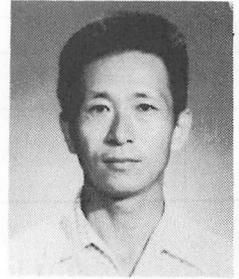


地下帯水層利用による熱エネルギーの長期備蓄について



Thermal Energy Storage in Aquifer for a long Period

梅 宮 弘 道*
横 山 孝 男**
羽 賀 恵 寿***

1. はじめに

石油不足の到来とともに、雪国に住む我々一般住民の気持は、将来の生活を考えるときに、寒々とした感じを拭いさることができない。石油ストーブに代る暖房熱源は何になるのか、交通網、流通網を今迄のレベルで維持することができるだろうか、屋根の雪おろしは…

だが、特に資源にも恵まれていない我々の環境で代替エネルギーを模索するとき、自然エネルギーの利用だけが希望の明かりとしてかすかに見えている。自然エネルギーの利用で、すでに実用化しているものの一つに、地下水の熱利用があげられる。新潟県長岡市で始められた地下水を用いた消雪道路は、たちまち全国に普及し、冬期間の交通網の確保に絶大なる威力を発揮している。

しかし、消雪パイプシステムの運転は、地下水の自然補給が最も少ない厳冬期に集中するので、地下水位の低下をきたし、その結果として地盤沈下問題を引き起こしている。当地、山形県米沢市においてもその例にもれず図-1(次頁)に示すように消雪専用井戸のある幹線道路をその目として地盤沈下が進行中である。考えてみるに、消雪パイプの地下水は、水そのものを必要とするのではなく、水の持つエネルギーが欲しいという種類のものである。

一方、自然エネルギーに目を転じてみると、夏の暑さは温熱源としては極めて希薄であるが、冬の消雪道路の熱量をまかなうのには十分な量である。逆に冬の降雪も又夏の冷房用冷熱量を賚って余りある。この半年遅れの自然エネルギーをなんとか活用する方法は無いも



図-1 米沢市市街地の地盤沈下
(米沢市地下水対策協議会資料による)

のか、誰もが一度は考える問題である。

著者らは、消雪道路、無雪屋根のエネルギーを確保するために、自然の熱エネルギーを地下帯水層にたくわえ、半年時間を遅らせてくみ上げ利用する蓄熱実験を継続中である。すなわち、図-2に示すように、A、B 2本の深井戸を掘り、冬はA井戸より地下水をくみ上げ、融雪に使用して十分冷却し、夏の冷熱源としてB井戸より注入し蓄熱する。夏は井戸の使用を逆転し、B井戸より冷水をくみ上げ、冷房用水として使用した後、太陽エネルギーで十分暖め、A井戸より注入し、冬の温

* 山形大学工学部精密工学科 助教授
** 助手
*** 技官

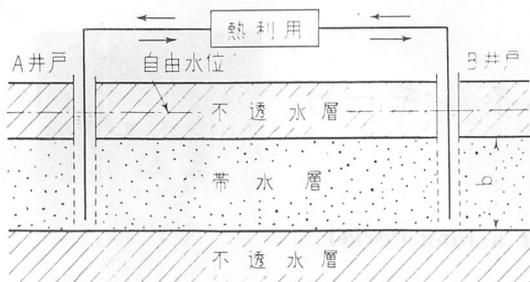


図-2 原理図

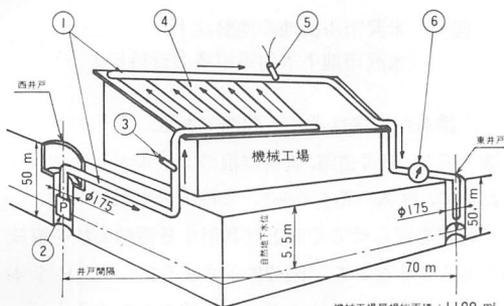
熱源としてそなえらるといった一年周期の蓄熱利用法である。

2. 地下水の熱利用

これまでの地下水の熱利用は、大容量の恒温水として主に冷却水に使用されてきた。地下水温度は、その地域の年平均温度に、ほぼ合致するのであるから、これも自然エネルギー蓄熱の一形態ではあるが、更に積極的に帯水層に蓄熱利用した例を以下に示す。

