

自然エネルギーを活用した 融雪施設の開発について

地中熱源ヒートポンプ融雪システム

1. はじめに

東北地方の8割は豪雪地帯に指定されており、冬は積雪等による厳しい気象の地域である。このため、峠などは雪による通行止め区間が他の地域に比べて多く、積雪期の地域間交流や日常生活の妨げとなっており、路面の安全確保や都市内の快適な歩行空間の確保に向けて、消融雪施設が期待されている。しかし、これまでの施設の多くは熱源に灯油、ガス、電力等の化石エネルギーを用いることから、CO₂の排出による地球環境の悪化やランニングコストが大きいという問題があり、また、地下水利用の散水式消融雪施設については、地盤沈下等が課題となっている。

東北地方整備局では平成10年度から新道路技術5箇年計画を策定し、冬期路面の安全確保を目的としてコスト縮減や環境影響に配慮した「自然エネルギーを利用した消融雪技術の開発」に取り組み、橋梁部やトンネル坑口部、都市部の歩道等において検証を行った。本報は各種自然エネルギー、特に地中熱を活用した融雪技術について報告するものである。

2. 技術概要

(1) 2熱源複合方式(地中熱・空気熱)

地中熱源と空気熱源を組み合わせ、おのおのの長所を活かした方式であり、熱源として無限に利

用できる空気熱と気象に左右されず安定した地中熱を複合的に利用することで、地中熱単独の方式に比べ設置にかかわるイニシャルコストを多角的に低減する方式である。

空気熱源、地中熱源それぞれに圧縮機を有し、各熱源を最適条件で運転させることができ、外気温度条件に応じ空気熱源単体または地中熱源との複合運転により、負荷に応じた省エネルギー運転が可能である。具体的には、気温の高い条件では空気熱源ヒートポンプを単体で稼働させ、気温の低下とともに空気熱源と地中熱源を複合させるシステムである。

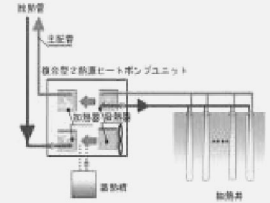
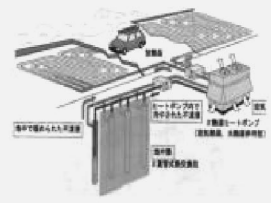
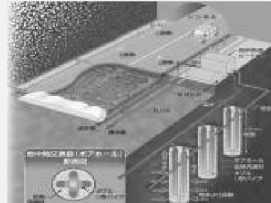
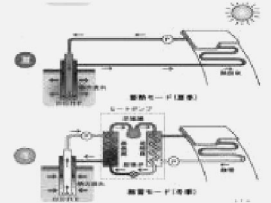
また、空気熱源の特徴である除霜については、デフロスト運転(霜取り)に余剰熱を蓄熱した温水を利用し、デフロスト運転による熱ロスを最小限に抑えている。

(2) 2熱源併用方式(地中熱・空気熱)

自然エネルギーは設置条件および選択する熱源によって利用条件はさまざまに変化するため、熱源として複数の自然エネルギーを併用することは、設備の安定した運転が期待できる。本方式は(1)の方式と同様に地中熱源と空気熱源を利用する方式であるが、空気熱と地中熱の専用機を別々に設置するよりも全体コストは安く、空気熱を主熱源、地中熱を補助熱源とし、二つの熱源を条件に応じて併用・選択使用する方法である。

