

4. 調査結果に基づく地中熱利用について

本調査では、今回建設が計画されている佐久総合病院敷地内における地下水賦存状況を確認することも含めて、地下水を熱源とした地中熱利用についての可能性を探る目的で口径φ300mmの揚水井戸を掘削した。

結果として、井戸掘削地点周辺における適正揚水量は、毎分200ℓ程度であることが判明した。

ここでは、今回の揚水試験から得られた現状における既設井戸性能（揚水量・水温等）に基づく地中熱利用の検討とそれらに関する課題の抽出についてまとめる。

4. 1 本井戸における地中熱利用

揚水試験の結果、本井戸の限界揚水量は現状で300ℓ/min程であることが判明した。300ℓ/minの限界揚水量に対して、恒常的に揚水を行うことを想定し、7割程度の揚水量を適正揚水量であるとして、連続揚水試験を実施している。適正揚水量としては、210ℓ/min程度が見込めるものと考えられるため、本井戸を利用する場合、約300m³/日の揚水量を得られることとなる。ちなみにこの値は、既存資料に示される目安（100～300m³/日）に一致した値である。

(1) 利用可能エネルギー量

現状において、利用可能なエネルギー量を適正揚水量に基づき試算する。なお、試算は、単位時間におけるエネルギー量を基準としている。また、本調査で確認した地下水温度は概ね15℃であったため、△10℃と△5℃の場合について検討した。

②号井の適正揚水量を210ℓ/min、水の密度1.0g/cm³、水の比熱1.0cal/g/℃とすると、熱量は下式で求めることが出来る。

$$\text{熱量} = \text{水量} \times \text{密度} \times \text{比熱} \times \text{温度差}$$

[△10℃の場合]

$$210 \times 60 \times 1.0 \times 1.0 \times \triangle 10 = 126,000 \text{ (kcal)}$$

[△5℃の場合]

$$210 \times 60 \times 1.0 \times 1.0 \times \triangle 5 = 63,000 \text{ (kcal)}$$

熱量と仕事量と電力量については、表 4-4-1 のような関係が成り立っている。

表 4-4-1 熱量・仕事量・電力量の関係

①	質量 1 kg の物体に 1 m/s^2 の加速度を与える力を 1 ニュートン [N] $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2 \approx 0.1 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2 \approx 0.1 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 1 kg 重 \approx 約 9.8 N 地球の重力加速度は約 9.8 m/s^2 ($\approx 10 \text{ m/s}^2$), したがって、質量 100 g の物体をぶら下げている力が 1 N ($\approx 0.1 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2$)
②	1 N の力で物体を距離 1 m 移動させる仕事, すなわちニュートン・メートル [N・m] \rightarrow 1 ジュール [J] $1 \text{ N} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ J}$ 質量 100 g の物体を重力に逆らって 1 m 上方に持ち上げる仕事が 1 J と想起
③	単位時間 1 秒 [s] 当りの仕事, すなわち 1 J/s を仕事率ワット [W] 1 ボルト [V] の電位差を有する 2 点間を 1 アンペア [A] の電流が流れる時の仕事率 \rightarrow ワット [W] $1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$ $1 \text{ J/s} \times 3\,600 \text{ s} \times 1\,000 = 1\,000 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$ $1 \text{ kW} = 860 \text{ kcal/h}$, $1 \text{ kcal} = 1/860 \text{ kWh}$ $4.18 \text{ kJ} = (4.18 \times 1\,000) \text{ J} = (4.18 \times 1\,000) \text{ N} \cdot \text{m}$ $= (4.18 \times 1\,000) \cdot (1 \text{ kg 重} / \text{約} 9.8) \cdot \text{m}$ $= 427 \text{ kg 重} \cdot \text{m} = 1 \text{ kcal (熱の仕事等量)}$ $A = 1/427 \text{ [kcal/kg 重} \cdot \text{m]} \text{ (仕事の熱当量)}$