2-1 豪雪地帯の無雪屋根

豪雪地帯では、毎年家屋の雪おろしに悩まされる。特に最近、宅地の密集化が進行し、雪の捨場がなくなったからである。そこで、地下水の熱を利用し、屋根雪を融かす無雪屋根の実験を行なった結果、大変好成績をおさめ、一般家屋にも普及のきざしが見られるので、その概略を示す。システムの概要を図-3に示す。建物の両端に2本の井戸を掘り、一方の井戸を温水井、つまり暖かい水を蓄える井戸とし、他方の井戸を冷水井とする。屋根には、図-4に示すようなプラスチック製コレクタ(酢酸ビニル製)を敷きつめる。パイプ内に地下水を流し、夏は温水器、冬は雪を融かす無雪屋根



- ①塩化ビニル管 ②水中ポンプ ③コレクタ入口水温測定熱電対 ④コレクタ ⑤コレクタ出口水温測定熱電対 ⑥オーバーバル流量計

図-3 豪雪地帯の無雪屋根システム

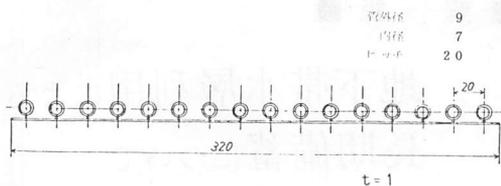


図-4 コレクタ断面図

として機能する。酢酸ビニルコレクタは、原料の酢酸ビニルにカーボンブラックを添加して押出成型した製品である。

原料自体はチューインガムとして口にされているとおりで、人畜無害である。カーボンが添加されていることから、外観は黒色でよく太陽光を吸収して熱にかえる。したがって耐光性にすぐれ寿命も長い。最大の長所は、柔軟性に富むことから長尺物を巻取ることができて輸送が容易な点である。したがって、すでに出来上っている家屋の屋根の上に設置するのに便利である。

夏は冷水井より水をくみ上げて、屋内の冷房を行なった後、屋根のコレクタに通水して温水をつくる。温水器としての能力は、40℃の温水を得るのに夏の晴天時で約700 w/㎡である。温水は、ふる水、洗たく用水などの生活用水として利用することができる。あまった大量の温水を温水井に注入し、帯水層に蓄える。

冬には、その温水をくみ上げ、屋根のコレクタに流すと屋根雪を消すことができる。降雪時の実験場屋根の状態を図-5に示す。足場となっている部分に30cmほどの積雪が見られるのに対し、コレクタを設置した部分は完全に雪が消えている。コレクタ入口温度・出口温度および流量から、1日あたりの冷熱集熱量を求め、1年間集計した結果を図-6に示す。200㎡のコレクタで5,980万kcalの冷熱を得ている。これを裏返して融雪能力に換算すると、33日間、連日、100cmの降雪(密

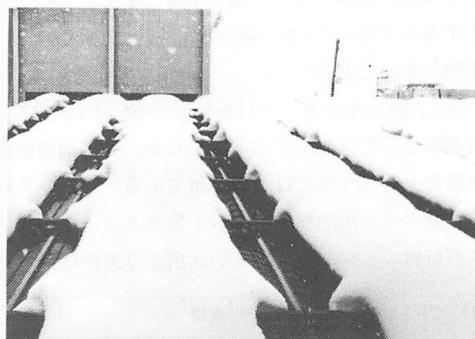


図-5 無雪屋根

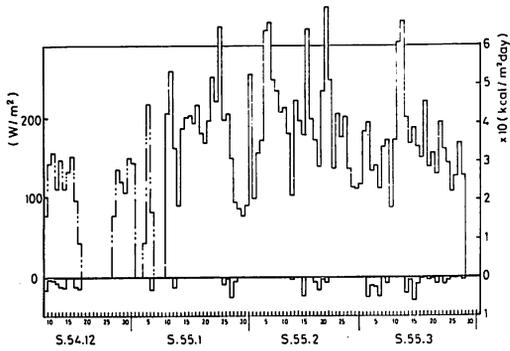


図-6 ひと冬の冷熱集熱量

度0.05 g/cm²とする)を処理したことになる。この融雪能は、どのようなドカ雪にも対抗できる数値であり、地下帯水層を熱源としたシステムが、無雪屋根として十分な機能を果たすことがわかる。

