

地中熱利用の土木分野への展開可能性調査

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 22～平 22
担当チーム：地質チーム
研究担当者：佐々木靖人

【要旨】

地中熱利用の土木分野への展開可能性を検討した。まず、地中熱利用の国内外での事例調査を行った結果、近年導入事例が増加しており、橋梁の基礎杭の活用など土木分野での利用もあることがわかった。地中熱利用に当たっての障壁を整理した結果、コスト面での障壁が大きく原資回収には 20～50 年要し、とくにボーリングコストが 4 割を占める。しかし逆に土木建造物の施工にあわせて設置することでこの 4 割のコスト縮減が図られるため、太陽光発電などと同程度の原資回収期間となること、また、主要施設は地下の配管のみであるため太陽光や風力などの設備に比べ場所を取らず設備も長寿命で、このため設備の更新のために土木施設を開削する必要もほとんどないと考えられることから、土木分野では導入しやすいと判断される。さらに、太陽光や風力による発電と比較して、地中熱は短期的な気象条件の影響を受けにくく、地中と外気温の温度差が大きい夏冬ほど安定的かつ効率的という特徴があることから、夏冬の冷暖房によるピーク電力量の軽減にとくに効果がある。以上より、地中熱利用の土木分野への展開可能性は高く、その導入は国のグリーンエネルギー政策に貢献すると考えられる。

キーワード：地中熱、土木建造物、CO₂、グリーンエネルギー

1. はじめに

地中の熱利用については従来、高い熱源が必要な「地熱利用」が一般的であったが、地熱地域の多くは国立公園内にあり、また既存の温泉施設との関係等もあって今後の開発・利用が困難な状況にある。その一方で、ヒートポンプ技術の高度化等により、外気温と一般的な地中の温度の温度差を用いた省電力化技術として「地中熱利用」が注目されている。家庭用および業務用民生部門のエネルギー消費の 1/3 は冷暖房に用いられているため（藤縄,2011）¹⁾、夏季や冬季に熱効率が低い地中熱利用は省エネルギーに大きく寄与できる可能性がある。

ヒートポンプを用いた地中熱利用は、米国では 2005 年時点で 60 万台、スウェーデンでも 32 万台と普及し始め²⁾、この時点で日本ではわずか 300 台であったが、近年は日本でも一般家庭等を中心に普及しつつある。しかし土木分野では必ずしも普及しているとは言えない。土木分野では地中建造物や

杭基礎などの設置と併用して地中熱利用を行うこと（杭を用いた方法は Energy Pile System といわれる）で設置の低コスト化を図ることが可能と考えられるので、省電力化や CO₂ 削減に貢献できる可能性が高い。そこで本課題では、地中熱利用の土木分野への展開可能性を検討した。

