

ISSN 1346-7328
国総研資料 第1338号
令和8年1月

国土技術政策総合研究所資料

Technical Note of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1338

January 2026

B-DASH プロジェクト No.45

小口径管路からの下水熱を利用した車道融雪技術
導入ガイドライン（案）

上下水道研究部下水道研究室

B-DASH Project No.45

Guidelines for introduction of roadways snow melting technology
using sewage heat from small-diameter pipes

Wastewater System Division,
Water Supply and Sewerage Department

国土交通省国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management,
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

B-DASH プロジェクト No.45

小口径管路からの下水熱を利用した車道融雪技術導入ガイドライン（案）

上下水道研究部下水道研究室

B-DASH Project No.45

Guidelines for introduction of roadways snow melting technology
using sewage heat from small-diameter pipes

Wastewater System Division,
Water Supply and Sewerage Department

概要

本ガイドラインは、下水熱の利用促進を目的として、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）で採択された「小口径管路からの下水熱を利用した融雪技術の実用化に関する実証研究」（研究期間：平成 30 年度～令和元年度）における成果を踏まえて、技術性能及び技術導入の手順を明示し、技術の普及促進を図るために作成したものである。

キーワード：下水熱、融雪、ヒートポンプ、小口径管路、更生

Synopsis

This guideline is prepared for promoting the snow melting technology for roadways using sewage heat from small-diameter pipelines with the procedures to evaluate the effectiveness for application and to instruct how to apply them. This aims to establish Promoting the use of sewage heat. This study is based on “Demonstrative study experience to establish snow melting technology using sewage heat from small-diameter pipes “, (empirical term from 2018 to 2019), which was adopted by “Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project”.

Keywords: sewage heat, snow melting, heat pump, small-diameter pipe, rehabilitation

執筆担当者一覧

国土技術政策総合研究所	上下水道研究部	下水道研究室	室	長	安田将広
元国土技術政策総合研究所	下水道研究部	下水道研究室	室	長	岡安祐司
元国土技術政策総合研究所	下水道研究部	下水道研究室	室	長	吉田敏章
国土技術政策総合研究所	上下水道研究部	下水道研究室	主任研究官		松浦達郎

はじめに

我が国の下水道は、国民生活に不可欠な社会資本として、81.8%（令和6年度末下水道処理人口普及率）まで普及が進んでおり、水洗トイレが普及するとともに公共用水域の水質改善に大きく貢献している。この第一義的な目的に加えて、下水道資源（下水熱、汚泥等）は、質・量ともに年間を通して安定しており、特に、下水熱は下水道管路ネットワークを通じて都市に豊富に存在し、都市の低炭素化効果の高い未利用エネルギーである。化石燃料を使用する既存の融雪設備は、その稼働に多くのコスト及びエネルギーを必要とする場合もあることから、下水熱を活用して融雪設備のエネルギー効率を上げることによって、その稼働に必要となるコスト及びエネルギー消費量ひいては温室効果ガス排出量の削減が期待できる。

2020年以降の温室効果ガス削減に向けた国際的な取組みであるパリ協定の採択を受けて、我が国では、二酸化炭素排出削減目標の達成に向けた取組み方針が策定されており、下水道分野でも下水熱等のエネルギー利用を目指すことが「新下水道ビジョン加速戦略」（国土交通省水管理・国土保全局下水道部、平成29年8月）で既に示されているが、潜在的なポテンシャルに対して実際に下水熱が活用されている割合は多くなく、優れた技術が開発されても、実績が少ないために導入に慎重な下水道管理者も多い状況にある。

国土交通省水管理・国土保全局下水道部（現 上下水道審議官グループ）では、優れた革新的技術の実証及び普及によって下水道事業における資源回収及び総エネルギー効果の増大等を実現し、あわせて本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するために、下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト）を平成23年度から実施しており、国土交通省国土技術政策総合研究所上下水道研究部が実証研究の実施機関となっている。なお、令和6年度補正予算からは、上下水道一体革新的技術実証事業（AB-CROSSプロジェクト）と名称を変更し、水道に関する革新的技術、下水道に関する革新的技術に加えて、両者を横断する上下水道一体の革新的技術を対象とした実証事業として実施している。

本ガイドライン「小口径管路からの下水熱を利用した車道融雪技術導入ガイドライン（案）」で示す技術は、下水道管路の更生工事とあわせて採熱管を設置することにより、これまで難しかった口径800mm以下の下水道管路から下水熱を回収することを可能とする革新的技術である。国土技術政策総合研究所の委託研究「小口径管路からの下水熱を利用した融雪技術の実用化に関する実証研究」（受託者：東亜グラウト工業・丸山工務所・十日町市共同研究体、実施期間：平成30年～令和元年度）において、従来技術と比較してコスト、エネルギー消費量及び温室効果ガス排出量を削減できる効果が確認された。本ガイドラインは、実証研究の成果を踏まえ、下水道管理者及び関連事業者が参考にできる資料として作成したものであり、この優れた革新的技術が全国や海外にも普及していくことを強く願うものである。

下水道革新的技術実証事業としての技術の選定から、実証研究施設の設置及び運転による実証の成果を踏まえた本ガイドラインの作成まで、尽力いただいた下水道革新的技術実証事業評価委員会及び検討会の委員各位並びに実証研究に精力的に取り組まれた研究体各位等、全ての関係者に深く感謝申し上げます。

目次

第1章 総則	1
§1 ガイドラインの目的	1
§2 ガイドラインの適用範囲	3
§3 ガイドラインの構成	4
§4 用語の定義	5
第2章 技術の概要及び評価	7
§5 本技術の目的	7
§6 本技術の適用条件	9
§7 本技術の内容	10
§8 実証研究に基づく本技術の評価	19
第3章 導入検討	27
§9 導入検討の手順	27
§10 基礎調査	28
§11 導入効果の検討	33
§12 導入判断	35
第4章 計画・設計	36
§13 計画・設計の手順	36
§14 必要熱量の算出	37
§15 放熱設備の設計	39
§16 採熱設備の設計	43
§17 操作・制御設備の設計	47
§18 概算工事費の算出	53
第5章 運用・維持管理	54
§19 運用・維持管理	54
参考文献	56
資料編	57
資料A 実証研究の内容	57
A.1 研究概要	57
A.2 基礎調査及び導入効果の検討	62
A.3 設計	72
A.4 研究結果	88
A.5 実証施設と異なる施設規模におけるコスト比較	94
資料B 問い合わせ先	107

第1章 総則

§1 ガイドラインの目的

本ガイドラインは、下水道事業における大幅なコスト縮減や省エネルギー・創エネルギー効果の増大に寄与するため、下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）で採択された「小口径管路からの下水熱を利用した融雪技術」（以下「本技術」という。）について、実証研究の成果を踏まえて、技術の概要、導入検討、計画・設計及び維持管理等に関する技術事項について明らかにし、もって導入の促進に資することを目的とする。

【解説】

下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト）は、新技術の研究開発及び実用化を加速することにより、下水道事業における資源回収、大幅な省エネルギー・創エネルギー効果やコスト縮減を実現し、併せて、本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援するため、国土交通省が実施しているものである。

B-DASHプロジェクトの一覧は、**図 1-1** のとおりである。各実証事業においては、国土技術政策総合研究所からの委託研究として、実証研究を実施している。

本技術は、他の熱源よりも低コストに融雪できる下水熱利用技術に係る革新的技術であり、実証研究のとりまとめにあたっては、専門的知識を有する有識者及び実務に精通した地方公共団体職員より意見を聴取したうえで、学識経験者で構成される下水道革新的技術実証事業評価委員会（以下「評価委員会」という。）の評価を受け、十分な成果が得られたと評価された。

本ガイドラインは、下水道事業における大幅な省エネルギー・創エネルギー効果やコスト縮減を実現するため、評価委員会で評価された本技術の実証研究の成果を踏まえ、本技術の導入の促進に資することを目的として、国土技術政策総合研究所が作成するものである。このため、本ガイドラインでは、下水道管理者が本技術の導入を検討する際に参考にできるように、技術の概要及び評価、導入検討、計画・設計並びに運用・維持管理に関する技術的事項についてとりまとめている。

なお、本ガイドラインについても、実証研究の成果と同様に、専門的知識を有する有識者及び実務に精通した地方公共団体職員より意見を聴取のうえ、評価委員会の評価を受け、了承されたものである。