2-2 地下水による冷房

冬の冷熱を地下帯水層に貯蔵して夏の冷房にどの程度利用できるものか、実測した例を次に示す。図-7は、建物内のファンコイルに、地下水を直接流して冷房を行なった際の外気温と室温の経時変化である。気温は、13時30分に最高値33℃を示した。それに対し、室温は図印で示すように、朝26℃からはじまり、17時の最高温度28℃にいたるまで、ゆるやかに上昇しているものの、外気温よりずっと低い値を示している。13時30分、外気温度最高時における建物内と外気との温度差は6℃であった。当日の室内冷房効果は十分と判断される。

つぎに、冷房効果がどの程度持続するか見るために、夏を通した測定例を図-8に示す。従座標は、13時における外気温 θ_a と室温 θ_r の温度差 $\Delta\theta = \theta_a - \theta_r$ であ

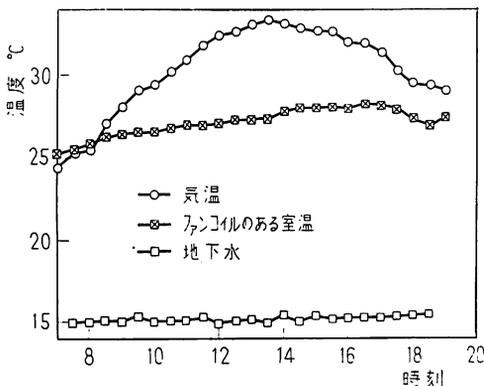


図-7 地下水による冷房効果

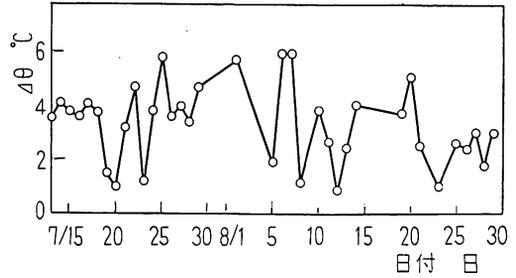


図-8 地下水による冷房効果の持続性

る。人の出入・気象条件などにより $\Delta\theta$ は大巾に変化しているが、この夏を通して云えることは(i)地下水をファンコイルに流すだけで室温を大気温度より、ほぼ4℃低く保持することができる。(ii)8月中旬以後、冷房能力に若干低下のきざしがみられるものの、冬、地下帯水層にたくわえておいた冷熱で、ひと夏の冷房をまかなうことができる。

これを熱効率の観点からながめてみると、本方法における冷房動力源は、ポンプ動力およびファンコイルのモータ動力の和にあたるが、約1kwである。夏の冷房を行うには、その先の冬に、ポンプを運転して、冷熱を集熱しなければならない。したがって、夏の冷房には、ほぼ2kwの動力を消費した。それに対して、冷房吸熱量の例を示すと図-9の太線のようになる。日射の強弱で変動するが、図に示す通り、ほぼ4万kcal/hの性能を発揮する。入力を2kwと見積り、本システムを一種の冷房サイクルと見なしたときの成績係数(C.O.P) = $\frac{\text{吸熱量}}{\text{入力}}$ に整理すると、20程度の値である。現存する冷房サイクルのC.O.Pは、最大限に見積

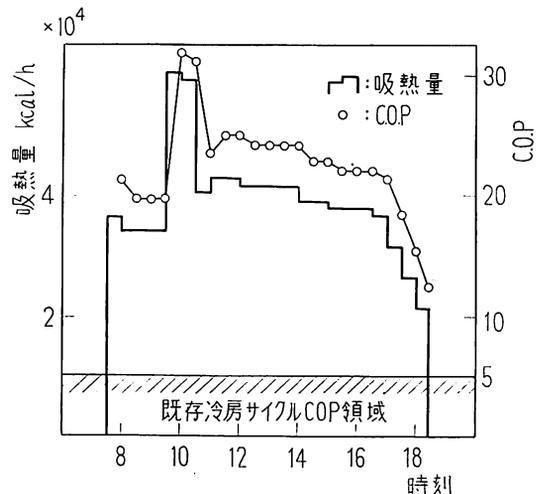


図-9 吸熱量と成績係数(COP)

ても4~5であるから、それと比較すると4~5倍の性能を発揮することになる。したがって、地下帯水層を用いた蓄熱法を、現時点で豪雪地帯に活用する場合には、冷熱の蓄熱利用が省エネルギーの観点から非常に効果的である。