安価に利用できる熱源の空気熱と比較的安定した熱源である地中熱を併用し、相互にバックアップが可能で、かつ両温度差が一定以上大きくな

表 1 各融雪施設の概要

	2 熱源複合方式	2 熱源併用方式	潜熱蓄熱利用方式	地中蓄熱利用方式
設置箇所	岩手県 茨島跨線橋	青森県 久栗坂トンネル坑口	山形県 関山トンネル坑口	青森県 青森市中央地区
熱源	地中熱・空気熱	地中熱・空気熱	地中熱	地中熱・太陽熱
面積	2,460m ²	714m ²	700m ²	659m ²
構成図				
掘削方法	回転と振動による掘削（パワードリル）	ダウンザホールハンマ工法	ダウンザホールハンマ工法	二重管掘削工法，ロータリパーカッション工法等
地中熱交換器	・ダブルUチューブ式 地中熱交換器 ・地中熱交換器75m×48基	・ダブルUチューブ式 地中熱交換器 ・地中熱交換器 100m×7基	・ダブルUチューブ式 地中熱交換器 ・地中熱交換器 100m×19基	・坑井内同軸熱交換器 （DCHE） ・DCHE150m×8基
伝熱充填材	・高熱伝導率グラウト材 （珪砂含有）	・ベントナイトセメント ・珪砂	・ベントナイトセメント （炭素分含有）	・ベントナイトセメント （珪砂含有）
ヒートポンプ	複合型ヒートポンプ×2基 空気熱源45kW 地中熱源11kW	ヒートポンプ出力30kW 2熱源併用型ヒートポンプ	ヒートポンプ出力42kW	ヒートポンプ出力 22.5kW×2台

り、温度の低い熱源から採熱が困難となった場合には、温度の高い熱源のみの単熱源運転に自動切り替えを行う仕組みである。

(3) 潜熱蓄熱利用方式（地中熱）

通常の業務用電力に比べて料金が安価な融雪用電力Bを主電力として用い、地中熱源ヒートポンプと潜熱蓄熱装置を組み合わせるシステムを構成している。通常時は安価な融雪電力Bを使用した地中熱源ヒートポンプを利用、給電が停止する夕方2時間は潜熱蓄熱装置から熱を取り出す仕組みである。

地中熱源ヒートポンプを効率よく運転するためには、発生温度の低下、すなわち潜熱蓄熱材の蓄熱温度を低下させることが必要である。空調分野で普及している潜熱蓄熱材の相温度変化は47℃と融雪分野で使用するには高温であるため、従来用いられていた潜熱蓄熱材（酢酸ソーダ混合物）に変わり低温相変化タイプ潜熱蓄熱材（硫酸ナトリウム10水塩）を新たに採用した。このことにより、相変化温度を47℃から32℃へ低下させることができた。

(4) 地中蓄熱利用方式（地中熱・太陽熱）

地中熱を主熱源、夏期の太陽熱を副熱源として利用する方式である。冬の融雪時には、坑井内同軸熱交換器（DCHE）によって大地から効率よく熱を取り出して、これをヒートポンプで昇温し、高温となった熱を放熱管を循環する不凍液に伝えて融雪を行う。

また、大地を蓄熱体とし、夏期には太陽熱で高温となった舗装体から熱を取り出し地中に蓄え、冬期にもともと大地が保有する熱と夏期に蓄えた熱を利用する仕組みである。



写真 1 融雪施設（地中蓄熱利用方式）設置前の状況



写真 2 融雪施設（地中蓄熱利用方式）設置後の状況

3. 技術の特徴

(1) 無散水方式への転換

わが国の積雪寒冷地域で導入されている消融雪施設は、散水方式（消雪施設）と無散水方式（融雪施設）に大別される。熱源は主に地下水や河川水等が利用されてきたが、地下水を利用する場合には過剰汲み上げによる地盤沈下等の問題、都市部においては水はね等の問題もあり、最近では無散水方式への転換が進んでいる。

無散水方式の熱源には、地下水熱や地中熱等といった自然エネルギー、温泉熱等のローカルエネ

ルギーおよび石炭・石油等の化石エネルギー等が利用されており、従来型の化石エネルギーを用いた融雪施設においては、エネルギー問題や環境問題等への影響が大きいため、自然エネルギーを利用した融雪施設が徐々に普及してきている。

比較的温暖な積雪地域では地下水、地中熱、湖沼河川水等を直接熱源として用いるが、厳寒地域においては地中熱を利用した融雪施設が使用されるようになってきた。地中熱を利用するための技術としては、①ヒートポンプ、②熱交換井の掘削技術、③採熱技術、④蓄熱技術等がある。

(2) ヒートポンプ

日本の一般的な地中の温度は、50～100m程度では季節に関係なく10～15℃でほぼ一定であることから、地中熱は安定性があり日本中いたる所で利用可能で、寒冷地では特に有効な熱源である。本報の4施設でも地中熱源ヒートポンプを単独あるいは複合型で採用している。地中熱の利用は欧米では盛んであるが、日本では今後の期待の大きな分野となっている。