下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)一覧

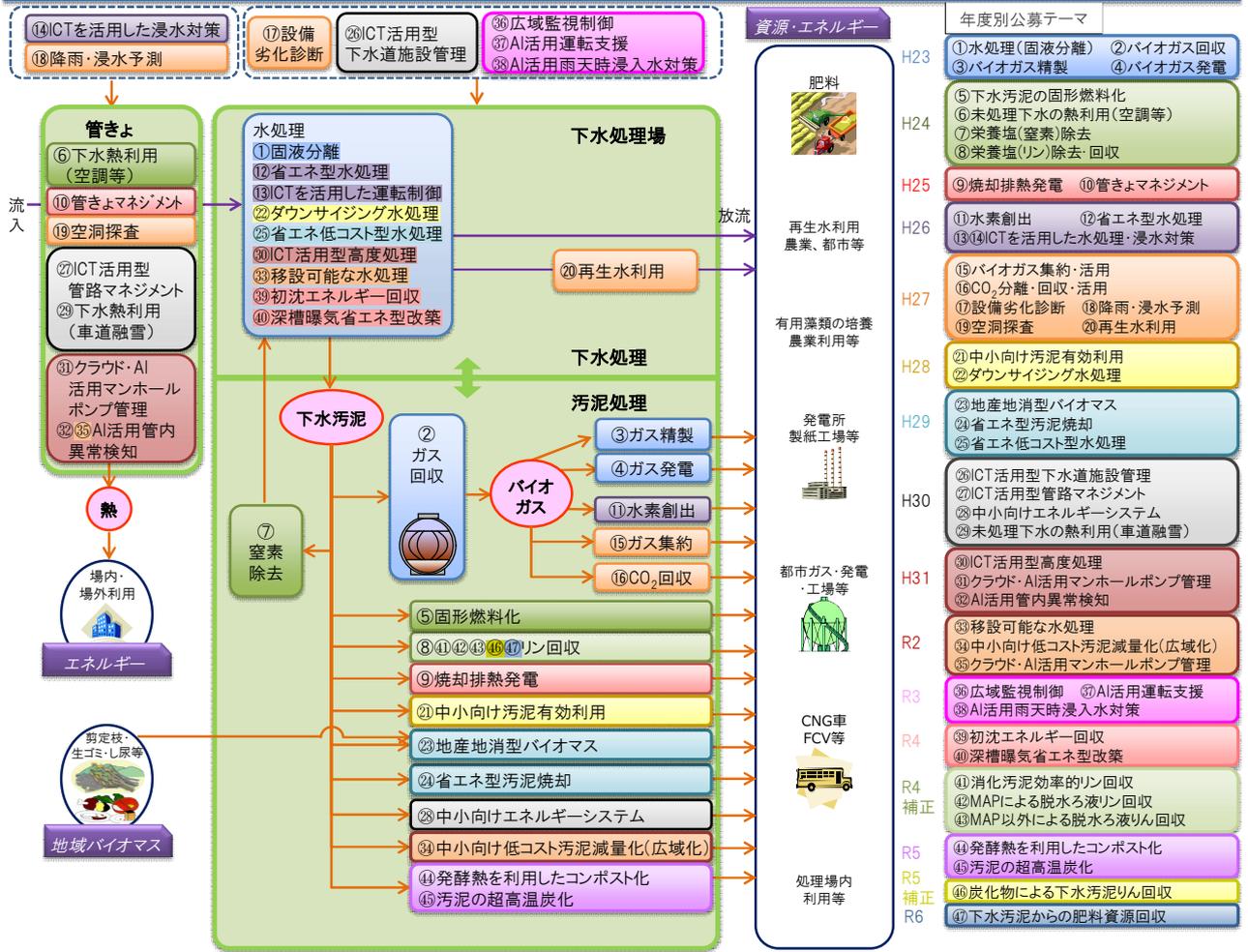


図 1-1 B-DASHプロジェクトの一覧

§2 ガイドラインの適用範囲

本ガイドラインは、本技術を用いた車道融雪での利用を目的とする設備の導入検討、計画・設計及び運用・維持管理に適用する。

【解説】

本ガイドラインは、本技術の導入を促進することを目的として、本技術の導入検討、計画・設計、運用・維持管理の参考となるようにとりまとめたものであり、下水道管理者及び関連する民間企業等に利用されることを想定して作成している。

なお、本技術によるシステムの設置及び管理については、対象とする道路の管理者との協議が必要である。

§3 ガイドラインの構成

本ガイドラインは、以下のとおり構成される。

- (1) 第1章 総則
- (2) 第2章 技術の概要及び評価
- (3) 第3章 導入検討
- (4) 第4章 計画・設計
- (5) 第5章 運用・維持管理

【解説】

本ガイドラインは、全5章及び資料編からなる。各章の概要は以下のとおりであり、資料編としてB-DASHプロジェクト実証研究の結果を掲載している。

(1) 第1章 総則

本ガイドラインの目的、適用範囲、ガイドラインの構成及び用語の定義について記述する。

(2) 第2章 技術の概要及び評価

本技術の目的、適用条件、内容及び実証研究に基づく本技術の評価を示す。

(3) 第3章 導入検討

本技術の導入検討手順、基礎調査内容、導入効果の検討及び導入判断の方法を示す。

(4) 第4章 計画・設計

本技術の導入が決定された後の具体的な計画・設定を進めるための手順として、必要熱量の算出、放熱設備、採熱設備、操作・制御設備の設計並びに概算工事費の算出に係る方法及び考え方を示す。

(5) 第5章 運用・維持管理

本技術を導入した場合のシステムの運用・維持管理について示す。

§4 用語の定義

本ガイドラインで扱う用語は、以下のとおり定義する。

下水熱： 下水処理水又は未処理下水を熱源とする熱をいう。

熱源水： 下水熱の回収及び舗装で放熱するための媒体をいう。水や不凍液が使われる。

放熱設備： 舗装に埋設して温めた熱源水を通過させることができる配管をいう。

採熱設備： 下水から熱を回収するための設備をいう。

小口径管路： 口径 800 mm 以下の下水道管路をいう。

下水熱利用： 下水道施設内に採熱設備を設け、下水を熱源として利用することをいう。

融雪設備： 熱源で路面を温めて車道の雪を融かすための設備で、採熱設備、熱源水配管、循環設備、放熱設備、操作・制御設備等を含めた設備全体の総称をいう。

放熱管： 放熱設備に用いる配管をいう。

採熱管： 採熱設備に用いる配管をいう。

熱源水配管： 採熱設備から放熱設備の間に配置し、熱源水を循環させる配管をいう。

循環設備： 回収した下水熱を採熱設備から放熱設備に送るためのヒートポンプ、循環ポンプ、熱源水の体積変化による圧力上昇を抑制するための膨張タンク、熱源水配管及び熱源水の総称をいう。

操作・制御設備： 本技術の運転操作を制御するための設備をいう。

電源設備： 本技術の動力を供給する受電機器をいう。

機械室： 本技術で設置した設備を配置する室内をいい、熱源水配管、三方弁、ヒートポンプ、循環ポンプ、膨張タンク、制御盤を配置する施設である。

ヒートポンプ： 電気エネルギーを利用して、熱を温度の低いところから高いところに移動させる機構の機器設備をいう。これにより、低温の熱源から高温の熱をつくり大きな熱エネルギーとして利用することができる。

ヒートポンプレス： ヒートポンプを利用せずに下水熱を利用する形態のことをいう。

ヒートポンプ運転： ヒートポンプを稼働させた運転をいう。

ヒートポンプレス運転： ヒートポンプを稼働させない運転をいう。

冬期間： 地域によって異なるが、降雪が始まり本技術を稼働する期間のことである。なお、実証研究では、12月～3月とした。下水熱： 下水処理水又は未処理下水を熱源とする熱をいう。

なお、下水道施設の基本的な用語については「下水道施設計画・設計指針と解説 —2019年版—」（日本下水道協会、2019年9月）に、採熱設備の基本的な用語については「国総研資料第804号 B-DASHプロジェクト No.5 管路内設置型熱回収技術を用いた下水熱利用導入ガイドライン（案）」²⁾及び「下水熱利用マニュアル（案）」（国土交通省水管理・国土保全局下水道部、2021年4月）に準拠する。また、道路施設の基本的な用語に関しては「道路構造令の解説と運用（令和3年3月版）」（日本道路協会、2021年4月）に、融雪設備の基本的な用語については「消融雪設備点検・整備標準要領（案）」³⁾及び「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾に準拠する。

第2章 技術の概要及び評価

§5 本技術の目的

本技術は、口径 250 mm 以上かつ 800 mm 以下の下水道管路を対象に、更生工事と同時に採熱管を設置し、熱交換により回収した下水熱を車道の融雪に用いることで、従来技術と比較してコストやエネルギー消費量、温室効果ガス排出量の削減を図ることを目的としている。

【解説】

これまでの融雪設備は、電熱方式や石油焚き温水ボイラー方式が主流で、熱需要者である道路管理者ならびに道路利用者のニーズで導入されているものが多い（図 2-1）。一方、エネルギー需給問題や温室効果ガス排出による地球温暖化問題、SDGs への取組み等から、今後はエネルギー及び温室効果ガスに配慮した施設の導入が重要となる。