3. 蓄熱効果

地下水を大きく分けると、(i)地表から粘土層等の不透水層までに存在する不圧地下水と(ii)不透水層より深部にある被圧地下水に分けられ、量的には、被圧地下水が圧倒的割合を占める。たしかに地下水も大自然の中の水の循環過程の1つであって、流動しているのであるが、その速度は不圧地下水で1m/日程度が平均的な値であり、被圧地下水では1m/年といわれている。よって深層の被圧地下帯水層を蓄熱部に選定すれば、自然流による熱の拡散損失が小さく、長期蓄熱を期待することができる。一方、本システムの実用化にあたっては、その設備費のうえからできるだけ浅い井戸を利用したいという相反した要求がある。蓄熱効果を保ちつつ、どこまで井戸を浅くすることができるか、明快な解答は得られていない。以下に、不圧帯水層の蓄熱効果と、被圧帯水層のそれを、国内の観測結果を示しながら考えてみよう。

3-1 不圧帯水層による蓄熱

a) 実験場 実験場は、米沢盆地南部にある山形大学工学部のキャンパス内に設定した。キャンパスの南西端にある機械工場を対象建家とし、工場の両端に温水井、冷水井、二本の井戸を掘った。これらの井戸の様子は、表1に示す通りである。

井戸掘さく後、それぞれの孔内で電気検層を行ない、さらに掘さく中採取した破碎コアをもとにして地質柱

表1 井戸の仕様

井戸名	原 掘		ケーシング		
	口径 mm	深度 m	口径 mm	挿入長 m	ストレーナー長 m
西井戸	250	53	175	53	22
東井戸	250	50	175	50	22

状図をつくり、図-10に示す。井戸の構造は、掘さく孔に薄肉鋼管を沈め、周囲に玉砂利を充填した極めて簡単なものである。この薄肉鋼管をケーシングと呼び、要所要所に、取水口が設けられている。取水口の形状は、穴、スリット、網目状と様様であるが、一般にこれをストレーナーと呼んでいる。両井戸は、揚水井のみならず、注入井としても使用する上で、浅い帯水層をシールする必要がある。そのために、地表から深度20mまで、ケーシング外周にセメントを注入してシールした。また、冷水井より1.43m離して温度観測用孔を50mまで掘り、図-11に示すように7組のビニール被覆熱電対(C-C)を各深度に設置した後、砂を充てんして埋めもどし、地下温度分布を観測した。

b) 冷水注入による地温の変化一昭和55年1月9日より冷水注入を開始し、同年3月30日迄継続した。この間、平均9.6℃の冷水を18,619 m³注入した。自然地下