上表に基づき、単位を換算する ($1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal/h}$)。

[$\Delta 10^\circ\text{C}$ の場合]

$$126,000 \div 860 = 146.5 \text{ (kW)}$$

[$\Delta 5^\circ\text{C}$ の場合]

$$63,000 \div 860 = 73.3 \text{ (kW)}$$

したがって、本井戸から単位時間で揚水可能な水量で、 $\Delta 10^\circ\text{C}$ の場合は約 150kW、 $\Delta 5^\circ\text{C}$ の場合は約 75kW の熱量を負担できることとなる。

(2) 地中熱利用の検討

利用可能な、電力量（熱量）が把握できたため、任意のヒートポンプ（規格）を選定し、本井戸揚水による地中熱利用についての検討を行う。

ヒートポンプについては、ビル（病棟等）での使用および地下水の熱を利用することを考慮して、ゼネラルヒートポンプ社製 ZP-WS560-T（表 4-4-2）を選定した。


ちなみに、ヒートポンプによる空調では、一般に 1.0m² 当たり 100W を必要とするものとされ、今回選定した 63.0kW の能力を有する ZP-WS560-T（20 馬力）の場合は、1 台でおよそ 650 m² の床面積をカバーすることが可能である。

表 4-4-2 ヒートポンプ仕様一覧表

平成22年4月現在

●水冷式ビル用マルチ室外ユニット外観および仕様表

型名 (相当馬力)		224型(8馬力)	280型(10馬力)	335型(12馬力)
型式		ZP-WS224-T	ZP-WS280-T	ZP-WS335-T
電源仕様		三相200V 50/60Hz		
能力	冷房 kW	22.4	28.0	33.5
	暖房 kW	25.0	31.5	37.5
消費電力	冷房 kW	3.43	4.54	5.58
	暖房 kW	5.32	6.85	8.87
外形寸法 W×D×H mm		W890×D890×H1,660		
圧縮機出力 kW		4.1×1	(3.0+3.75)×1	(4.5+4.5)×1
配管サイズ	ガス mm	φ19.05	φ22.22	φ25.4
	液 mm	φ9.52	φ9.52	φ12.7
室内ユニット 接続可能台数		最大13台	最大16台	最大19台
冷媒		R410A 12kg		
型名 (相当馬力)		448型(16馬力)	560型(20馬力)	670型(24馬力)
型式		ZP-WS448-T	ZP-WS560-T	ZP-WS670-T
電源仕様		三相200V 50/60Hz		
能力	冷房 kW	44.8	56.0	67.0
	暖房 kW	50.0	63.0	75.0
消費電力	冷房 kW	6.86	9.07	11.2
	暖房 kW	10.6	13.7	17.7
外形寸法 W×D×H mm		W1,880×D890×H1,660		
圧縮機出力 kW		4.1×2	(3.0+3.75)×2	(4.5+4.5)×2
配管サイズ	ガス mm	φ28.58	φ28.58	φ28.58
	液 mm	φ12.7	φ15.88	φ15.88
室内ユニット 接続可能台数		最大26台	最大33台	最大39台
冷媒		R410A 12×2kg		
型名 (相当馬力)		840型(30馬力)	1005型(36馬力)	
型式		ZP-WS840-T	ZP-WS1005-T	
電源仕様		三相200V 50/60Hz		
能力	冷房 kW	84.0	100.5	
	暖房 kW	94.5	112.5	
消費電力	冷房 kW	13.6	16.7	
	暖房 kW	20.6	26.6	
外形寸法 W×D×H mm		W2,870×D890×H1,660		
圧縮機出力 kW		(3.0+3.75)×3	(4.5+4.5)×3	
配管サイズ	ガス mm	φ31.75	φ38.1	
	液 mm	φ19.05	φ19.05	
室内ユニット 接続可能台数		最大40台	最大40台	
冷媒		R410A 12×3kg		