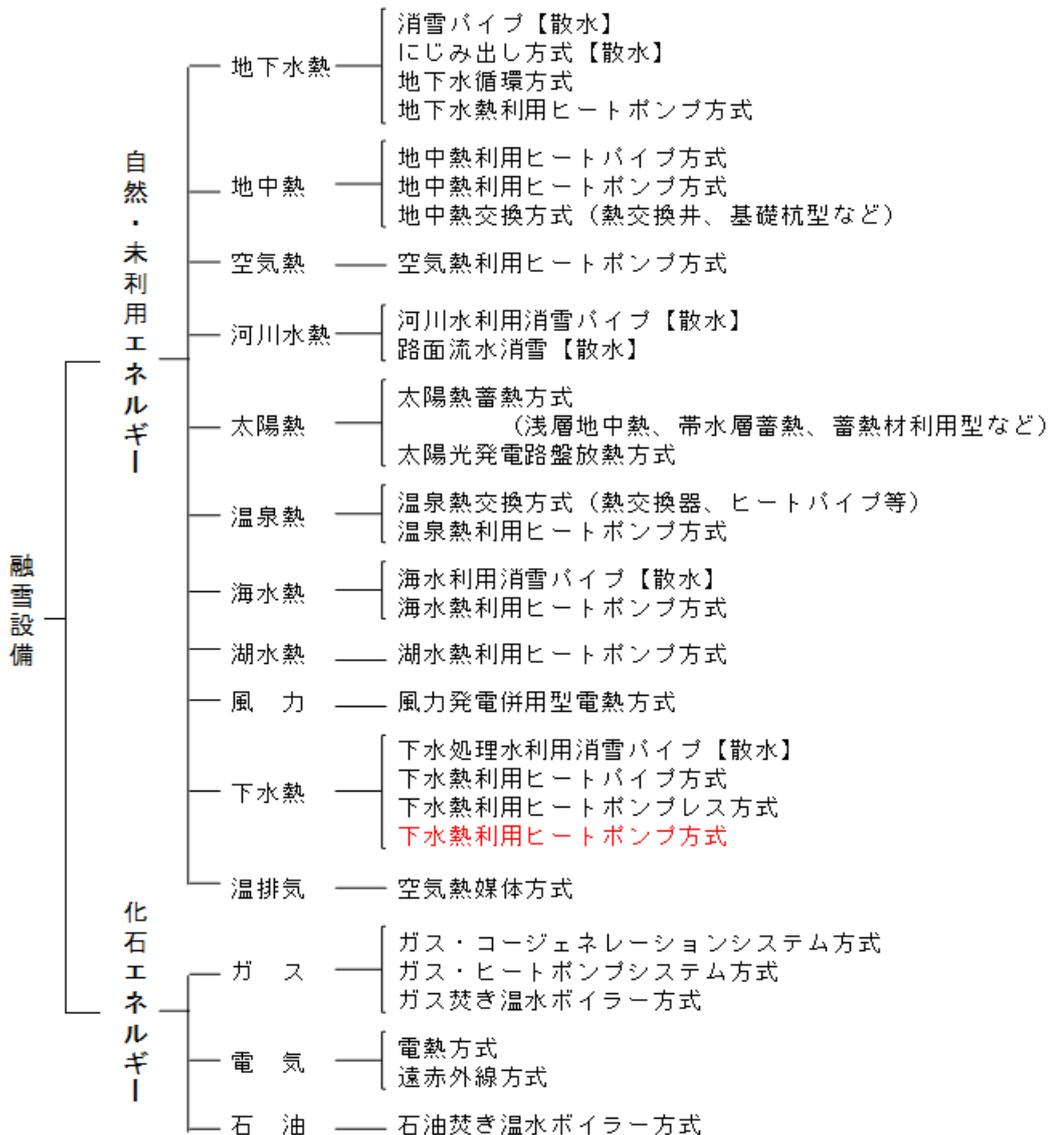


図 2-1 融雪設備の例¹⁾

従来技術では、融雪のために必要なエネルギーとして電力や石油等を利用しているが、本技術は下水熱を用いた技術であり、図 2-1 の「下水熱利用ヒートポンプ方式」に該当する。下水熱は未利用エネルギーであり、下水道が整備された都市であれば、安定的かつ豊富に存在している²⁾。このため、従来技術に比較して、融雪に要するコスト、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量の削減が期待できる。さらに、口径 250 mm 以上かつ 800 mm 以下の下水道管路の更生工事と同時に採熱管の設置を行うことで、これまで難しかった口径 800 mm 以下での下水熱の利用を可能にするるとともに、採熱管の設置に掛かるコストを削減することが可能である。

§6 本技術の適用条件

本技術は、下水道管路の更生にあわせて導入する技術であり、以下の条件を勘案して適用する。

- (1) 融雪箇所
- (2) 採熱設備を設置する下水道管路

【解説】

(1) 融雪箇所

本技術における融雪対象は車道とする。なお、交差点付近や横断歩道、片側一車線の一部区間等凍結しやすく安全性を確保したい、比較的狭い範囲での活用が効果的である。

(2) 採熱設備を設置する下水道管路

本技術は、口径 250 mm 以上かつ 800 mm 以下の下水道管路を対象に、更生工事と同時に採熱管を設置する場合に適用可能な技術である。したがって、採熱設備の設置予定箇所において、老朽化対策等として管路更生を別途検討している必要がある。

§7 本技術の内容

本技術は、下水道管路内に更生工事と同時に設置する採熱管によって、下水熱を回収するとともに、自動制御を用いてヒートポンプ運転とヒートポンプレス運転とを効率的に切り替え、道路融雪を行うものである。以下の設備から構成される。

- (1) 放熱設備
- (2) 採熱設備
- (3) 操作・制御設備

【解説】

本技術は、熱源として下水熱を利用するとともに、ヒートポンプ運転とヒートポンプレス運転とを複数のセンサ感知により自動的に判断し、融雪を行うシステムである。具体的には、下水熱のみで融雪を行うヒートポンプレス運転を優先し、ヒートポンプレス運転では融雪が困難な条件となった場合のみヒートポンプ運転を実施することで、従来技術に対し、コスト、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量の削減を図ることができる。

本技術の導入イメージを図 2-2 に示す。採熱管の設置は管路更生工事と合わせて実施する必要がある。実証研究の更生工事には、日本下水道新技術機構「建設技術審査証明 下水道管きよの更生工法（自立管）-形成工法- アルファライナー工法」を採用した。

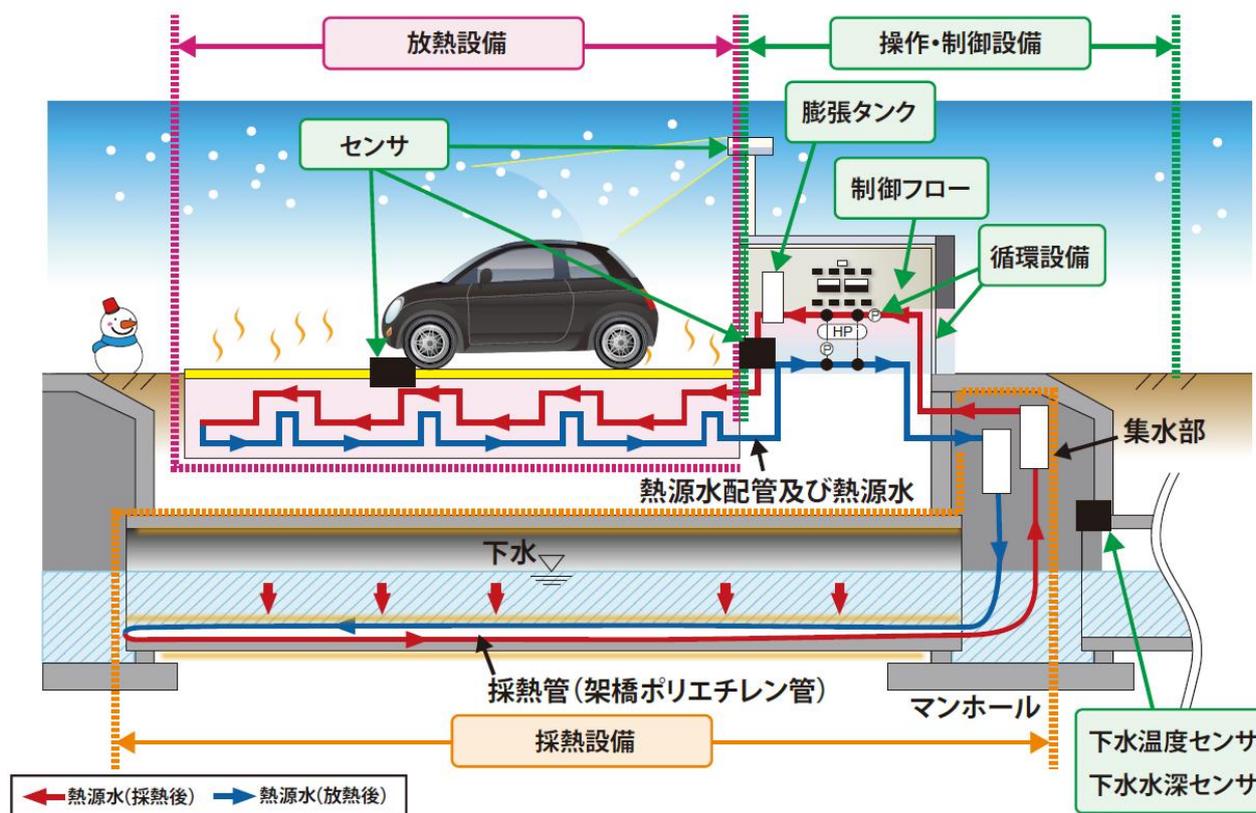


図 2-2 システム導入イメージ

(1) 放熱設備

放熱設備とは、回収した熱源を融雪に活用する設備であり、放熱管が該当する。放熱管は設備内に埋設された小口径の金属管や樹脂管のことである。本技術ではヒートポンプを採用することで、電気

エネルギーにより低温の熱源（回収した下水熱）から高温の熱をつくり、大きな熱エネルギーとして融雪に適した温度で利用できる。参考までに実証研究で採用した仕様について表 2-1 に示す。また、具体的な設計については § 15 放熱設備の設計に示す。なお実証研究では、熱伝導性の観点から樹脂管ではなく金属管を用いることとし、引張強度の高さに加え腐食（錆）に対する耐性を考慮しステンレス管を採用した。

表 2-1 実証研究で採用した放熱管

項目	仕様
管種	ステンレス鋼管
寸法	内径 0.0143m、外径 0.0159m、管厚 0.0008m
熱伝導率	16.0 W/m°C
口径	15A (JIS G 3444)

(2) 採熱設備

採熱設備とは、下水から熱を回収するための設備であり、採熱管及び集水部から構成される。採熱管は下水から熱を回収するために下水道管路内に設置し（図 2-3）、集水部は回収した熱を集約する目的でマンホール内に配置する。

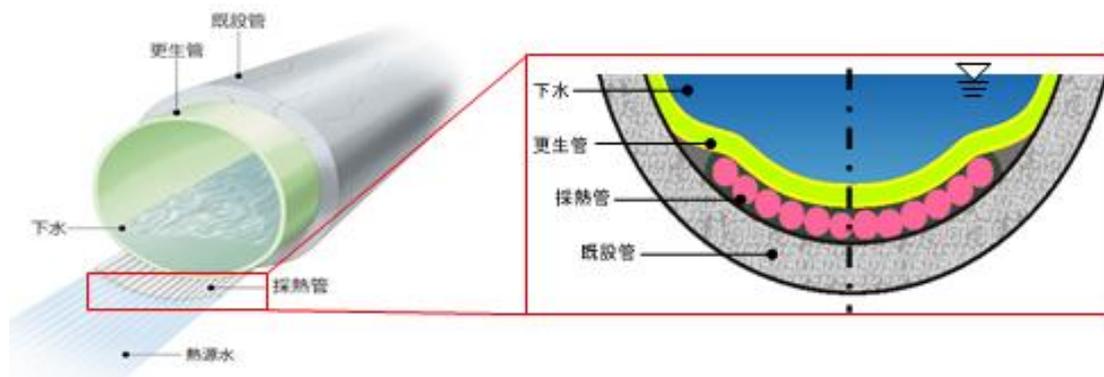


図 2-3 採熱管概略図（左：全体図、右：拡大図）

①採熱管

本技術では、管路更生工事と同時に採熱管を設置する。そのため、本技術で使用する採熱管が設置可能である更生工法を採用する必要がある。実証研究では、アルファライナー工法を採用し、採熱管は架橋ポリエチレン管を、熱源水配管はポリブテン管を採用した。その仕様を表 2-2 に示す。