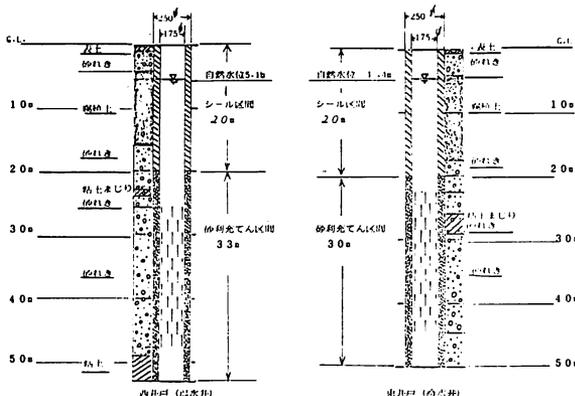


図-10 地質柱状図

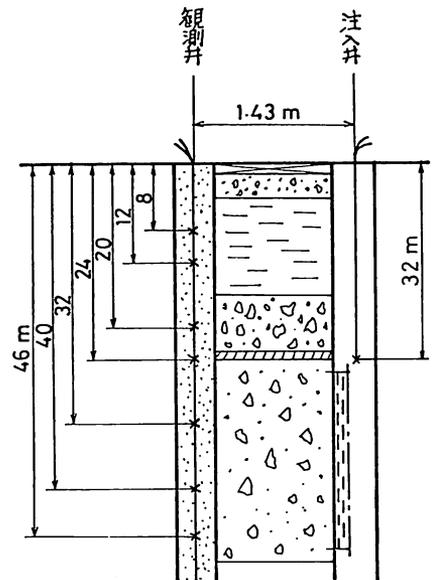


図-11 地温観測井

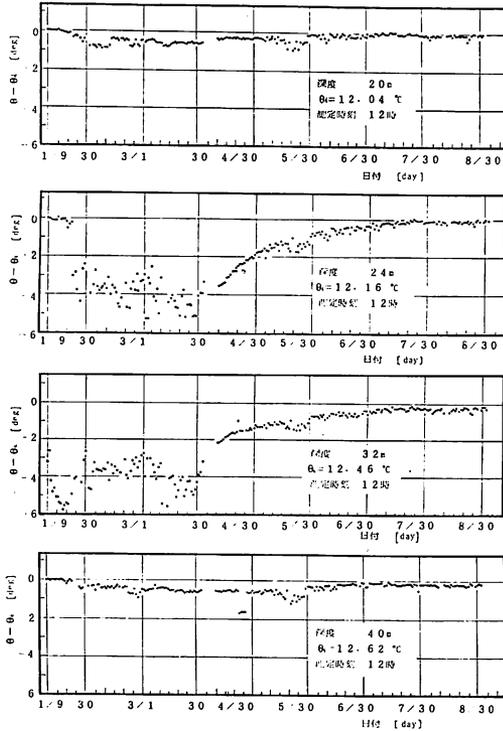


図-12 冷水注入による地温の変化

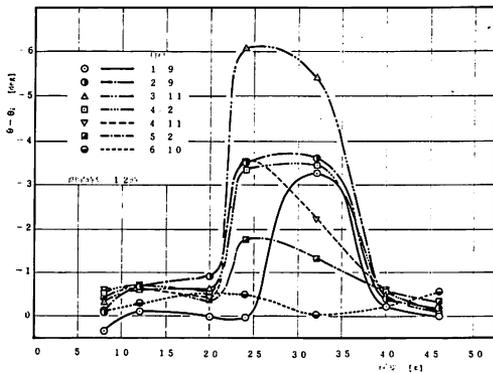


図-13 地温分布経時変化

水温度 13°C を基準として約6,000万kcalの冷熱である。4月1日より6月30日までは自然放置し、7月1日より8月30日迄、冷水をくみ上げた。その間の地温変化を図-12に示す。縦座標は、初期温度 θ_i と、任意時刻における温度 θ との温度差 $\theta - \theta_i$ である。又、同じデータを深さ方向の温度分布に書直し、図-13に示す。横座標は深度、縦座標は同じく初期状態からの温度降下を表わし、日付をパラメータとしている。図-12、13からわかるように

i) ストレーナ巾は22m 設けてあるものの、注入水は

ストレーナ全体を一様に流れるわけではなく、その一部分だけを流れている。本井戸では、深度22mから38mまでのたかだか巾16mの領域を平行に流れているものと判断される。

ii) 約6,000万kcalの冷熱が、深度約30mの帯入層に注入されたわけであるが、この程度の熱量では、地表まで、冷熱注入の影響が到達しない。

iii) 冷水注入停止後の温度場の回復は、かなり速い。冷水注入停止時の帯水層温度降下は、約 4°C であったが、3ヶ月後の6月30日には 0.4°C と $1/10$ に減衰している。

iv) 7月1日より冷水のくみ上げを開始したが、深度32mの位置で流失冷水の呼びもどし現象から、若干温度の回復速度に低下が見られる。しかし、あまりにもその値は小さく、実用上の意義は認められない。

したがって、不圧帯水層の熱利用は、蓄熱層として無理に使用するよりはむしろ恒温熱源として活用するのが妥当であろう。

3-2 被圧帯水層による蓄熱

a) 実験場——実験場は、山形盆地の西南部、国鉄蔵王駅の西200mに位置している日本地下水K.K.の社屋と、その付属施設である。地下水の自然状態は表2に示す通りであるが、地域の特長としては、地下水温度が若干高めであることと、地下水流が、大変ゆるやかであることがあげられる。

実験に用いた井戸のケーシング寸法は $\phi 350\text{mm}$ および $\phi 300\text{mm}$ である。井戸の地質柱状図を図-14に示す。両井戸とも深さ40~50mおよび60~80mの位置に良好な帯水層が存在しているので、その部分にストレーナを設けている。地質図から見ても明らかのように、蓄熱対象となる帯水層は、多数の粘度層に挟まれた被圧帯水層である。

初年度の蓄熱は、昭和52年7月から2箇月間行なった。すなわち、地下水をくみ上げ、ファンコイルに通して建家内を冷房した後、屋上に直接散水して太陽熱を集熱し、注入井に導びき、地下注入を行なった。注