ヒートポンプは、利用熱源の温度が低いとか、多量の熱源が必要な場合等に用いられ、厳寒地域においては地中熱源ヒートポンプを利用した融雪施設が最近使用されるようになってきた。

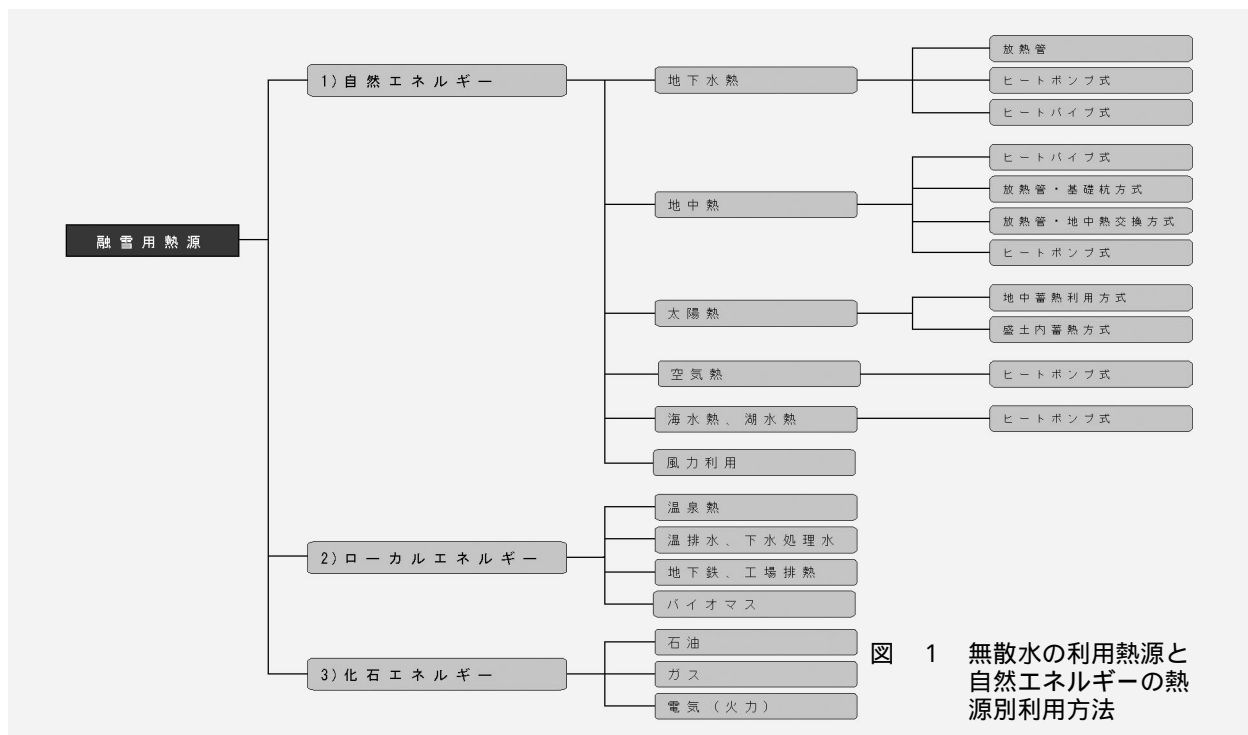


図 1 無散水の利用熱源と自然エネルギーの熱源別利用方法

設置個所に制約条件の少ないヒートポンプの熱源には空気熱源と地中熱源がある。外気を熱源とする空気熱源ヒートポンプは設備コストでは最も安価であるが、東北北部や山間部等といった外気温度が低い厳寒地域にあっては、熱交換効率が低下し、非効率な運転となるため、ランニングコストが増大する。

一方、地中熱源は深度10m以上で年中温度が安定しており、外気温度に比較すると冬でも温度が高いため、熱源として利用すると効率がよいことから地中熱源ヒートポンプが注目されてきている。

(3) 地中熱の採熱技術

地中から熱を取り出す方法の一つに地中熱交換器がある。浅層から採熱するタイプと深層から採熱するタイプの2種類があり、採熱方式は、U字管方式や、内管と外管からなる二重管方式が主流となっている。