表 2-2 実証研究で採用した採熱管及び熱源水配管の仕様

項目	仕様		
	採熱管：架橋ポリエチレン管	熱源水配管：ポリブテン管	
寸法	内径 0.010m 外径 0.013m 管厚 0.0015m	採熱側 内径 0.030m 外径 0.037m 管厚 0.00355m	放熱側 内径 0.025m 外径 0.031m 管厚 0.0029m
熱伝導率	0.35 W/m°C	—	—

採熱管は、写真2-1のとおりマット状に加工を行い、下水道管路内に引き込んで、更生工事と同時に固定した。



写真2-1 実証研究で採用したマット状の採熱管（左）及び熱源水配管（右）

②集水部

放熱管と採熱管の口径や本数が異なる場合は、放熱管と採熱管を連結する熱源水配管と接続するために、必要に応じて写真 2-2 のような集水部を設置する。なお、集水部の材質は放熱性の低いものが望ましい。

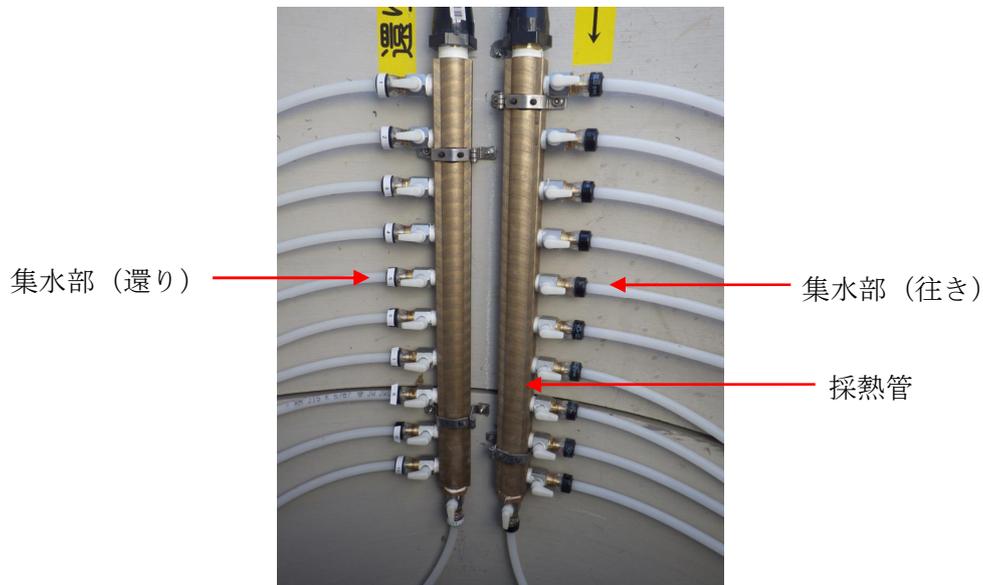


写真 2-2 マンホール内での集水部の設置例

(3) 操作・制御設備

操作・制御設備とは、図 2-2 に示すシステムを操作・制御するための設備であり、図 2-4 に示す①制御フロー、②センサ、③循環設備で構成される。本設備は、自動制御を用いており、制御フローと呼ぶプログラムによって施設を運転する。

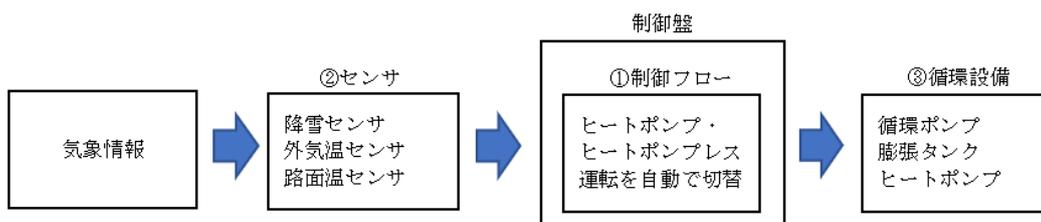


図 2-4 操作・制御設備の構成

①制御フロー

制御フローとは、機械がセンサから得た情報をもとに自動的に運転を制御するためのプログラムのことである。具体的には、ヒートポンプ運転とヒートポンプレス運転との切替え判断や、施設自体の運転の開始・停止をプログラムしたものである。

具体的な制御フローの構築方法については、**§ 17 操作・制御設備の設計**に示す。

制御フローは、機械を制御する電気制御機器や電気部品を収納した制御盤の内部に組み込まれる。制御盤は、運転状況を目視で確認でき、手動で運転の切替え操作が可能であることが必要である。

計測記録を蓄積できる仕様にするのが望ましい。実証研究では**写真 2-3**に示す外観の制御盤を設置した。



写真 2-3 制御盤の設置例（制御盤面）

②センサ

本技術で必要なセンサは、降雪センサ、外気温度センサ、路面温度センサ、熱源水温度センサ、熱源水圧力センサ、下水温度センサ、下水水深センサであり詳細を以下に示す。具体的なセンサの選定については、**§ 17 操作・制御設備の設計**に示す。

・降雪センサ

降雪センサは、降雪の有無による自動運転制御のために設置する。使用する降雪センサは、設置予定の現地条件等を考慮して選定する。実証研究で用いた機器の仕様を**表 2-3**に示す。

表 2-3 実証研究で採用した降雪センサ

項目	仕様
適用範囲	-10～40 ℃
雪片数のカウント数	3～100 個
計測間隔	1～15 min
計測方式	非接触式（光型）

- ・外気温度センサ

外気温度センサは、外気温度による自動運転制御のために設置する。使用する外気温度センサの形状は問わず、設置予定の現地条件等を考慮して選定する。実証研究で用いた機器の仕様を表 2-4 に示す。

表 2-4 実証研究で採用した外気温度センサ

項目	仕様
適用範囲	-10～90 °C
精度	±0.30 °C
計測方式	接触式（白金抵抗素子）

- ・路面温度センサ

路面温度センサは、路面温度による自動運転制御及び路面への放熱量を管理するために必要に応じて設置する。使用する路面温度センサは、設置予定の現地条件等を考慮して選定する。実証研究で用いた機器の仕様を表 2-5 に示す。

表 2-5 実証研究で採用した路面温度センサ

項目	仕様
適用範囲	-10～90 °C
精度	±0.15 °C
計測方式	接触式（白金抵抗素子）

- ・熱源水温度センサ

熱源水温度センサは、下水からの採熱量及び路面への放熱量を管理するために必要に応じて設置する。使用する熱源水温度センサは、設置予定の現地条件等を考慮して選定する。実証研究で用いた機器の仕様を表 2-6 に示す。

表 2-6 実証研究で採用した熱源水温度センサ

項目	仕様
適用範囲	-10～90 °C
精度	±0.10 °C
計測方式	接触式（白金抵抗素子）

- ・熱源水圧力センサ

熱源水圧力センサは、漏水等の異常が発生すると機械が停止するため、漏水していないことを確認し、施設管理を行うために必要に応じて設置する。使用する熱源水圧力センサは、設置予定の現地条件等を考慮して選定する。実証研究で用いた機器の仕様を表 2-7 に示す。

表 2-7 実証研究で採用した熱源水圧力センサ

項目	仕様
適用範囲	0～1.0 MPa
精度	±0.001 MPa
計測方式	接触式（ダイヤフラム）

- ・下水温度センサ

下水温度センサは、下水からの採熱量を管理するために必要に応じて設置する。使用する下水温度センサは、設置予定の現地条件等を考慮して選定する。実証研究で用いた機器の仕様を表 2-8 に示す。

表 2-8 実証研究で採用した下水温度センサ

項目	仕様
適用範囲	-10～90 °C
精度	±0.1 °C
計測方式	非接触式（赤外線）

- ・下水水深センサ

下水水深センサは、設置した採熱管を満たす水位であることを確認し、下水から得られる熱量を安定的に確保できるよう施設管理するために必要に応じて設置する。使用する下水水深センサは、設置予定の現地条件等を考慮して選定する。実証研究で用いた機器の仕様を表 2-9 に示す。

表 2-9 実証研究で採用した下水水深センサ

項目	仕様
適用範囲	0 mm～満管
精度	±1.0 mm
計測方式	非接触式（超音波）



写真 2-4 屋外でのセンサの設置例（左：降雪センサ、右：外気温度センサ）

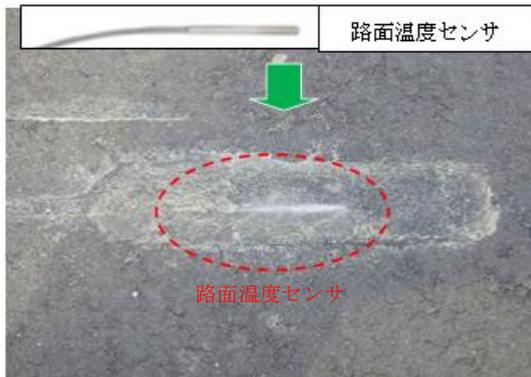


写真 2-5 路面温度センサの設置例



写真 2-6 熱源水温度センサの設置例



写真 2-7 熱源水圧力センサの設置例



写真 2-8 下水温度・下水水深センサの設置例
（マンホール内）

③循環設備

循環設備とは、熱源水を融雪設備内に循環する設備であり、写真 2-9 のとおりヒートポンプ、循環ポンプ、膨張タンク、熱源水配管及び熱源水で構成される。各機器の詳細な仕様について以下に示す。具体的な設計については、§ 17 操作・制御設備の設計に示す。