なお、地中の熱の利用形態としては、媒体の熱を直接利用する方法（直接式）とヒートポンプを用いる方法（クローズド方式、間接式）があり、これら

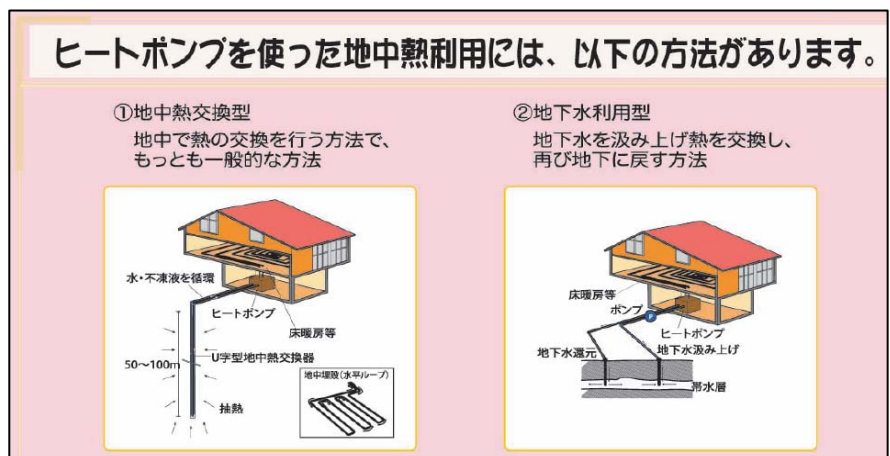


図-1 地中熱利用の方法の例（環境省パンフレット²⁾による）

を含めて広義に「地下熱利用」という場合もある(藤縄,2011)¹⁾が、学会等で用語の定義がなされていないので、本報告では「地中熱利用」と総称し、上記両方について包括的に検討した。

2. 研究方法

2. 1 地中熱利用の事例の調査

いくつかの地中熱利用事例から、エネルギー効率等を調査した。

2. 2 導入障壁の整理

事例の調査や既往研究より、導入障壁を整理した。

2. 3 土木分野への展開可能性の検討

調査事例をふまえて、土木分野における地中熱利用の土木分野への展開可能性を検討した。

3. 研究結果

3. 1 国内の地中熱利用事例の調査

(1) 千代田区のオフィスビル(笹田ビル)

笹田ビルでは 2008 年に都心で初めて地中熱利用

ヒートポンプシステムを導入した。オーナーの笹田氏は元産業技術総合研究所の地球化学や地熱の研究者であり、現在、日本地熱学会副会長、NPO法人地中熱促進利用協議会理事長でもある。この笹田ビルを視察し、熱効率などの状況を笹田氏に現地ではアリングした。

笹田ビルではオフィスビルの3フロア分(100m²/1フロア)に地中熱利用を適用し、冷暖房(ヒートポンプの暖房能力63kW、冷房能力56kW)に活用している。熱交換器用ボアホールは深度75mまで、8孔設置している。1孔にはUチューブが2式入るダブルUチューブ式を採用している。孔内では、研究のため地中温度等を複数深度で観測しており、観測値や運転状況はモニター画面で確認できるようになっている。笹田氏によると、地中熱利用前の空気熱源ヒートポンプによる冷暖房(H17-19実績)に比べ、H20-21の2年平均実績で、約49%の消費電力量、また、消費電力に対する冷却・加熱能力の効率性を示す係数である成績係数COPは暖房時で4前後、冷房時は8~9前後と高い値を示している。

なお、笹田氏によると、本システムの設置には2,000万円以上要しており(一般住宅では10~12kWで300万程度)、コストの内訳は、ボーリング:ヒートポンプ:配管=4:4:2程度である。とくに現況では未固結地盤でのボーリングコストが高額なため、原資の回収には20~50年かかるという。このため、消防署や病院など、24時間使用する施設に入れることが有効であり、このため深夜まで営業する商業施設(「ビックリドンキー」や「すき家」など)で導入されているとのことであった。

(2) 東京スカイツリー

東武鉄道(株)では、東京スカイツリー地区(墨田区業平橋・押上地区および周辺の10.2ha)の地域冷暖房(DHC)として、国内初の地中熱利用システムを導入した⁴⁾。なお、本事業は国土交通省の「住宅・建築物省CO₂推進モデル事業」となっている。

採放熱は基礎杭とボアホールの両方式により行われるという。これにより、年間総合エネルギー効率COPで1.3以上を実現させる計画である。同社によると国内のDHCの平均値は0.749であり、年間の一次エネルギー消費量は43%減(年間CO₂削減量で2,271トン)となる見込みである。