ZP-WS224(280,335)-T

1. 能力、消費電力は下記の条件における値です。
 冷房：室内空気吸込温度27°CDB・19°CWB,水入口温度15°C
 暖房：室内空気吸込温度20°CDB,水入口温度10°C

2. 塗装色はシルキーシェード(1Y8.5/0.5)。

3. キャビネット寸法に外出し配管分は含みません。
 ※仕様は予告なしに変更することがあります。ご了承下さい。

ZO ゼネラルヒートポンプ工業株式会社

[$\Delta 10^{\circ}\text{C}$ の場合]

ZP-WS560-T の能力は、暖房で 63.0kW、冷房で 56.0kW である。また、その時の消費電力は、前者で 13.7kW、後方で 9.07kW である。この時、ヒートポンプの能力には、下式のような関係が成り立っている。

$$\text{加温能力 (暖房時)} = \text{消費電力} + \text{採熱量}$$

$$\text{冷却能力 (冷房時)} = \text{放熱量} - \text{消費電力}$$

したがって、ZP-WS560-T の採熱量 (X) および放熱量 (Y) を求めると。

◎暖房時

$$63.0 = 13.7 + X$$

$$X = 49.3 \text{ (kW)}$$

◎冷房時

$$56.0 = Y - 9.07$$

$$Y = 65.07 \text{ (kW)}$$

暖房・冷房時の採熱量が求められたことにより、本井戸の揚水により $\Delta 10^{\circ}\text{C}$ の温度差で利用可能な電力量 (146.5kW) から、設置可能なヒートポンプ (ZP-WS560-T : 20馬力) の台数が求められる。

$$146.5 \div 49.3 = 2.97 \Rightarrow \underline{2 \text{ 台 (暖房時)}}$$

$$146.5 \div 65.07 = 2.25 \Rightarrow \underline{2 \text{ 台 (冷房時)}}$$

したがって、ZP-WS560-T を選定した場合、2台の設置が可能であるということとなるため、40馬力が利用可能となる。

なお、COP は、暖房時 $63.0 / 13.7 = 4.60$ であり、冷房時 $56.0 / 9.07 = 6.17$ となる。

このときのシステム概要図を図 4-4-1 として示した。

図に示されるとおり、本井戸から揚水された毎分 210 l の地下水は、 15°C で熱交換器に取り込まれる。暖房時は $\Delta 10^{\circ}\text{C}$ が採熱されることにより、 5°C の水が排水されることとなる。一方、冷房時は $\Delta 10^{\circ}\text{C}$ が放出されることにより 25°C の水が排水されることになる。