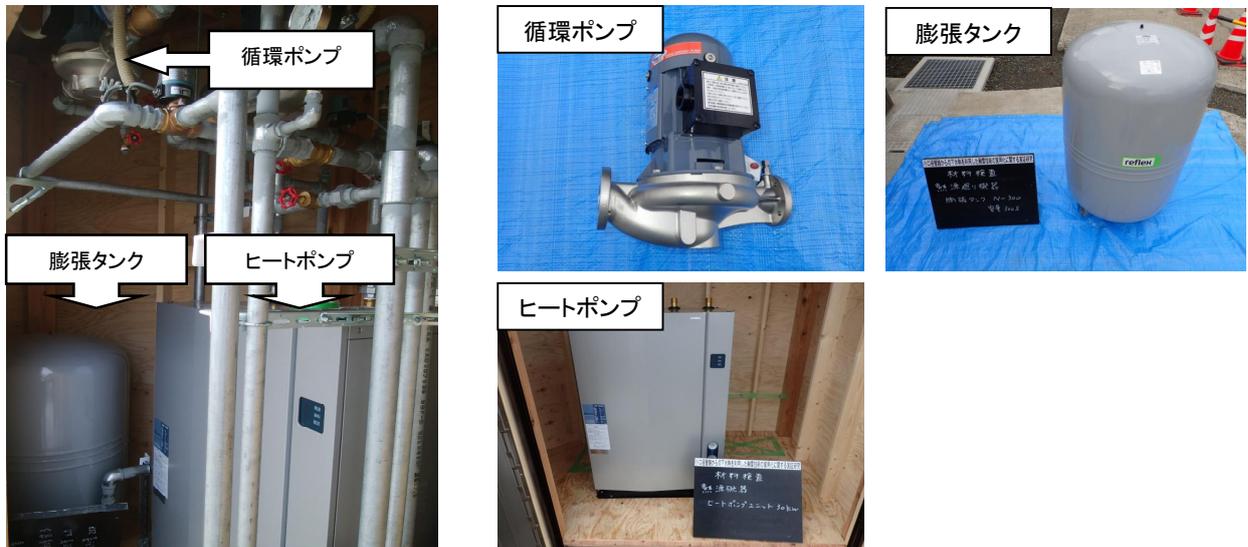


写真 2-9 循環設備の設置例

・ヒートポンプ

ヒートポンプは、現地の降雪量が増加し、ヒートポンプレス運転時に回収した熱だけでは融雪が困難となる場合に、電気エネルギーを利用して熱を温度の低いところから高いところへ移動させる機器設備である。これにより、低温の熱源から高温の熱をつくり大きな熱エネルギーとして利用できる。本技術では水熱源式を用いている。

・循環ポンプ

循環ポンプは、液体である熱源水を融雪設備内に循環させるために送り出す設備であり、採熱設備、放熱設備それぞれに配置する。実証研究で用いた循環ポンプの仕様を表 2-10 に示す。

表 2-10 実証研究で採用した循環ポンプ

	仕様
採熱側吐出量	0～200 l/min
放熱側吐出量	0～100 l/min
採熱側全揚程	5.8～17 m
放熱側全揚程	5.2～14 m
採熱側ポンプ出力	0.15～2.2 kW
放熱側ポンプ出力	0.15～2.2 kW
許容圧力	0.2 MPa

本技術は、図 2-5 に示す循環ポンプを放熱側と採熱側に 1 台ずつ設置するシステムである。ヒートポンプレス運転時には、採熱側に設置する循環ポンプ 1 台のみが稼働することで、下水から回収した熱を直接、放熱設備へ循環する仕組みである。一方、ヒートポンプ運転時には、放熱側と採熱側で分離された配管内にて、それぞれの循環ポンプ 2 台が稼働する 2 系統の仕組みとなる。

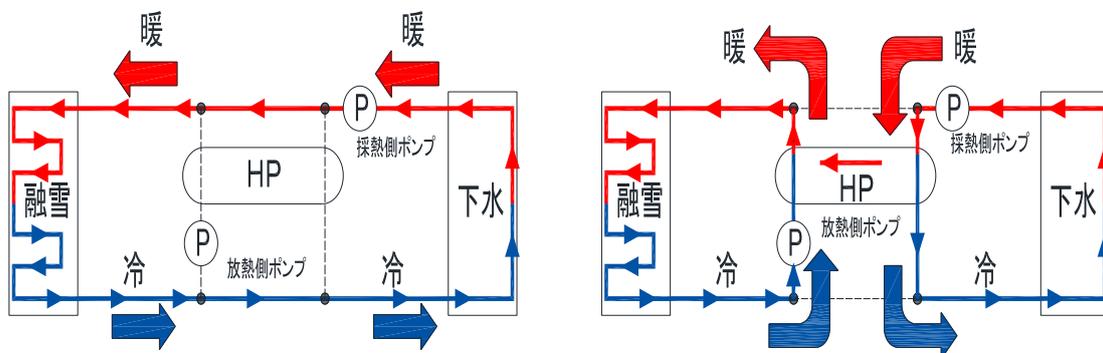


図 2-5 システムの状況（左：ヒートポンプレス運転、右：ヒートポンプ運転）

・膨張タンク

膨張タンクは、熱源水が温度の上昇により体積が膨張するため、配管内の圧力を抑制する目的で設置する。実証研究で用いた膨張タンクの仕様を表 2-11 に示す。

表 2-11 実証研究で採用した膨張タンク

項目	仕様
形式	密閉式
容量	50～600 ℓ
最高圧力	0.2 MPa

・熱源水配管及び熱源水

熱源水配管は、採熱設備と操作・制御設備及び放熱設備とを接続する配管のことで、配管内に熱源水が流れている。また、使用する熱源水は、凍結防止のために不凍液を用いることを原則とする。

§8 実証研究に基づく本技術の評価

実証研究に基づき、以下の項目について従来技術と比較し、本技術の評価を行った。

- (1) 総費用（年価換算値）
- (2) エネルギー消費量
- (3) 温室効果ガス排出量

【解説】

実証研究での計測期間は、平成30年度及び令和元年度の2年間であり、研究1年目及び研究2年目に得た結果から評価した結果を以下に示す。

従来技術は、道路融雪での実績が多い石油焚き温水ボイラー方式、電熱方式の2種類とした。石油焚き温水ボイラー方式は、図2-6のとおり灯油を燃料とする温水ボイラーによって、熱源水の温度を上昇させ、これを車道下に設置した放熱管に循環させることで融雪する施設である。電熱方式は、図2-7のとおり車道下に設置した放熱線に電気を通して温度を上昇させ、融雪する施設である。

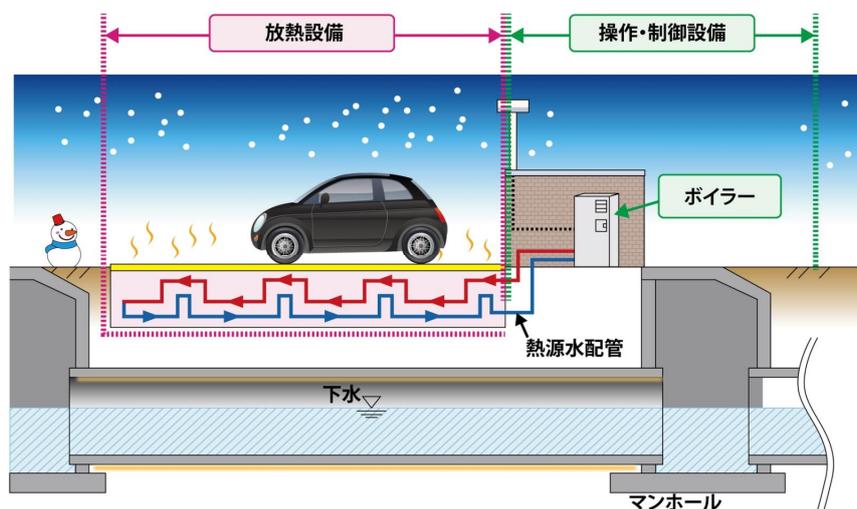


図 2-6 従来技術（石油焚き温水ボイラー方式）の施設イメージ

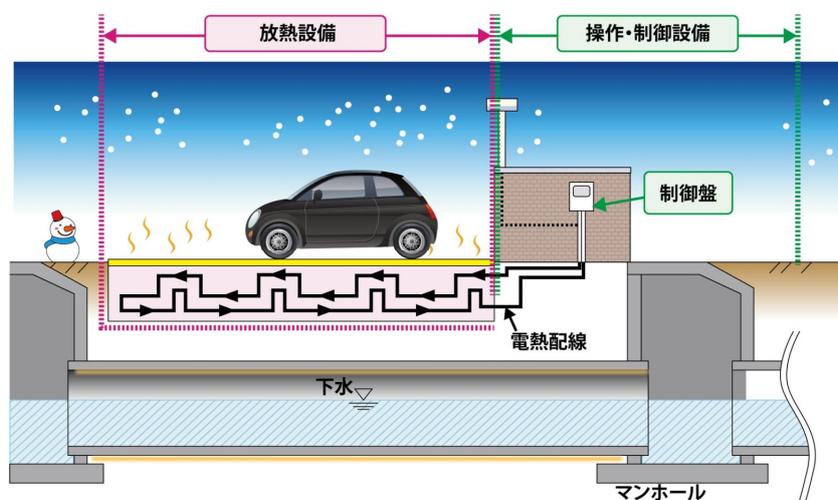


図 2-7 従来技術（電熱方式）の施設イメージ

(1) 総費用（年価換算値）

本技術及び従来技術における総費用（年価換算値）は、式 2-1 より算出し、従来技術に対する削減率により本技術の評価を行う。

$$C_l = C_y + C_m \dots\dots\dots \text{式 2-1}$$

ここに、 C_y ：建設費（年価換算値）（千円/年）

$$C_y = C_i \times i(1+i)^n / ((1+i)^n - 1)$$

C_i ：初期投資額（千円）

i ：割引率（= 2.3%）

n ：耐用年数（年）

C_m ：維持管理費（千円/年）

$$\text{削減率} = \frac{\text{（従来技術の総費用（年価換算値））} - \text{（本技術の総費用（年価換算値））}}{\text{従来技術の総費用（年価換算値）}}$$

本技術及び従来技術の総費用（年価換算値）を同じ条件で算出するため、表 2-12 のとおり、構成モデルを作成した。総費用（年価換算値）は、このモデルを用いて、§ 11 導入効果の検討に基づき算出した。

