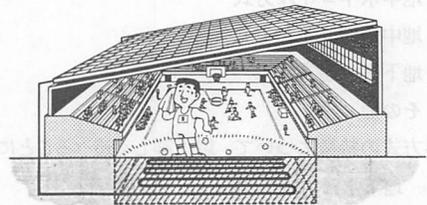


図-5 (さし絵)

工場・体育館など寒冷地に立地する大屋根構造物の融雪の熱源として利用できる。すなわち、夏季屋根に散水した温水を地中に蓄え、この温水を冬季融雪に利用するものである。

6. 国内外実施例

大林組は、10年程前よりこの分野の研究に着手し、

技研館超省エネルギービルにおいてその実用化に成功した。これは、地中水平コイルを使った暖房用のシステムであるが、地中コイルによるシステムとしては国内において最も規模の大きなものである。帯水層を用いた例は後述するが北海道リハビリセンターを上げることができる。帯水層は、層内の流れがかなり緩慢でないと利用することができないため、どこでも利用できるものではない。平野部の多い北海道に使用できる帯水層が多く分布していると言われている。この他にも、実験レベルにおいていろいろな研究がなされているが、本文では紙面の関係上割愛させていただいた。

国外においては、スウェーデン（原子力発電の建設を国策として禁止し、ローカルエネルギーとしての太陽エネルギーの利用に力をそそいでいる。）を中心として、地中蓄熱の研究が盛んに行われている。こうした事例の中から、最も将来期待されるシステムについて2例の事例を上げ解説した。地中蓄熱システムは、石油の安い現時点ではなかなか経済的に成立し難いシステムであるが、長期的に観ればクリーンなローカルエネルギーシステムとして、寒冷地における集合住宅、低層事務所、体育館等の暖房に利用されていくものと信じている。

6.1 大林組技研館超省エネルギービル

本ビルでは、太陽熱冷暖房を行っているが、秋季過剰となる太陽熱の集熱分については、建物本部に埋設した地中コイルを介して地中に蓄え、冬季この熱を暖房に利用することによってソーラーコレクターの利用効率の向上を図っている。地中に蓄えられた熱は直接地下階居室の床を暖めパネルヒーティングに利用される他、熱回収ヒートポンプの低温熱源としても利用される。（図-6～図-10 参照のこと。）

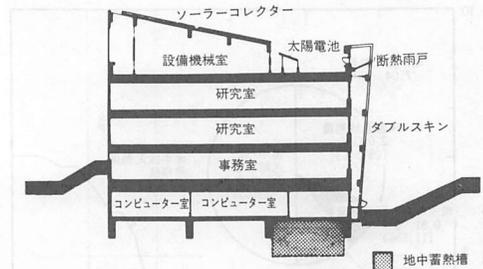


図-7 地中コイル埋設位置（断面図）

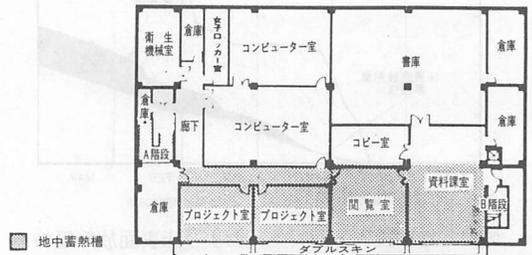


図-8 地中コイル埋設位置（平面図，地下1階）

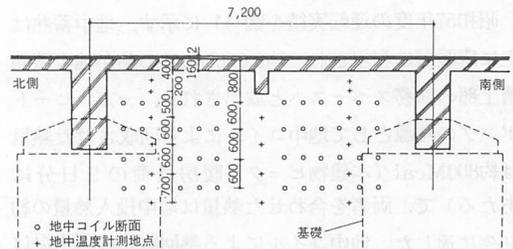


図-9 地中コイル埋設部分詳細（南北断面図）

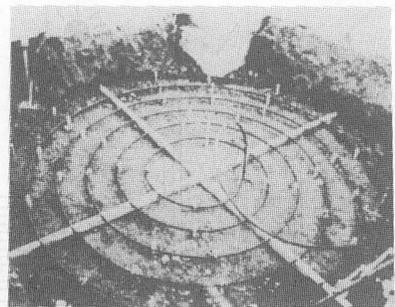


図-10 地中コイル埋設工事状況

地中コイルは高密度架橋ポリエチレンパイプ(25φ)で、150mのパイプを渦巻状にして各スパンごとに4段埋設した。地中コイルの総長は約1,200m、床スラブより地中コイル最下段までの深さは2.4m、土量は4スパンで約500³m（熱容量約4×10⁵kcal/℃）である。本建物地下の土質は関東ロームであり、地中コイルはその層内に埋設されている。