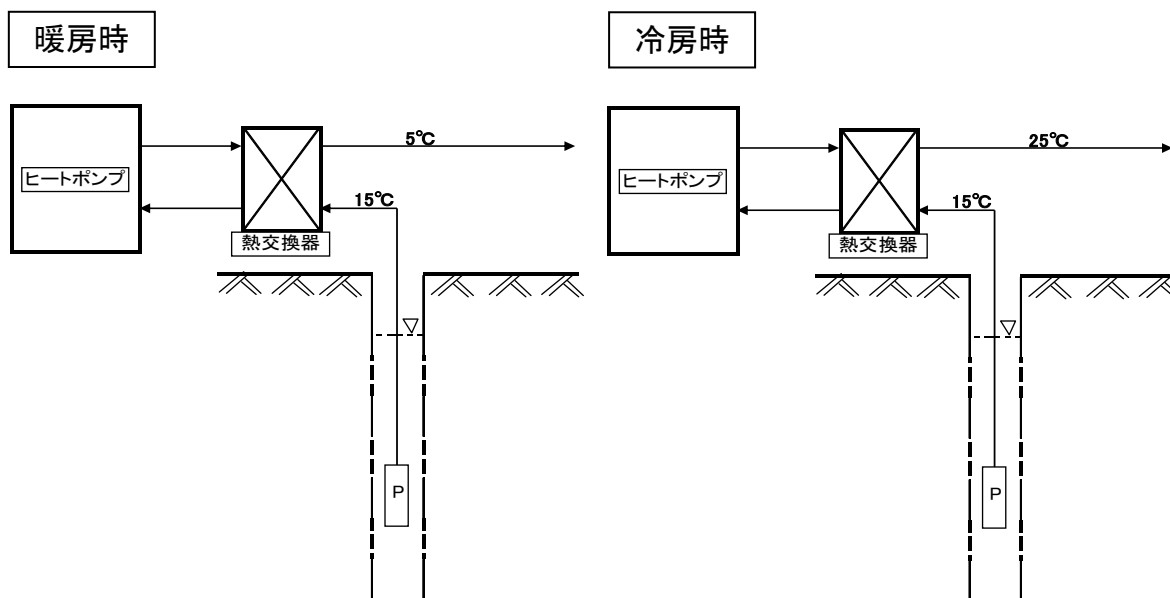


図 4-4-1 $\Delta 10^{\circ}\text{C}$ におけるシステム概要図

[$\Delta 5^{\circ}\text{C}$ の場合]

$\Delta 10^{\circ}\text{C}$ の時と同様に試算を行う。

揚水により $\Delta 5^{\circ}\text{C}$ の温度差で利用可能な電力量 (73.3kW) から、設置可能なヒートポンプ (ZP-WS560-T : 20 馬力) の台数が求められる。

$$73.3 \div 49.3 = 1.49 \Rightarrow \underline{1 \text{ 台 (暖房時)}}$$

$$73.3 \div 65.07 = 1.13 \Rightarrow \underline{1 \text{ 台 (冷房時)}}$$

したがって、ZP-WS560-T を選定した場合、1 台の設置が可能であるということとなるため、20 馬力が利用可能となる。

なお、COP は、 $\Delta 10^{\circ}\text{C}$ の時と同様である。

このときのシステム概要図を図 4-4-2 として示した。

図に示されるとおり、本井戸から揚水された毎分 210 l の地下水は、 15°C で熱交換器に取り込まれる。暖房時は $\Delta 5^{\circ}\text{C}$ が採熱されることにより、 10°C の水が排水されることとなる。一方、冷房時は $\Delta 5^{\circ}\text{C}$ が放出されることにより 20°C の水が排水されることになる。