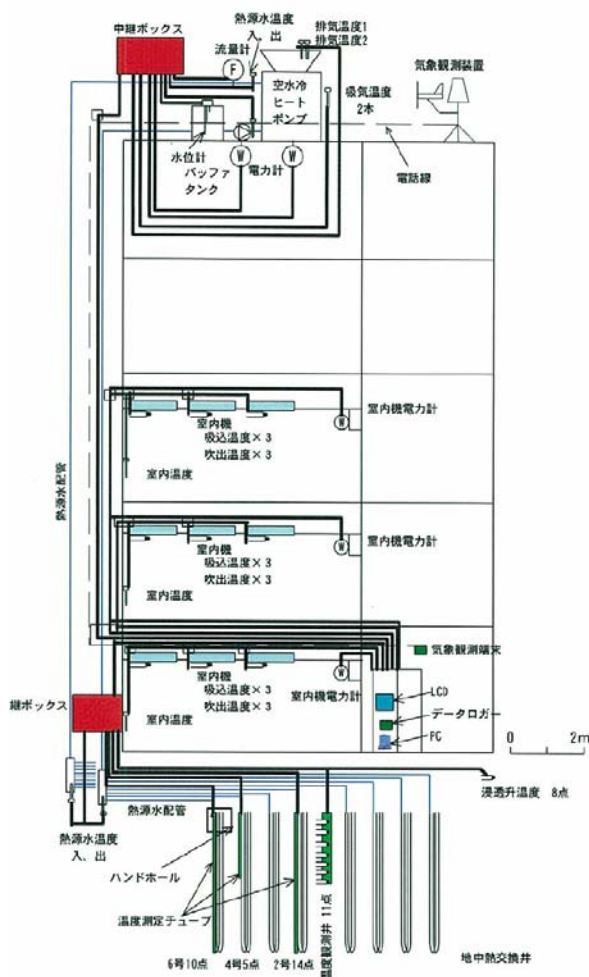


図-2 笹田ビルの地中熱利用システム(文献3)による)

(3) 新清永橋

新清永橋は福井県坂井市の一般県道三国丸岡停車線に設置された橋梁である。この橋梁の基礎杭ならびに道路下に配管を行い、夏季の熱を基礎杭周辺の地盤に蓄熱し、冬季にその熱を利用した融雪を行うシステムが設置された。このシステムでは、鋼管の放熱管とかぶり 40mm の高繊維補強コンクリート舗装を下層厚 160mm の通常コンクリート上に一体化して施工した。この建設費は 3.3 万円/m² であり、通常の融雪装置（2 万円/m²）より高価となるが、上記の構造によりアスファルト舗装に比べ耐久性があり、オーバーレイなどの補修費用が節約できるとしている。また、地下水使用の散水融雪 2.5 万/m² と比べやや高価であるが、地下水を使わず、路面凍結にも対応できる利点があるとしている。なお、本システムは福井市の駐車場などにも利用されている。

(4) その他

杭を用いた事例としては、福井県立図書館、秋田市立山王中学校体育館、札幌市立大学桑園キャンパス教官棟、船橋市立リハビリテーション病院、羽田空港国際ターミナルビルなど(長野,2007⁶⁾,長野,2011⁷⁾による)の公的な施設のほか、商業施設としては、JR貨物が江東区に開発した 12 万 m² の広さを持つ商業施設「アリオ北砂」などがある。

このほかにもボーリング孔を利用した施設としては、一般住宅、特養老人ホーム、農業施設など、多様な利用がされている。

3. 2 海外の地中熱利用事例の調査

(1) 世界の利用状況

世界の主要国における地中熱の直接利用の状況を表-1 に示す (Rybach,2008) ⁸⁾。スウェーデンでは全体で 43,560TJ/yr の地中熱利用があり、とくにヒートポンプ式の利用が 36,000TJ/yr を占める。ヒートポンプ式については、米国もスウェーデンに次いで利用が多く、さらにデンマーク、ノルウェー、ス