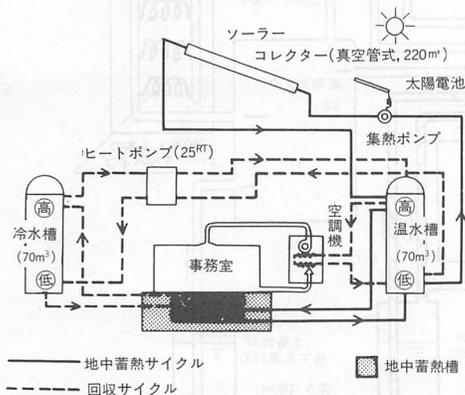


図-6 地中蓄熱システムダイアグラム

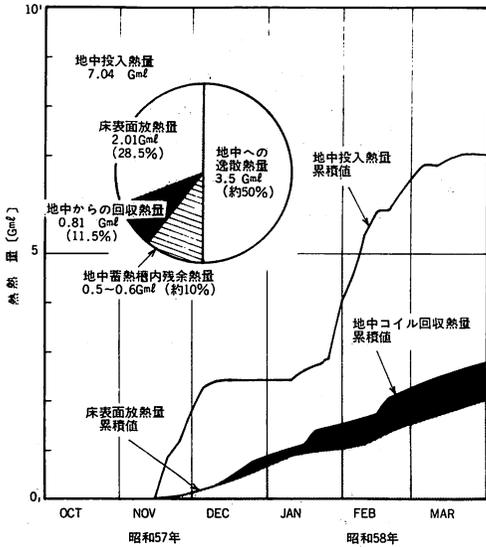


図-11 地中投入・回収熱量および床表面放熱量の累積値変化

昭和57年度の運転実績を図-11 に示す。地中蓄熱は主に床暖房に利用され、約2,000Mcalの熱が地中蓄熱槽上部の執務スペースへと放出された。一方、ヒートポンプの熱源として地中コイルにより回収された熱量は約800Mcal（本建物ピーク日暖房負荷の9日分にあたる）で、両者を合わせた熱量は地中投入熱量の約40%に達した。地中コイルによる熱回収時の返水温は常に15℃以上に保たれており、ヒートポンプ熱源とし

てはかなり高温であって、空気熱源と比べCOPの点で大巾に有利となっている。また、地中蓄熱は、冬季日射の少ない日が続いた場合のヒートポンプ暖房用補助熱源として、その機能を十分に果していることが確認された。

6.2 北海道リハビリ省エネシステム

北海道リハビリ（札幌郡広島町字西の里506）では、北海道という寒い土地柄に加え、クリーニングのため50~60℃の湯を大量に要するため、通産省の補助を受けソーラーシステム、廃タイヤボイラおよび蓄熱井戸（帯水層による地中蓄熱システム）を併用した省エネルギーシステムを完成し、昭和57年より稼働させている。図-12 には、システムダイアグラムを、図-13 には建物の配置図を示す。

春から秋にかけて生ずる余熱を蓄熱槽よりオーバーフローさせ、3号井戸から自然流下により地下に注入している。昭和57年5月から10月下旬にかけて平均水温50℃の温水5,000㎡を注入し、これを2ヶ月間放置し、12月下旬より3号井戸より揚水したところ、汲み上げ初期温度は41℃、800㎡揚水した昭和58年1月20日の時点でも39℃と高く、帯水層は必要とされる蓄熱能力を十分有していることが証明された。