表2 自然地下水状態図

水位	夏	5 m
	冬	6 m
水温	16 $^{\circ}\text{C}$	
自然流	北々西へ約20m / 年	

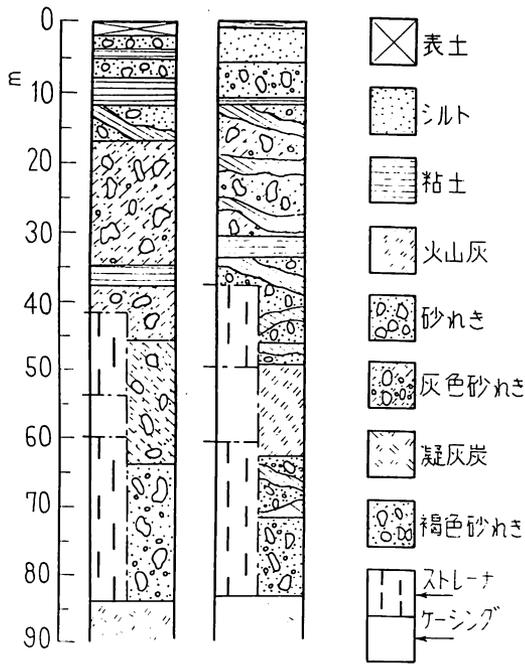


図-14 地質柱状図

入温水の平均温度は 23.7℃、熱量は 6,720 万 kcal である。この熱量は、ドラム缶 34 本分の重油に相当する。

注入温水を 3 箇月自然放置し、同じく 52 年 12 月から 53 年 3 月までくみ上げ利用した結果を図-15 に示す。縦座標は温度、横座標はくみ上げ利用した水量の合計を表している。図に示すとおり、くみ上げ初期段階では、揚水温度が 21℃であった。この地域の自然地下水温度は 16℃であるから、それよりも 5℃も高い温度の地下水が得られたことになる。これは、夏の間にたくわえておいた温水が冬まで残っていた証拠にほかならない。地下水のくみ上げ量が増すにつれ、水温は低下し、3 月の 1 万 m³ をくみ上げた時点で、18℃まで下がった。この間にくみ上げた温熱は 2,250 万 kcal、重油換算ドラム缶 11 本分に相当する。結局、注入熱量の 30% 強が温

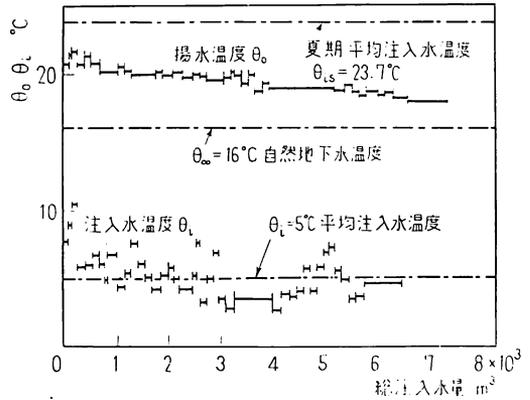


図-15 温熱の蓄熱効果

熱として回収することができたことになる。また、冷熱に対しても回収率はほぼ 30% であった。

4. おわりに

豪雪地帯の地下水は、冬期間の過剰揚水で危機に瀕している。貴重な水資源である地下水の保全を第一の目的として、熱利用した地下水を再び地下にもどすクロズシステムを提案してきた。実験の進行にともない、水資源の確保に加えて、地下帯水層の長期蓄熱効果も顕著であることが確認され、自然エネルギーの蓄熱利用の見通しが明るくなった。特に裏日本の豪雪地帯では、これまで害でしかなかった雪が、地下帯水層に蓄熱することにより、次の夏の冷房用熱源として活用することが可能であることが判明した。雪国の雪を、資源として活用できる日も間近いと思われる。

なお、本研究は、昭和 55 年度の文部省科学研究補助金(エネルギー特別研)をうけ、更に、米沢市役所、山形県庁、日本機械学会(代替エネルギーの動力化と蓄熱技術研究分科会)、日本地下水 K. K.、前川製作所 K. K.、東芝住宅産業 K. K.、三菱アルミニウム K. K. はか多数の方々との協賛を得て実施している。ここに付記して深謝する。