本報の3施設では、地中熱採熱部には欧米で実績のあるダブルUチューブ式地中熱交換器を採用した。垂直削孔内に、先端をU型に加工した2組のポリエチレン管を設置し、隙間を埋め戻した構造となっている。

また、潜熱蓄熱利用方式では、地中との熱交換効率を高めるため、埋戻し材として、独自技術として開発した伝熱充填材（炭素分とセメントの混合物）を採用した。伝熱充填材を使用することにより、一般的な埋戻し材であるベントナイトセメントに比べて、地中採熱量を20%向上させることができた。

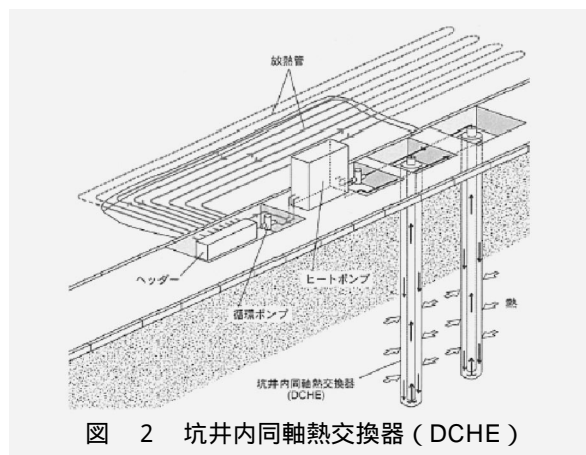


図 2 坑井内同軸熱交換器 (DCHE)

一方、地中蓄熱利用方式では、技術開発された坑井内同軸熱交換器 (DCHE) を採用しており、熱交換器自体のコストはU字管熱交換器に比べて高いが、効率が優れているので、地中熱交換器の総延長あるいは設置基数が少なくすることが可能である。さらに、坑壁とケーシングの間に充填材 (ベントナイトセメント) に珪砂を混入し、充填材の伝熱特性の向上も図った。

4. 施工上の留意点

(1) 熱源の選定

- 融雪施設の設置にあたって、熱源の選定・発掘は重要であり、計画地において利用可能な熱源が何かについて、エネルギーの供給安定度、エネルギー賦存量、環境に対する負荷、経済性、将来性、現段階での利用技術のレベル等多角的な面から総合的に評価を行う必要がある。
- 熱源に地中熱を採用する場合には、地中採熱量は現地土質により変化するため、施設の設計にあたり、事前に現地採熱試験を行う必要がある。

(2) 掘削工法の選定

- 地中熱を利用するヒートポンプシステムは、日本では熱交換井の掘削等のイニシャルコストが高いこと等のため普及が進んでいないのが現状である。
- これはわが国独特の複雑な地盤構造に起因するためである。いかなる地層条件でも円滑な掘削が可能で、かつ掘削コストの安い掘削技術が必要であるが、これは今後の技術革新を待ちたい。
- 土質、深度、周辺環境、工期、経済性等の要因から、当該施工条件への適用性を判断し、最適な施工方法を決定する必要がある。

(3) 放熱管の布設

- 放熱管を路面に布設するにあたり、長期間の交通規制を実施する必要があるため、交通規制の期間を短縮させる舗装仕様・工法について検討を行う必要がある。



写真 3 放熱管の布設状況

- ・ 現道工事の場合は、放熱管の布設を交通量や歩行者の少ない夜間工事に対応する。
- ・ 交通規制時間を短縮するため、工程に合わせた放熱管のブロック割を検討し、ジェットコンクリートを採用する。
- ・ 保護コンクリート打設時および表層アスファルトの舗装時は、放熱管内にエア供給または循環液を封入してから作業を行う。
- ・ 配管内の空気をできるだけ排除するため、要所にエア抜き弁を設ける。

(4) 機器設置スペース

- ・ 必要な設備を設置できるスペースが確保できるかどうかを確認し、スペースに余裕のある場合でも、景観への配慮や高架橋の桁下および法面脇等の利用を検討する。
- ・ 設置予定個所がトンネル坑口や市街地の歩道等、設置に制約がある場合には、ヒートポンプ等の機器類をユニット化することにより省スペースを図る。
- ・ 蓄熱方式を採用する場合には、一般的な水蓄熱に比べ、蓄熱槽容量が 1/2 ~ 1/3 になる潜熱蓄熱材を利用する等のシステム検討も必要であ