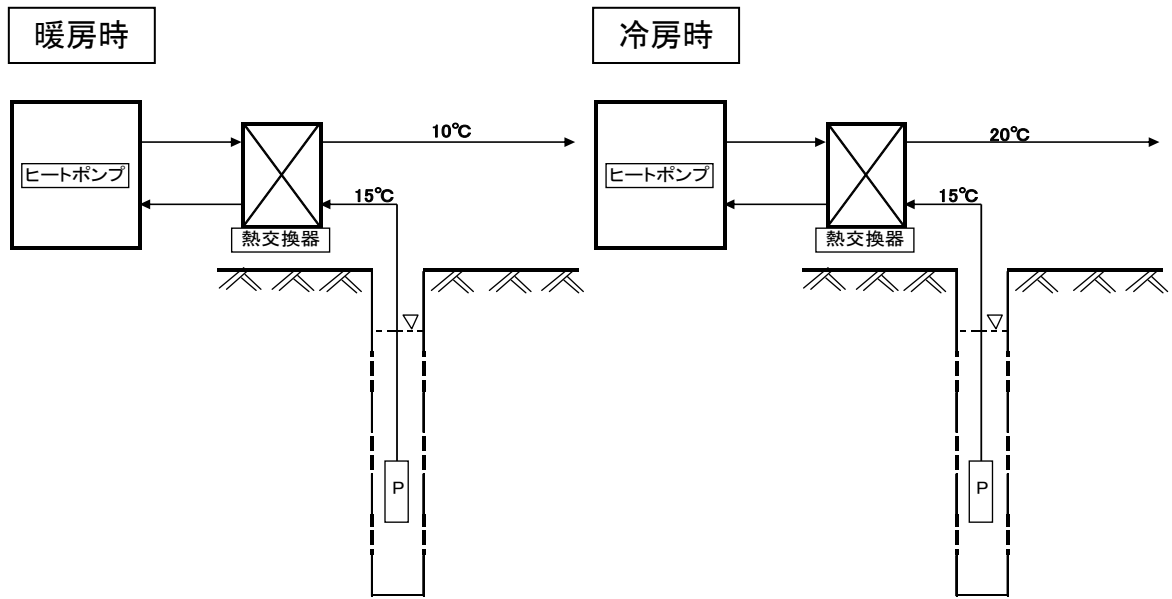


図 4-4-2 $\Delta 5^{\circ}\text{C}$ におけるシステム概要図

(3) 期待される効果について

これまで検討してきた結果に基づき、先に選定したヒートポンプ（ZP-WS560-T）を単位時間動かした場合に発生するCO₂排出量や、地中熱ヒートポンプシステムから発生した熱量と等しい熱量をガス吸収式冷温水発生器または、灯油ボイラで発生させるものとした場合の比較を、従量単価もふまえて表 4-4-3 をもとに行った。なお、ガス吸収式冷温水発生器および灯油ボイラのボイラ効率は0.85とし、比較結果は、表 4-4-4 に示した。

ちなみに、ΔT=10℃とした場合、今回の試算では20馬力の能力を有するZP-WS560-Tヒートポンプ2台が設置可能ということであり、床面積にして概ね1,300m²をカバーすることが可能である。

表 4-4-3 換算係数一覧

	一次エネルギー消費量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	従量単価 ^{※1}
電気 (ヒートポンプ用) (1 kWh 当り)	3.59	0.56	14.52 円/kWh
都市ガス (13A) (1 m ³ 当り)	41.1	2.1	73.79 円/m ³
灯油 (1 ℓ 当り)	36.7	2.5	84.0 円/ℓ ^{※2}

※1 従量単価は、佐久総合病院の契約単価である。

※2 灯油単価は、佐久地域の単価である。

表 4-4-4 燃料およびCO₂排出量の比較一覧

	熱交換できる仕事等量 (MJ)	1時間で必要な燃料量	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	使用料金 ^{※2} (円)
電気 (ヒートポンプ2台)	452.34	27.4 (kWh)	15.3	397.8
都市ガス (13A)		11.0 (m ³)	23.1	811.7
灯油		12.33 (ℓ)	30.8	1,035.7

※2 佐久総合病院の契約単価をもとに算出。

ZP-WS560-T ヒートポンプ2台を定格で運転させた場合、仕事等量 (MJ) としては452.34 MJを単位時間で発生することが可能である。この時にヒートポンプを動かす電力は27.4 kWを必要として、これと同等の仕事等量をさせようとした場合、ガスならば11.0 m³、灯油であれば12.33 ℓが必要となる。言い換えれば、都市ガス11.0 m³もしくは、灯油12.33 ℓの仕事等量を地中熱利用に切替え可能であるということである。また、CO₂排出量についても、ヒートポンプを利用することにより、都市ガス利用時では66%程度、灯油利用時では50%程度に抑えることが出来る。さらにコスト的にも、ガス利用時の49%程度、灯油利用時の38%程度に抑えることができ、ヒートポンプが優っている。

4. 2 今後の課題の抽出

今回の調査では、新規に揚水井戸を掘削することにより直接地下水賦存状況を確認することにより、地中熱利用（オープン型）の可能性について検討している。ただし、これはあくまでも本調査で確認した揚水量に基づく試算での目安でしかなく、今後具体的な設計をしていくに際しては、様々な項目について検討を重ねていく必要がある。以下に、今後の課題を抽出する。