表 2-12 総費用（年価換算値）の構成モデル※1

			設定
①利用規模（最大負荷）			11.4 kW
②融雪面積	融雪面積 50 m ² （計画熱負荷 228 W/m ² ）		50 m ²
③採熱設備	下水道管路の口径		400 mm
	採熱管本数		24 本
	採熱延長		102.8 m × 2 系統
④総費用算出期間			50年
⑤定期点検			年 1 回
⑥設備の耐用年数	放熱設備	本技術：4 パネル（1 パネルあたりの設置面積 12.5m ² 、1 パネルあたりの放熱管延長 20m）	15 年
		従来技術（石油焼き温水ボイラー方式）：4 パネル（1 パネルあたりの設置面積 12.5m ² 、1 パネルあたりの放熱管延長 20m）	放熱管 15 年
		従来技術（電熱方式）：電熱線出力 25W/m、総延長 L=600m（30 本 x20m、配線間隔 83.0mm）	放熱線 15 年
	採熱設備	本技術	採熱管 50 年
			集水部 50 年
	操作・制御設備	本技術	制御盤 15 年
従来技術（石油焼き温水ボイラー方式）		センサ 15 年	

		従来技術（電熱方式）		15年
		本技術	循環設備	15年
		従来技術（石油焚き温水ボイラー方式）	／熱源水	15年
⑦運転時間	冬期間における施設の稼働時間			2,904 h/年
⑧運転時費用	灯油 ^{※2}	1ℓ当たり		86円/ℓ
		電力基本料金		1,944円/月
		最初の120 kWhまで		18.24円/kWh
		120 kWhを超えて300 kWhまで		24.87円/kWh
		300 kWhを超える		28.75円/kWh
	電気 ^{※3}	1 kWh 当たり		11.75円/kWh
		基本料金	3か月まで ^{※4}	1,922.4円/月
基本料金		3か月超 ^{※5}	453.6円/月	

※1 建設費（年価換算値）は、融雪部・制御盤部を含んだ金額、採熱設備は本技術のみ計上。

※2 配達価格・JA 十日町市 2019.2.9 調査を使用。

従来技術の石油焚き温水ボイラー方式の電気料金は東北電力の「従量電灯 B」（平成 31 年 3 月時点）を参考。

※3 従来技術の電熱方式の電気料金は東北電力の「よりそう C スノー B」（平成 31 年 3 月時点）を参考。

※4 研究 1 年目は、施設の稼働期間が 3 か月を超えなかったため、こちらを適用。

※5 研究 2 年目は、施設の稼働期間が 3 か月を超えたため、こちらを適用。

①利用規模

実証研究で対象とした面積から設定した。

②融雪面積

「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾の考え方にに基づき、十日町市の気象条件（冬期間における合計降雪量の過去 10 年間の平均値）から算出。単位面積当たりの熱負荷 228 W/m² に利用規模（最大負荷）を考慮して融雪面積を 50 m² と設定した。

③採熱設備

採熱管本数： 実証研究では、管路更生工事としてアルファライナー工法を用いて採熱管を設置している。採熱管の設置本数は、§ 16 採熱設備の設計 表 4-5 の早見表から決定した。現地の口径は、400 mm であることから、早見表によると必要となる最低水深は 55 mm になる。それに対して、現地で計測した最低水深 62.2 mm であることから、水面下に設置できる採熱管の最大本数 24 本を設置した。
採熱延長： 下水温度 13.5 °C（実証研究箇所の計測下水温度）としたとき、必要熱量 11.4 kW に対して 8.0 kW の採熱量が見込めるとともに、管路更生の延長となる 102.8 m を設定した。

④総費用算出期間

採熱設備の耐用年数 50 年に合わせて設定した。

⑤定期点検

降雪期前に年 1 回点検する³⁾こととして設定した。

⑥設備の耐用年数

実証研究で用いた各設備の耐用年数を表 2-13 に示す。維持管理費を算出する場合は、これらを参考に補修費用や更新費用を計上することとした。

なお、本技術で使用するヒートポンプは、利用規模（最大負荷）から下水の採熱量を差し引いた分以上の性能となる機器、石油焚き温水ボイラー方式で使用するボイラー及び電熱方式で使用する電熱線は、利用規模（最大負荷）を満足する機器をそれぞれ使用した。また、循環ポンプを含めて施設規模に応じた汎用性の機器類を使用することとした。

表 2-13 実証研究で用いた各設備の耐用年数

各設備	機器	耐用年数
放熱設備	放熱管	15 年 ^{※1}
	放熱線	15 年 ^{※1}
採熱設備	採熱管	50 年 ^{※2}
	集水部	50 年 ^{※2}
操作・制御設備	制御盤	15 年 ^{※1}
	循環設備（熱源水）	15 年 ^{※2}
	循環設備（循環ポンプ）	15 年 ^{※1}
	循環設備（膨張タンク）	15 年 ^{※1}
	センサ	15 年 ^{※1}
	循環設備（ヒートポンプ）	15 年 ^{※2}
	ボイラー	15 年 ^{※1}

※1 「設備の区分及び標準耐用年数 平成 3 年 4 月 23 日付国土交通省事務連絡別表（平成 15 年 6 月 19 日改正）」

※2 メーカーへのヒアリングより

⑦運転時間

運転時間は、冬期間における施設の稼働時間として設定する。実証研究では、冬期間の全時間 2,904 h/年（= 121 日/年 × 24 h）とした。なお本技術においては、ヒートポンプ運転が 2,904 時間稼働する設定としている。

⑧運転時費用

運転時費用は、⑦で算出した運転時間に対して、本技術及び電熱方式は電気の消費電力を用いて、石油焚き温水ボイラー方式は灯油の消費量と電気の消費電力を用いてそれぞれ算出した。

以上の設定に基づき、式 2-1 を用いて総費用（年価換算値）を算出した。結果を表 2-14、図 2-8 に示す。各技術の総費用（年価換算値）は、本技術が 693 千円/年、石油焚き温水ボイラー方式が 829 千円/年、電熱方式が 1,450 千円/年となった。本技術を導入した場合の削減率は、石油焚き温水ボイラー方式に対して 16%、電熱方式に対して 52%となった。算出の詳細については、資料 A.2.2 導入効果の検討を参照すること。

表 2-14 総費用（年価換算値）の算出結果（融雪面積 50 m²—228 W/m² 想定）

	費用			削減率	
	本技術 A	従来技術		石油焚き温水 ボイラー方式比 (B - A) / B	電熱方式比 (C - A) / C
		石油焚き温水 ボイラー方式 B	電熱方式 C		
建設費（年価換算値）	487 千円/年	318 千円/年	358 千円/年	-53%	-36%
維持管理費	206 千円/年	511 千円/年	1,092 千円/年	60%	81%
総費用（年価換算値）	693 千円/年	829 千円/年	1,450 千円/年	16%	52%

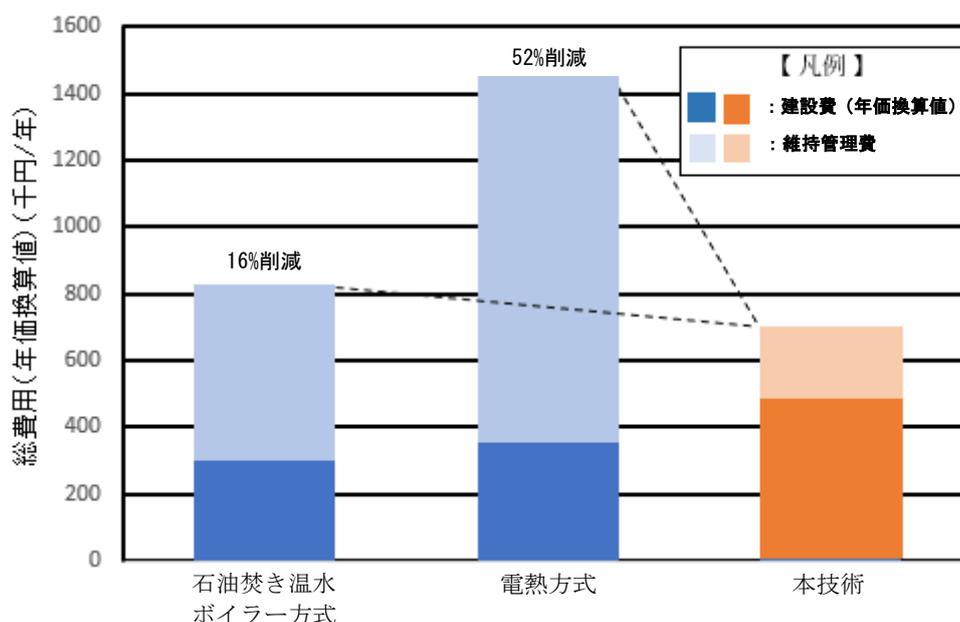


図 2-8 総費用（年価換算値）の比較

(2) エネルギー消費量

本技術では、冬期間の運転時に使用する消費電力量を示す。同じ降雪条件に対して同じだけ融雪運転したと仮定し、従来技術と比べてどのくらいエネルギー消費量を削減していたかを算出し、以下の方法で評価を行う。冬期間におけるエネルギー消費量 W (kWh) は式 2-2 により算出する。

$$W = W_s \times t \quad \dots\dots\dots \text{式 2-2}$$

ここに、 W_s : 熱源・ポンプ機器の 1 時間当たりの消費電力 (kW)

t : 冬期間における施設の稼働時間 (h)

$$\text{削減率} = \frac{(\text{従来技術のエネルギー消費量} - \text{本技術のエネルギー消費量})}{\text{従来技術のエネルギー消費量}}$$

$$W = W_q \times T \dots\dots\dots \text{式 2-3}$$

ここに、 W ：石油焚き温水ボイラー方式での冬期間における灯油分のエネルギー消費量 (kWh)

W_q ：灯油による 1 時間当たりの消費電力 (kW)

T ：冬期間における施設の稼働時間 (h)

$$W_q = W_h \times (J_h \times L_h)$$

ここに、 W_h ：0.278 (kWh/MJ：灯油による発熱量を消費電力量に変換するための換算値)

J_h ：36.7 (MJ/l：1 l 当たりの灯油発熱量の換算値※)

※「事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン」(環境省総合環境政策局環境計画課、2017年3月)より

L_h ：1 時間当たりの灯油消費量 (l/h)