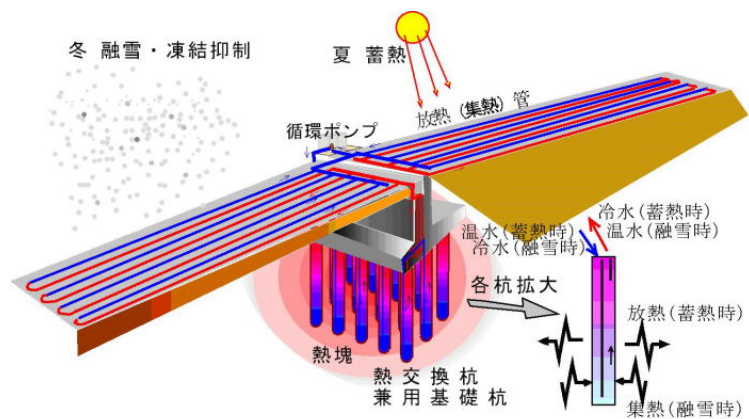


図-3 新清永橋の地中熱利用システム (福井県雪対策・建設技術研究所 HP⁵⁾ より)

表-1 2004 年の主な国の地中熱利用量⁸⁾ (単位は TJ/yr。データは Lund ほか,2005 による)

Country	Geothermal heat pumps	Individual and district heating	Total
Australia	30.0	2712.0	2742.0
Austria	1450.0	779.9	2229.9
Belgium	324.0	53.8	377.8
Canada	2160.0	26.0	2186.0
Czech Republic	1130.0	0.0	1130.0
Denmark	3940.0	460.0	4400.0
Finland	1950.0	0.0	1950.0
France	468.8	4030.3	4499.1
Germany	2200.0	604.3	2804.3
Greece	39.1	14.3	53.4
Hungary	22.6	1016.7	1039.3
Iceland*	20.0	17900.0	17920.0
Ireland	83.6	0.0	83.6
Italy	500.0	1711.0	2211.0
Japan	22.4	1410.0	1432.4
S. Korea	11.9	0.0	11.9
Mexico*	0.0	13.2	13.2
The Netherlands	685.0	0.0	685.0
New Zealand	0.0	700.0	700.0
Norway	3085.0	0.0	3085.0
Portugal	0.0	12.9	12.9
Spain	0.0	102.3	102.3
Sweden	36000.0	7560.0	43560.0
Switzerland	2854.0	134.0	2988.0
Turkey	0.0	8529.5	8529.5
United Kingdom	45.6	0.0	45.6
United States	22215.0	9024.0	31239.0
TOTAL	79 237.0	56 794.2	136031.2

*) Participant, Geothermal IA

イス、ドイツ、カナダなどが続く。一方日本はわずか 22.4TJ/yr で、ドイツの約 1/100、スウェーデンの 1/1600 に過ぎない。

一方、アイスランドではヒートポンプ式の利用は少ないがそれ以外の直接利用が世界で最も高い。日本は地熱資源が世界 3 位といわれ、このためか地中熱の直接利用は 1410TJ/yr ややや高いが、それでもアイスランドの 1/13、スウェーデンの 1/5 に過ぎない。アイスランドやスウェーデンの人口は日本よりかなり少ないことを考えると、一人当たりの地中熱利用率はさらに低いと考えられる。

世界のヒートポンプ式の地中熱利用は 1995 年時

点では1854MWtに過ぎなかったが、2005年には15723MWtになっており、約10倍に急増している(Rybach,2008)⁸⁾。とくに欧米では近年、地中熱利用が急速に盛んになっており、米国、ドイツ、スウェーデン、スイス、デンマークなどで普及が著しい。たとえばパリでは10万棟以上のアパートメントが、スイスでは4万棟以上が、またアイスランドでは全ビルの88%が地中熱利用を行っているという。欧州では、基礎杭方式だけでも、チューリッヒ国際空港の基礎杭400本など年間数百棟増加しているとのことである。地中熱利用のためのボーリング掘削延長について、スイスでは年間1000km以上(2006年実績)とのデータもある。

図-4はスウェーデン(ヨーテボリ市)におけるヒートポンプ式地中熱利用箇所の分布である。海岸線やフィヨルド内の低地、また山地に至るまで、非常に多くの地中熱利用が行われていることが分かる。