- ・新規に掘削した揚水井戸については、適正揚水量が 200 l/min という結果となり、本井戸のみからの連続揚水による地下熱利用システムの構築は、困難であるとみられる。ただし、複数の井戸の増設（参考 1 参照）や、今後建設が計画される構造物地下に蓄熱槽の設置（参考 2 参照）を検討することで地下熱を利用することも可能である。場合によってはクローズド型（参考 3 参照）に切替えることも視野に入れて検討されることが望ましい。
- ・水質検査の結果、基準を超過する有害物質等は認められていない。したがって、現状の地下水から採熱後の排水についても、成分的には大きな問題はないものと思われる。ただし、継続的に本井戸の地下水を利用していくにあたって、水質検査（27 項目）で微量ながら検出された有機塩素化合物（4 項目）については、定期的に検査を行うなどして監視していく必要がある。また、排水量という点においては大量の地下水を排水することとなるため、これについても十分な検討が必要である。
- ・揚水に際しては、周辺環境に与える影響が少なからずあるものとみられるため、周辺地域一帯を対象とした地下水シミュレーションなどをする必要があると同時に、井戸調査などを含めた近隣地域の基礎資料を収集しておく必要がある。また、大規模施設であることをふまえ、モニタリング井戸を設置することが望ましい（可能であれば敷地の東西南北に配置）。

〔参考1〕

◎揚水井戸の増設について

今回掘削した井戸における揚水量は200 ℓ/minであり、本井1基で地下熱利用システムを構築するのは、難しいものとみられる。しかし、同程度（またはそれ以上）の井戸が複数あった場合であれば、さらに有効な地下熱利用システムを構築することも可能である。

既存資料において、調査地周辺で期待できる揚水量は今回の調査結果と一致するあ値（70～200 ℓ/min）であったが、これに該当せずに大量の揚水量（1,000 ℓ/min 以上）を得ている事例も把握している。これは、調査地周辺の地質分布にも影響されているものとみられ、とくに浅間山の火山活動により発達してきた本地区周辺の地形状況もふまえると、火山活動により発達した火砕流堆積物などの碎屑岩類が複雑に組み合わせることにより、地下水賦存も地質の分布状況を反映し、水路を形成して存在していることも考えられる。したがって、この水路を捉えることができれば、より有効な地下水採取が可能となるものと考えられる。

地下水の分布状況を、直接的に確認することはできないが、地下の比抵抗値を連続的に計測していくことにより面的な比抵抗値分布を把握し、地質構造や地下水分布上状況を間接的手法で可視化する高密度電気探査などの手法もある。

高密度電気探査の実施には、解析深度に対して3倍の測線長が必要となる。したがって、建設予定地の敷地の対角線を測線として利用できれば、450m程度の測線長が確保できることから、深度150m程度の解析が可能である。

解析の結果、今回設置した井戸（GL -84m）よりも深い深度に地下水の賦存の可能性が高いと判断されればより深い井戸設置を検討する、または浅い深度でも地下水賦存の可能性が高いと判断される箇所があればそこでの井戸設置を検討することにより、全体の揚水量を増加させたいうえで、地下熱利用システムを構築する。