表 2-12 の構成モデルに基づき式 2-2 及び式 2-3 を用いて算出した。結果を表 2-15、図 2-9 に示す。

なお、② W_s ：熱源・ポンプ機器の 1 時間当たりの消費電力 (kW)は、選定した各機器の仕様より設定した。また、③ t ：冬期間における施設の稼働時間 (h)は、冬期間の全時間稼働させる想定とし、2,904 h/年 (12 月～3 月の時間：121 日 × 24 h) と設定した。

算出の結果、冬期間における各技術のエネルギー消費量は、本技術が 1,713 kWh、石油焚き温水ボイラー方式が 39,243 kWh、電熱方式が 33,106 kWh となった。また本技術を導入した場合の削減率は、石油焚き温水ボイラー方式に対しては 96%、電熱方式に対しては 95%となった。

なお、石油焚き温水ボイラー方式は、本技術や電熱方式とは異なり、運転のためのエネルギー源として電力及び灯油を用いることから、消費電力量と灯油消費量との合計がエネルギー消費量となる。そのため、石油焚き温水ボイラー方式のエネルギー消費量は、式 2-2 による消費電力量に基づくエネルギー消費量と、式 2-3 による灯油消費量によるエネルギー消費量を個別に算出した上で、これらの合計とした。

以上より、本技術を導入することで従来技術よりもエネルギー消費量の削減が可能であることが確認できた。算出の詳細については、資料 A.2.2 導入効果の検討を参照すること。

表 2-15 エネルギー消費量の削減率の算出結果

	本技術	従来技術	
		石油焚き温水ボイラー方式	電熱方式
①利用規模 (kW)	11.4	11.4	11.4
② W_s ：熱源・ポンプ機器の 1 時間当たりの消費電力 (kW)	0.59	0.25	11.4
③ t ：冬期間における施設の稼働時間 (h)	2,904	2,904	2,904
④ W ：冬期間におけるエネルギー消費量 (kWh)	1,713	39,243	33,106
⑤削減率	—	96%	95%

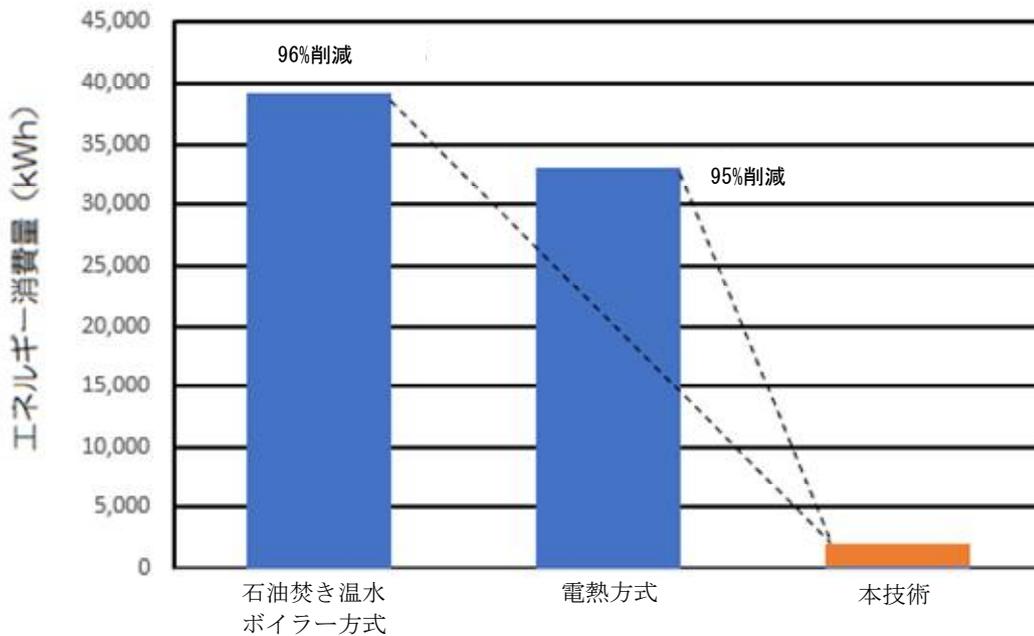


図 2-9 エネルギー消費量の比較

(3) 温室効果ガス排出量

本技術の運転により排出される温室効果ガス排出量を算出し、以下の方法で評価を行った。

(2) で算出した冬期間におけるエネルギー消費量 W (kWh) に、温室効果ガス排出係数 e (kg-CO₂/kWh) を乗じ、冬期間における温室効果ガス排出量 G (kg-CO₂) を算出する (式 2-4)。なお、温室効果ガス排出係数は地域と年度ごとに異なるため、実際に設置する年度・地点に応じた数値を用いる。

$$G = e \times W \quad \text{式 2-4}$$

ここに、 W : 冬期間におけるエネルギー消費量 (kWh)

e : 温室効果ガス排出係数 (kg-CO₂/kWh) 「電気事業別排出係数一覧」「電気事業者別排出係数 (特定排出者の温室効果ガス排出量算定用) (H30.12.27 環境省・経済産業省公表)」より

また、石油焼き温水ボイラー方式の温室効果ガス排出量 G_q (kg-CO₂) については、灯油を燃焼していることから、消費電力量と灯油使用量毎に算出し、合計した値を温室効果ガス排出量とする。

$$G_q = (e \times W_p) + (e_q \times Q_q) \quad \text{式 2-5}$$

ここに、 e : 温室効果ガス排出係数(kg-CO₂/kWh) 「電気事業別排出係数一覧」「電気事業者別排出係数 (特定排出者の温室効果ガス排出量算定用) (H30.12.27 環境省・経済産業省公表)」より

W_p : 冬期間における石油焼き温水ボイラー方式の消費電力量 (kWh)

e_q : 2.50 (kg-CO₂/L: 灯油 1ℓ 当たりの温室効果ガス排出量の換算値*)

※「温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル (Ver.6) (令和 7 年 3 月) 環境省)」⁸⁾

Q_q : 冬期間における灯油使用量 (L)

$$\text{削減率} = \frac{(\text{従来技術の温室効果ガス排出量} - \text{本技術の温室効果ガス排出量})}{\text{従来技術の温室効果ガス排出量}}$$

構成モデルに基づき、§ 8 評価項目に示した構成モデルに基づき、式 2-4 及び式 2-5 を用いて算出した。結果を表 2-16、図 2-10 に示す。算出の結果、冬期間における各技術の温室効果ガス排出量は、本技術が 849.8 kg-CO₂、石油焚き温水ボイラー方式が 9,797.5 kg-CO₂、電熱方式が 16,420.4 kg-CO₂ となった。また、本技術を導入した場合の削減率は、石油焚き温水ボイラー方式に対して 91%、電熱方式に対して 95%となった。

以上より、本技術を導入することで従来技術よりも温室効果ガス排出量の削減が可能であることが確認できた。算出の詳細については、資料 A.2.2 導入効果の検討（3）温室効果ガス排出量を参照すること。

表 2-16 温室効果ガス削減量の削減率の算出結果

	本技術	従来技術	
		石油焚き温水ボイラー方式	電熱方式
①利用規模 (kW)	11.4	11.4	11.4
② W_s : 熱源・ポンプ機器の1時間当たりの消費電力 (kW)	0.59	0.25	11.4
③t: 冬期間における施設の稼働時間 (h)	2,904	2,904	2,904
③W: 冬期間におけるエネルギー消費量 (kWh)	1,713	39,243	33,106
⑤ W_p : 冬期間における石油焚き温水ボイラー方式のエネルギー消費量 (kWh)	—	726	—
⑥e: 電力による温室効果ガス排出係数 (kg-CO ₂ /kWh)	0.496	0.496	0.496
⑦ e_q : 灯油による温室効果ガス排出係数 (kg-CO ₂ /L)	—	2.5	—
⑧ Q_q : 冬期間における灯油使用量 (L)	—	3,775	—
⑨G: 冬期間における温室効果ガス排出量 (kg-CO ₂)	849.8	9,797.5	16,420.4
⑩削減率	—	91%	95%

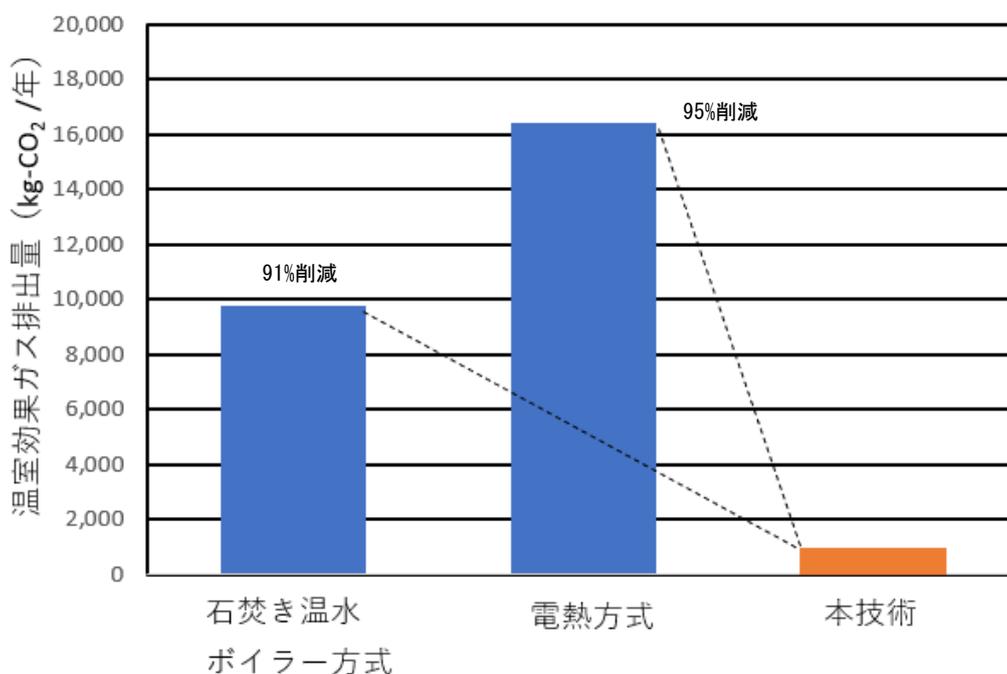


図 2-10 温室効果ガス排出量の比較

第3章 導入検討

§9 導入検討の手順

本技術の導入検討にあたっては、下水道設備及び道路設備さらに周辺地域の現況及び課題等を把握した上で導入効果の評価を行い、本技術の導入について判断する。

【解説】

導入目的を明確にしたのち、基礎調査を行い、§8を参考に導入効果の検討を行う。

§ 10 基礎調査

基礎調査では、対象地域について以下の情報を把握する。

- (1) 放熱側情報
- (2) 採熱側情報
- (3) 周辺情報

【解説】

導入効果の検討に先立ち、放熱側、採熱側、周辺に関する情報を表 3-1 のとおり把握する。

表 3-1 導入検討における基礎調査項目の利用用途

基礎調査で把握する情報		導入検討等での利用用途
(1) 放熱側情報	①舗装構成	放熱設備設置後の原状復帰
	②気象条件	導入効果の検討 計画・設計（必要熱量の算出、操作制御設備の設計）
(2) 採熱側情報	①下水流量または水深	導入効果の検討
	②下水温度	計画・設計（採熱設備の設計）
	③下水道管路状況	適用条件を満たすことの確認
	④管路延長	導入効果の検討 計画・設計（採熱設備の設計）
(3) 周辺情報	①占用許可等の必要性	本技術の施工可否判定
	②支障物件の確認	本技術の施工可否判定
	③対象区間の管路更生に関する計画	採熱管を設置
	④機械室とセンサの設置場所	本技術の施工可否判定
	⑤関係法令・融雪に関する施設計画	法令・整備計画との適合性