6.3 Sunclay Project

スウェーデン、ゲーテボルグにて稼働中のシステムで Andersson & Hurtwark 設計事務所により設計されたものである。

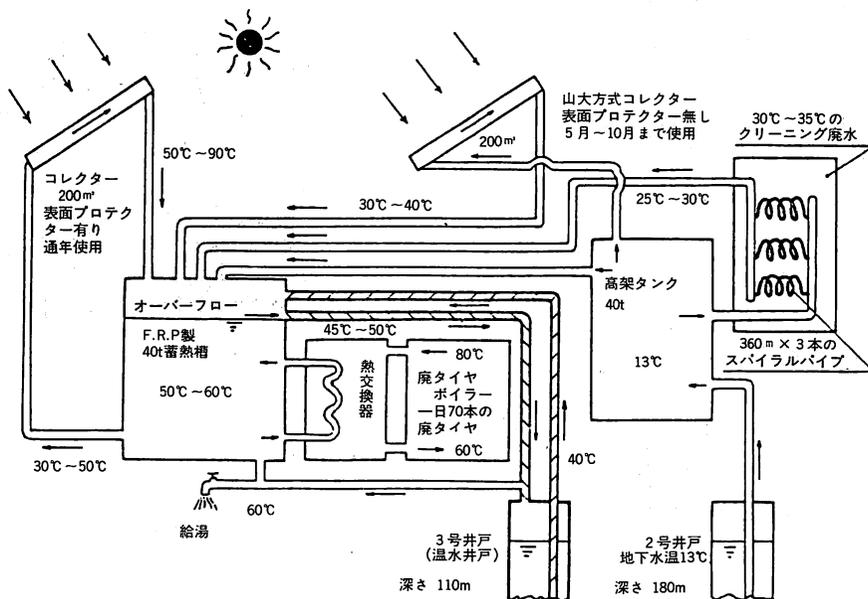


図-12 システムダイアグラム（北海道リハビリ省エネシステム）

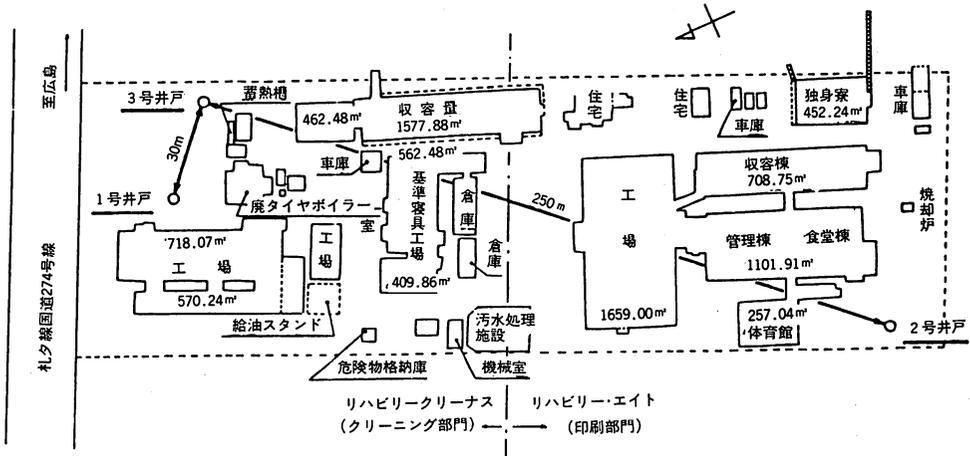


図-13 建物および還元井の配置図

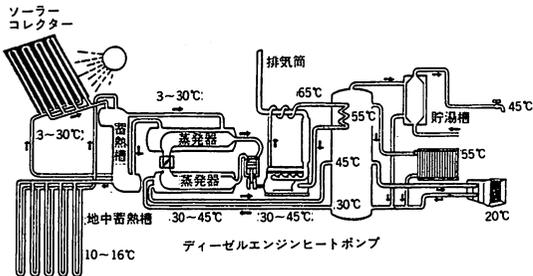


図-14 Sunclay Project のシステムダイアグラム

図-14に Sunclay Project のシステムダイアグラムを示す。学校、劇場、スポーツレストランなど総延床面積15,000㎡の建物の暖房、給湯負荷の100%をまかなうもので、ソーラーシステムはカバーなしのブラックアルミニウム製であり熱媒は凍結防止のためカルシウムクロライドの水溶液が使用されている。集熱面積は15,000㎡、方位角真南、傾斜角度14°で年平均集熱効率は50%（設計値）である。地中コイルはポリエチレン製でU字型にして地下深35m、総長20,000m、対象蓄熱容量88,000㎡である。蓄熱媒体は粘土、地下水位は地表より0.5m深のところにあり、水速はほぼゼロである。ヒートポンプにはディーゼルエンジン駆動ヒートポンプ（水-水式）200kW、4台を使用している。蒸発器側平均水温10°Cの場合COPは1.9である。

図-15に年間のヒートバランスを示す。設計に当っては当設計事務所が開発したシミュレーションプログラムが使用されている。このプログラムの試算結果から地中コイル内の熱媒温度は2月（熱回収時）において6~11°Cの間を、8月（蓄熱時）において15~27°Cの間を変動すること、地中コイルの熱回収能力はピーク負