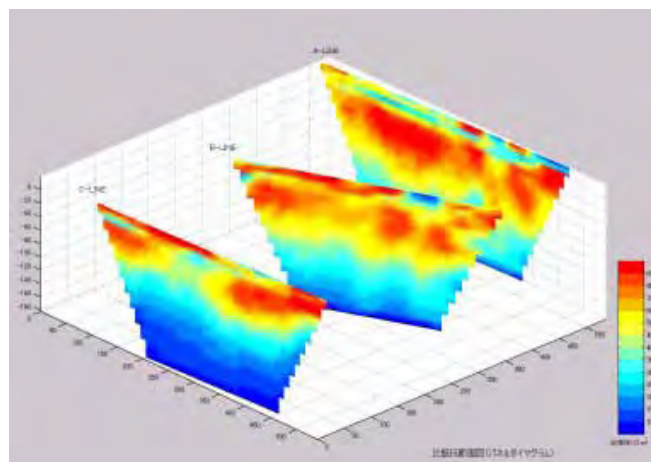


図 4-4-3 高密度電気探査イメージ

〔参考 2〕

◎蓄熱槽の設置について

地下水を貯水する蓄熱槽を設置する、いわゆる水蓄熱システムは、熱源機器を夜間に運転する蓄熱運転と昼間に運転する追いかけ運転により、昼間の空調熱負荷を処理する空調システムである。

したがって、揚水量が少ない本井においても、それを貯水して利用することができる本システムは、十分に検討する価値があるものとする。

具体的な設計にあたっては、熱源機器容量、蓄熱槽容量、ピーク日の空調負荷の処理能力などの諸条件を検討しなければならないため、ここで詳細について述べることは出来ないが、『設計者のための ヒートポンプ空調・給湯システムの実務知識 (社) 建築設備技術者協会』で紹介されている水蓄熱システムの一例を抜粋して図 4-4-4 に示す。

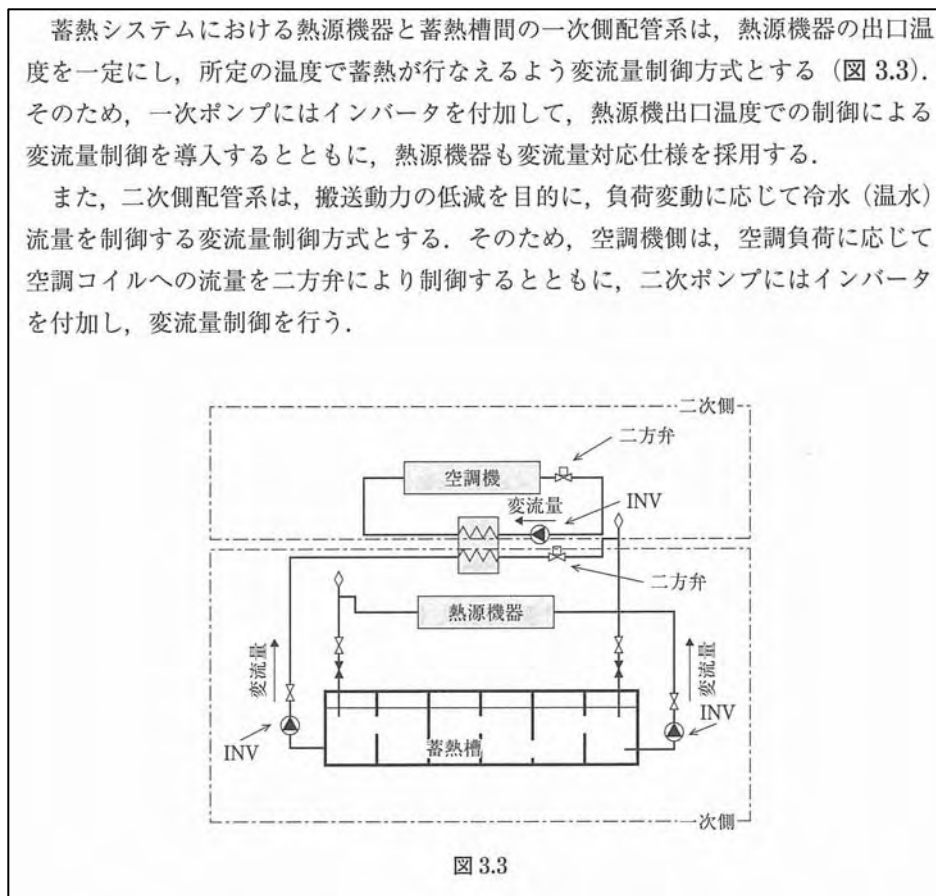


図 4-4-4 水蓄熱システムの一例

『設計者のための ヒートポンプ空調・給湯システムの実務知識 (社) 建築設備技術者協会』より抜粋

〔参考 3〕

◎クローズドループ型

『地中熱ヒートポンプシステム 北海道大学地中熱利用システム工学講座』より抜粋した図 4-4-5 を示す。なお、図 4-4-5 にある直接方式は、海外でよく用いられる方式であり、我が国では現状実用されていない。