また、欧州以外でも地中熱利用が増えている国がある。とくに中国で急増中であり、たとえば上海万博会場で6,000本の基礎杭、北京JUSCOでも1,060本のボーリング熱交換器で11.7-14.4MWの冷暖房を行っている。

3.3 地中熱利用の導入障壁の検討

導入障壁としては、コスト面の課題と環境面の課題がある。

(1) コスト

上記の調査において把握したコストは、以下の通りである。

1) ヒートポンプ式

・2000万円強(63kW 笹田ビル)、300万円(12kW 一般住宅)で原資の回収には20-50年程度(回転時間による)

・工費はボーリング:ヒートポンプ:配管=4:4:2程度(日本はボーリング費用が高いとのこと。未固結地盤のためか)

2) 直接式

・新清永橋は3.3万円/m²で散水融雪(2.5万円/m²)に

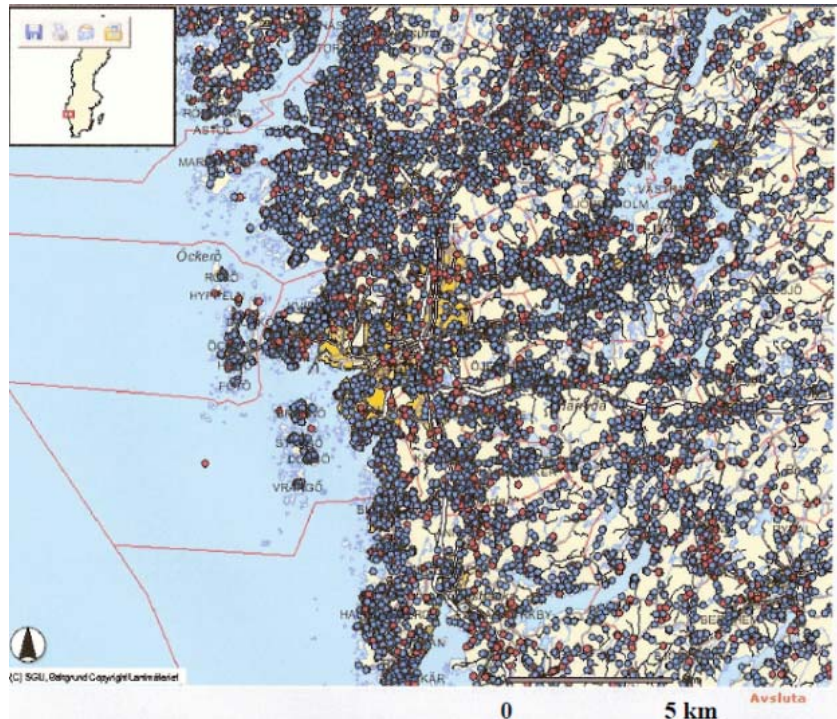


図-4 スウェーデン(ヨーテボリ市)におけるヒートポンプ式地中熱利用箇所(Swedish Geological Survey原図。文献8)による

比べやや割高だが、通常舗装に比べ耐久性ありオーバーレイ不要かつ地下水不要のメリットもある。

3) 共通の課題

・補助少ない(NEDOによる1/3補助あるも、対象は建築物のみ)。

(2) 環境面の課題

熱媒体を用いて循環する方式に比べ、地下水の直接利用は効率が高いが、周辺影響の検討が必要である。

3.4 土木分野への展開可能性の検討

以上の調査を踏まえて土木分野への展開可能性を整理する。

利点としては、扇状地など地下水流動の大きい地域が有利だが大半の地域で利用可能なためほとんどの土木構造物に利用できること、土木構造物と併設で6割程度のコストとなり太陽光発電と同程度の原資回収期間となる可能性があること、夏冬のピーク電力負荷軽減にとくに効果があること、災害時の緊急電源等に役立つ可能性があること等があげられる。

適用できる構造物としては、①橋梁等の基礎杭(実績あり)、②道路盛土下、③トンネル(覆工周辺等。トンネル湧水がある場合はさらに有利)、④ダム(監査廊周辺等。基礎排水孔などからの漏水がある場合