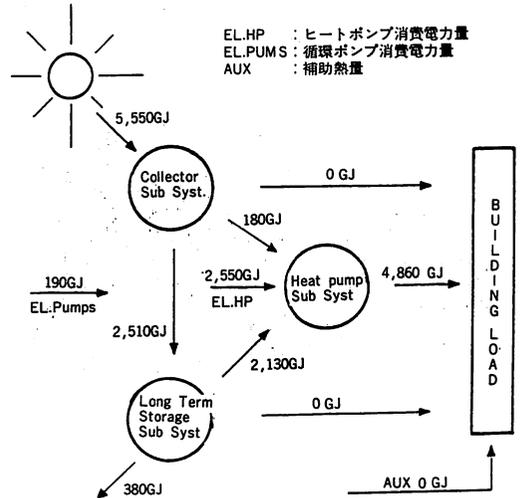


図-15 Sunclay Project の年間システムヒートバランス

荷時に1.7W/mであることなどを報告している。

また、実際の運転実績から、ディーゼルエンジンの比例制御が旨く作動すること、コレクター上部の風速は設計条件より小さく設計条件以上の集熱が可能となったこと、実負荷は設計値より20%低く石油の節約もその分減少したこと、ディーゼルエンジンの排気温は予想以上に高く、設計値より5%増の熱回収量が期待できること、配管からのヒートロスに設計値を上回りその分利用できる集熱量が減少したこと、地中コイル周りの熱伝導率は設計値より低く地中蓄熱容量、回収量共に設計値を下回ることなどが判明した。

経済性については、利用可能エネルギー量が640kWh（設計値）で単純に電力価格（11円/kWh）に換算すれば、

約700万円となる。インシャルコストは次の通りである。

地中蓄熱関連	600,000クローネ
ソーラーシステム	350,000
ヒートポンプ	600,000
その他	200,000
トータルコスト	1,750,000クローネ

ただし、40円/クローネ(当時の換算レート)で計算した。

6.4 Heliogeothermal Doublet

パリ郊外北部には、12,000km²におよぶ砂質の帯水層が広がっており、その水温は年間を通し13℃に保たれている。従ってこれを熱源としてヒートポンプにより熱回収し、暖房・給湯を行うことが考えられる。1983年 Aulnay-sons-Bois に建設された224戸からなる集合住宅に対して省エネルギー、公害防止の観点から帯水層を利用したヒートポンプ暖房・給湯システムが建設された。図-16 に建物外観を示す。

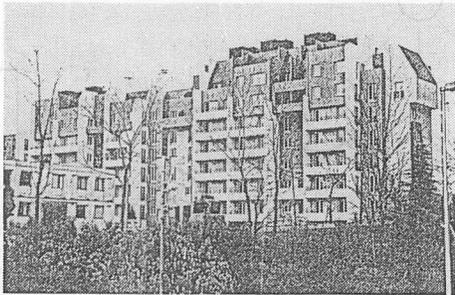


図-16 集合住宅外観

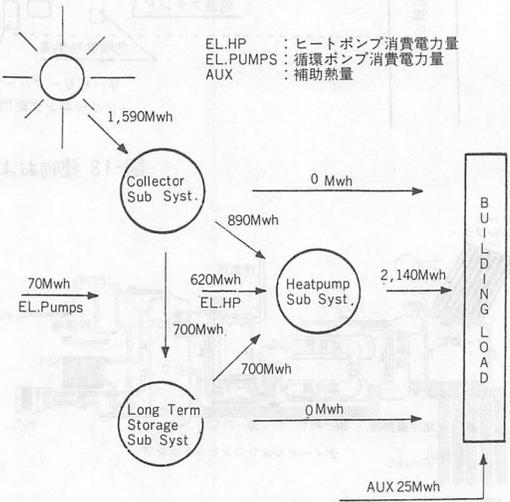


図-18 年間にわたるシステムヒートバランス (Heliogeothermal Doublet)

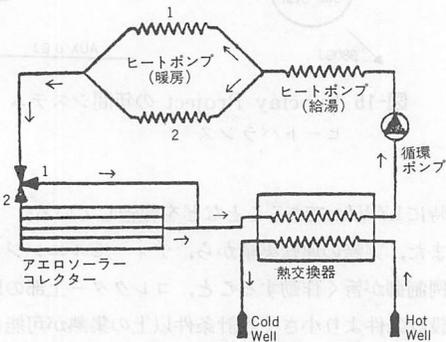


図-17 システムダイアグラム (Heliogeothermal Doublet)