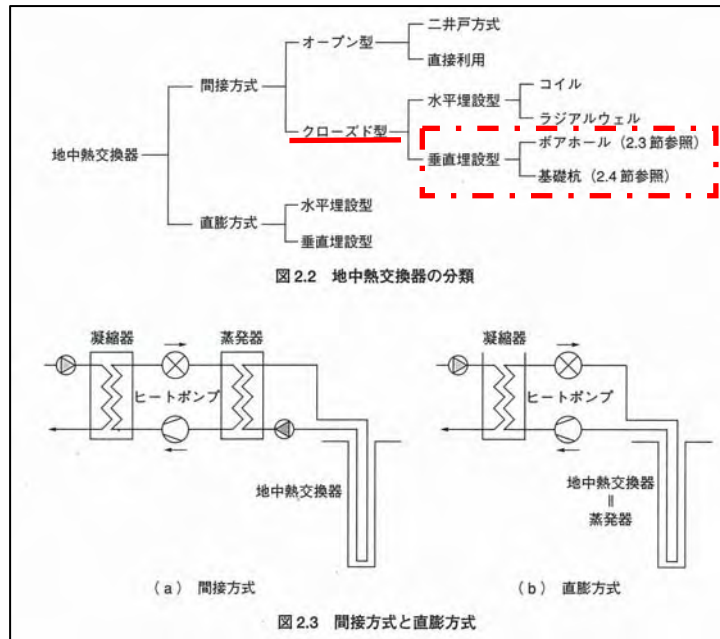


図 4-4-5 地中熱交換器の分類等

『地中熱ヒートポンプシステム 北海道大学地中熱利用システム工学講座』より抜粋

今回の調査では、図 4-4-5 でいうオープン型の直接利用を検討対象としているが、揚水可能な地下水量が少なかったことにより、クローズド型も視野に入れて検討することが望ましいと考える。

クローズド型は、今回のようにボーリング工によって地下熱採熱井戸を設置するタイプと、建設される構造物の基礎杭などを採熱孔として利用するタイプに分けられる。とくに今回調査地で計画される大規模施設では、基礎杭を利用することについて検討する価値は十分にあるものとする。

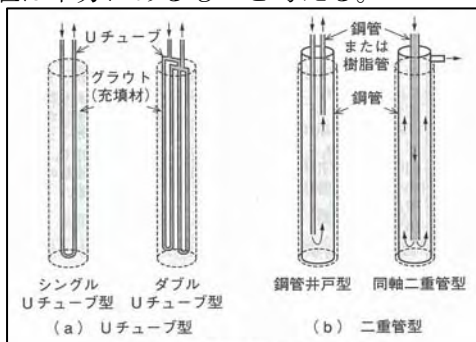


図 4-4-6 ボアホール型熱交換器

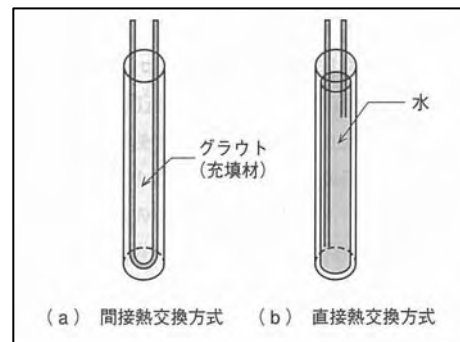


図 4-4-7 中空杭型熱交換器