る。

- ・ 市街地に設置する場合には静寂さも要求されるため、騒音レベルの小さい水熱源ヒートポンプの採用、コンプレッサのタイプやケーシングの仕様を検討する等の対応も必要である。

5. おわりに

電力等の電熱やボイラーを利用した消融雪施設は、即効性・持続性に優れた施設であるが、ランニングコストが大きいとともに、CO₂の排出等、環境面でも課題が多い。

一方、新しい自然エネルギーの活用は、现阶段ではコスト高であるが、生活時間の多様化やバリアフリー等といったサービスレベルに対応する消融雪施設の検討は重要なテーマである。

各種の消融雪施設には最近開発されたものも多く、技術開発によるコスト縮減と普及により単価もさらに低下する可能性があり、自然エネルギーの一層の活用に向けて、さらなる技術開発が望まれる。

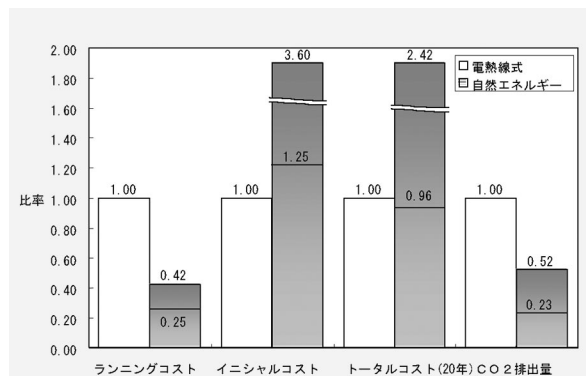


図 3 自然エネルギー利用と電熱線式との比較
2 段書きの数値は本報自然エネルギー方式の中での最小値と最大値を示す

技術開発にあたって (開発者のコンセプト)

- ・ 橋梁、トンネル坑口、都市部交差点のいずれかに適用できる自然エネルギーを用いた消融雪施設。
- ・ 融雪部については施工が容易で耐久性に優れていること。
- ・ 従来の施設より維持管理費が低減できるこ

と。

- ・ ヒートポンプを使用する場合、効率の高いヒートポンプを利用すること。
- ・ 融雪の運転は効率的な制御を行うこと。
- ・ 熱源については地域性を考慮すること。
- ・ メンテナンスが容易なこと。

技術の視点

施工者・開発者の視点

i) 技術評価

・化石エネルギーを原料とする電力を利用した既存融雪方式である電熱線方式と比較すると、インシヤルコストでは割高となるものの、ランニングコストや電力消費量の低減が可能である。また、自然エネルギーを熱源とした設備であるため、CO₂排出量が削減され、自然に優しい融雪システムとして評価できる。

ii) 今後の課題

・自然エネルギーの利用例はまだまだ少なく、導入後に技術的な課題や改良技術の提案を抽出しているのが現状である。
・融雪効果の向上、機器の設計精度の向上、コスト縮減等を図るため、実地の稼働データを蓄積する必要がある。
・地中熱利用は、機器コスト（ヒートポンプ）や施工コスト（熱交換井の掘削費用）が高く、インシヤルコストの高いものとなっている。今後の発展には、安価な施工技術の開発をはじめとする技術革新が必要である。

自然エネルギーを活用した融雪施設

発注者の視点

・融雪施設の能力および融雪効果を中心に検証評価を行った結果、自然エネルギー利用の有効性は確認された。
・融雪施設の導入によるサービスレベルの変化では、凍結・圧雪路面が解消され、機械による除雪作業の低減等といった効果の発現があった。
・現段階ではコスト高であるが、ランニングコストや環境面（温室効果ガス排出量の削減）でのメリットが大きいことから、環境改善技術としての認知も必要。
・今後は、効果的な制御・運用方法、トータルコストの改善策、熱源の選定条件の整理等といった課題を検討し、継続的な観測並びデータ収集を行いながら長期的視点での評価を行っていく必要がある。

発注者

国土交通省東北地方整備局

施工者・開発者

株式会社前川製作所

株式会社クボタ

新日本製鐵株式会社

独立行政法人産業技術総合研究所

株式会社日立エンジニアリングサービス

国土交通省東北地方整備局東北技術事務所技術課 計画係