はさらに有利)、⑤下水道施設、等が考えられる。

利用方法としては、路面の融雪、管理所や周辺公共施設等の地域冷暖房への熱利用のほか、温度差発電による電気利用（夜間交通標識、災害時電源等）も考えられる。ただし発電効率は検討が必要である。また、二次的な効果としてヒートアイランド現象緩和にも効果が高い。

今後の課題としては、適地（礫層、流動層等）調査技術、熱効率予測技術、地質に応じた効率的な設置技術、土木施設にあわせた効率的な設置システム、低コスト化（ボーリング技術等）、利用分野・利用方法の体系化（単独利用、地域連携による利用体系等）、周辺地下水など環境面への影響の評価方法、施設の維持管理方法（目詰まり等）の検討等があげられる。

4. まとめ

地中熱利用の土木分野への展開可能性について検討した結果、土木分野では基礎工事・地下工事にあわせて地中熱の配管を行うことで効率的に地中熱利用施設を設置できるため有望であることがわかった。たとえば、東日本大震災に対する復興において大規模な土木工事が必要となるが、これにあわせて地中熱利用をまとめて導入することでグリーンエネルギー化が図られる。

今後の課題として、地域連携による利用体系の構築など、土木分野への活用技術の体系化が必要である。地中熱利用技術自体は確立しつつある技術であるため、今後は土木構造物に対しての実証実験を通じた細部技術の開発、地域連携による利用の社会実験などを通じた土木分野への利用技術の体系化が必要である。

参考文献

- 1) 藤縄克之：地下熱利用講座 1. はじめに、地下水学会誌,第 53 号,第 1 号,pp.81-82,2011.
- 2) 環境省：地中熱ヒートポンプシステムとは？,2007.
- 3) 笹田政克・大岡龍三・藤井光ほか：都心ではじめての地中熱利用 一番町笹田ビルの実用化導入例,第 4 回新エネルギー技術シンポジウム,p-01,2009.3.
- 4) 東武鉄道(株)・(株)東武エネルギーマネジメント：「東京スカイツリー地区」熱供給（地域冷暖房：DHC）事業許可 国内最高水準の省エネ性能・省 CO2 化を実現（ニュースリリース資料）,2009.2.
- 5) 福井県雪対策・建設技術研究所 HP
- 6) 長野克則：基礎杭方式地中熱利用システムの計

画と設計方法について、各種杭を利用した地中熱利用シンポジウム,地中熱利用促進協会,2007.

- 7) 長野克則：地下熱利用講座,地下水学会誌,第 53 号,第 1 号,2011.
- 8) Rybach:www.iea-gia.org/documents/RybachatI EADemandSideWorkshopPPTRybach20Mar08 .pdf

【英文要旨】

RESEARCH ON THE UTILIZATION OF GEOTHERMAL HEAT IN CIVIL ENGINEERING

Abstract : Feasibility study was conducted on the utilization of geothermal heat to civil engineering structures. Domestic and world trend was firstly investigated on the utilization of Geothermal Heat Pump (GHP) and the direct use of geothermal heat. Geothermal heating and cooling systems are rapidly increasing in the world, including the utilization of civil engineering structure such as Energy Pile System. The main problem on the utilization of geothermal heat is cost; it needs from 20 to 50 years for the return of first investment. Especially drilling cost occupies about 40% to lay Borehole Heat Exchanger (BHE) under the ground. It means, on the contrary, that 40% of cost will decrease with the simultaneous execution of BHE and civil engineering structures and it becomes the same return period as solar power generation. It is also merit for civil engineering structures that BHE doesn't need frequent exchange because BHE is simple structure and exists in environmentally stable underground compared with other green energy facilities such as wind and solar power generation. As the result, the utilization of geothermal heat to civil engineering structures is sufficiently feasible.

Key words : geothermal heat, civil engineering structure, CO₂, green energy