図-17 にシステムダイアグラムを示す。冬季においてはソーラーコレクターと帯水層から採熱してヒートポンプによる暖房・給湯を行う。ただし、ソーラーコレクターは外気温が3℃以上の時のみ使用し、給湯水(55℃)は真夜ヒートポンプを運転することにより確保する。夏季、日中においては Cold Well から帯水

層内の水を汲み上げ、ソーラーコレクターによって4℃から14℃まで昇温し Hot Well へと戻し帯水層内に蓄熱(季節間蓄熱)する。夜間にはコレクターを用い空気から採熱してヒートポンプを運転し給湯水を確保する。帯水層の層厚は20m、地下深65~85m、地下水位15m、地下水流速 5×10^{-7} m/sで70,000m³の水が毎年熱回収のため汲み上げられる。Hot Well, Cold Well の深さは両方共に55mあり、水汲み上げのた

表2 月間のヒートバランス (Heliogeothermal Doublet)

MWh	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
OCT	98	0	7	39	142	105	142	0
NOV	112	0	78	66	252	190	252	0
DEC	77	0	178	91	340	255	349	9
JAN	74	0	182	92	341	256	353	12
FEB	74	0	145	78	291	219	295	4
MAR	110	0	92	71	268	202	268	0
APR	115	0	23	49	183	138	183	0
MAY	167	121	0	28	67	46	67	0
JUN	202	156	0	26	64	44	64	0
JUL	190	144	0	27	67	46	67	0
AUG	223	177	0	26	66	45	66	0
SEPT	150	104	0	26	64	44	64	0
TOTAL	1,592	702	705	619	2,144	1,591	2,169	25

- (1) 集熱量
- (2) 地中投入熱量
- (3) 地中回収熱量
- (4) ヒートポンプ消費電力量
- (5) ヒートポンプ出力
- (6) ヒートポンプ入力
- (7) 暖房・給湯負荷
- (8) 補助熱量

め用いられる循環ポンプの出力は10kWである。ヒートポンプは電気式(水-水式)が3台設けられている。2台は暖房用で一台の出力が298kW(蒸発器側平均水温3°C, 凝縮器側平均水温45°CでCOPが3.7), 1台は給湯用でその出力は160kW(蒸発器側平均水温5°C, 凝縮器側平均水温57°CでCOPが2.8)である。

図-18 および表2にシステムの性能を示す。ヒートポンプの年平均COPは3.45, 地中熱回収能力483kW, 帯水層内水温は年最高で15°C, 最低で5°C, 経済性については, 総負荷(設計値2,160MWh/year)の95%をヒートポンプから供給可能である。この時帯水層からの熱回収量は1,590kWhである。イニシャルコスト, 年間節約額, 償却年数は次の通りである。

帯水層(井戸, 熱交換器)	793,000フラン
アエロソーラーコレクター	208,000
ヒートポンプ	1,373,000
二次側熱供給システム	1,745,000
その他	503,000
トータルコスト	5,122,000フラン

ただし, 35円/フラン(当時の換算レート)で計算した。

各戸別のイニシャルコスト	22,900フラン
在来システムのイニシャルコスト	
を比べての増分	16,000
年間節約額	1,600
償却年数	10年

参 考 文 献

- 1) "超省エネルギービル(大林組技術研究所本館)における土中蓄熱システムの性能解析", 安江, 大林組技術研究所報, No. 28, '84
- 2) "地下帯水層における蓄熱", 梅宮, 太陽エネルギー学会誌, Vol. 9, No. 3, '83
- 3) "First year Operation with seasonal storage of 80,000m³ clay", Hultwark G., Workshop on solar assisted heat pumps with ground coupled storage, Sept., '82
- 4) "The Heliogeothermal Doublet: A Reat Scal Test Facility", P. Ivis, ESA/S/119/F

海外行事案内

・米国化学会第191回全国大会

(American Chemical Society 191st National Meeting)

<会 期> 1986年4月6日-11日

<会 場> アトランチックシティ
(ニュージャージー)

<主 催> 米国化学会

石油化学部会では, 石油や合成エネルギー, 化石エネルギーに関する多数の研究発表が予定されている。

・再生可能エネルギー資源に関する国際会議

(Renewable Energy Sources International Congress)

<会 期> 1986年5月4日-9日

<会 場> マドリッド(スペイン)

<主 催> 国際エネルギー学会ほか3団体

なお, それぞれの行事については, 詳細が分り次第改めてご案内します。