(1) 放熱側情報

放熱側に関しては、以下の情報を収集する。

①舗装構成

融雪対象とする道路の舗装構成について道路管理者に確認する。

②気象条件

ここで得られた値は、§ 11 導入効果の検討における運転時間の設定に用いる。また、§ 14 必要熱量の算出に必要であるとともに、§ 17 操作・制御設備の設計において施設の制御フロー構築に必要なヒートポンプレス運転とヒートポンプ運転との切替え温度の設定に用いる。

・時間降雪深

冬期間における時間降雪深を収集する。現地で計測することが望ましいが、計測が難しい場合は、気象庁や各市町村で測定している近隣の観測所データ等を収集する。

・降雪密度

冬期間における降雪密度 (kg/m³)は、現地で計測することが望ましいが、計測が難しい場合は、気象庁や各市町村で測定している近隣の観測データ等を収集する。近隣のデータがない場合には、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾を参考に気温と時間降雪深との関係から降雪密度を整理する。

・風速

冬期間における現地での月の平均風速を収集する。現地で計測することが望ましいが、計測が難しい場合は、気象庁や各市町村で測定している近隣の観測データ等を収集する。

・外気温度

冬期間における現地での外気温度を1時間毎に収集する。現地での計測データを用いて冬期間での平均日最低外気温度で設定することが望ましいが、計測が難しい場合は、気象庁や各市町村で測定している近隣の観測データ等を収集する。

・路面温度

冬期間における現地での路面温度を収集する。路面温度は、運転制御に利用するために必要である。路面温度の計測も下水温度・水深の計測と同じ頻度で行い、計測期間での最小値を整理する。また、この値は、ヒートポンプレス運転からヒートポンプ運転へ切り替わる BASE 温度の設定に用いる。現地での計測データを用いて冬期間での平均日最低路面温度で設定することが望ましいが、計測が難しい場合は、近隣で路面温度を使用して融雪を行っている施設の設定データ又は気象条件が近い他都市の融雪施設の路面温度データを収集する。

(2) 採熱側情報

採熱側に関しては、以下の情報を収集する。

①下水流量及び水深

下水水深は、採熱管の本数を決めるために必要である。採熱設備を設置する予定の対象管路に流量計や水位計を一定期間設置し、現地で計測することを基本とする。現地での計測が難しい場合は、既存データを用いた以下の2つの方法により推計することも可能である。

- ・採熱地点における既存の流量計測データの活用： 放流水やポンプ場における揚水等、採熱地点やその近傍における流量データがある場合には、そのデータを活用する。
- ・既存の流量データに基づく流量推計： 対象地域内の下水道施設（下水処理場、ポンプ場）において計測されている下水流量から地域内のマンホールにおける流量を推計する方法である²⁾。各マンホールにおける下水流量は、式 3-1 で表される。また、下水流量推計のイメージは図 3-1 のとおりである。詳細は、「下水熱ポテンシャルマップ（広域ポテンシャルマップ）作成の手引き」⁷⁾を参照すること。

$$G_N = G_L \times \frac{\sum_{m=1}^N F_m}{\sum_{m=1}^L F_m} \dots\dots\dots \text{式 3-1}$$

- ここに、 G_N ：推定点（マンホール M_N ）における日平均下水流量 (m³/日)
- G_L ：流量既知点（下水処理施設等）における日平均実測下水流量 (m³/日)
- F_m ：各マンホール M_m が受け持つ集水域内の建物延床面積 (m²)
- N ：推定点（マンホール M_N ）の集水域内のマンホール数
- L ：流量既知点（下水処理場等）の集水域内のマンホール数

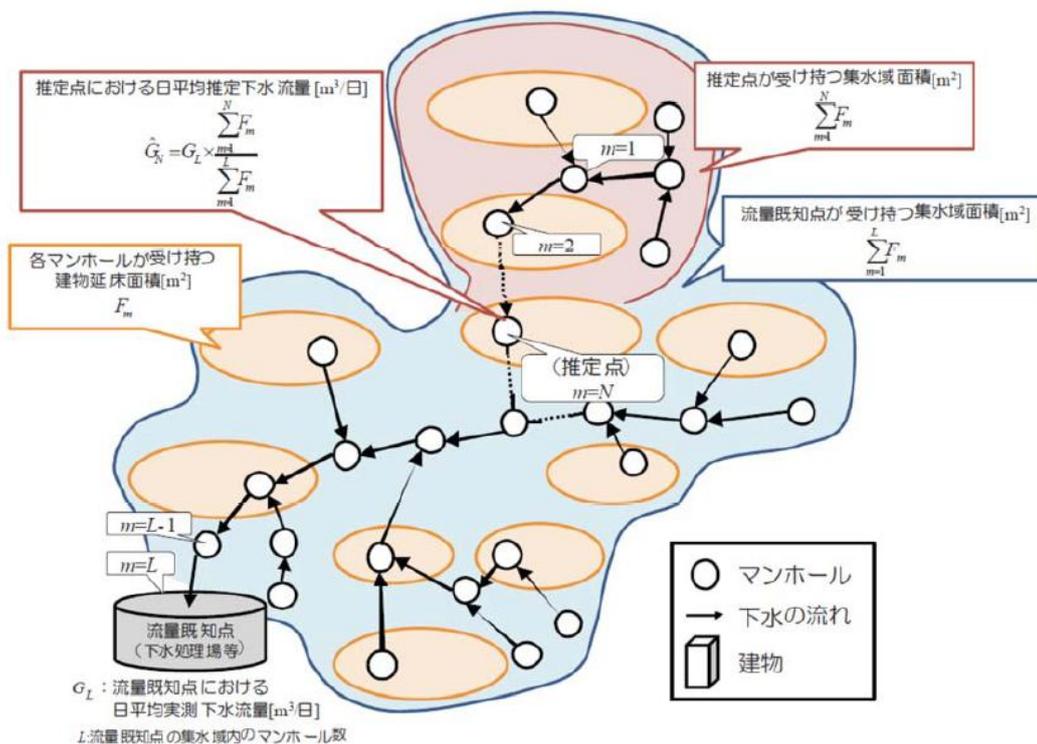


図 3-1 既存流量データに基づく下水流量の推計のイメージ⁶⁾

②下水温度

下水温度は採熱管の延長を決めるために必要であり、下水温度・水深ともに、対象区間での上下流 2 か所にて計測を行うことを基本とする。なお、本技術では採熱管の設置は、管路更生工事と合わせて実施するため、更生後の下水水深の変化を把握する目的からも更生工事の前後に調査を行うことが望ましい。下水温度は、写真 3-1 のように対象管路に温度センサを設置し、融雪を行う予定の一定期間のデータの取得が必要である。ただし、採熱地点もしくはその近傍における下水温度データがある場合には、そのデータを精査した上で参考値として利用することも可能である。



写真 3-1 下水温度・水深の計測例 (左: 水深センサ、右: 温度センサ)

③下水道管路状況

採熱設備の導入には、表 3-2 に示す点に留意し、1～5 の項目を確認する。そのため、下水道管理者が保有する下水道台帳や施設の完成図書等の資料を収集する。

表 3-2 下水道管路状況について把握する項目

No.	項目	備考
1	排除方式（分流式、合流式）	下水水深、温度データ
2	下水道管路の口径・管種	適用条件を参照
3	敷設後年数	更生工事、改修工事の計画
4	マンホールのサイズ、深さ	施工可否の判断
5	関連計画（長寿命化計画、耐震化計画等）	老朽化対策や耐震対策の必要性の判断

④管路延長

下水道台帳等から、採熱設備の設置を予定している下水道管路の延長を把握する。また、管路図から、取付け管やその他の障害物、マンホールとの取合いを調査し、採熱設備を敷設可能な管路延長を確認する。また、取付け管の位置や口径によっては、採熱設備の設置方法に影響を及ぼす可能性があるため、下水道管路内の調査を実施し、下水道台帳や管路図と合致することを確認する。

(3) 周辺情報

周辺について、以下の情報を把握する。

①占用許可等の必要性

通常、本技術のうち採熱設備は下水道施設に、放熱設備及び操作・制御設備は道路施設又はその周辺に設置することになるため、各施設管理者に対して占用許可の必要性や手続き等について確認する。

②支障物件の確認

本技術の設置にあたって支障となる可能性がある物件等について、表 3-3 に示すような水道・ガス・電気・通信・下水道等の占用物件の有無や情報を事前に収集し、確認する。

表 3-3 事前収集する情報及び資料入手先の例

入手内容	入手先の例	確認内容
土地所有者情報	法務局	・登記簿 ・公図
水道管	水道管理者	・設置位置 ・埋設深度
ガス管	ガス事業者	・設置位置 ・埋設深度
電力ケーブル (送電線、配電線)	電気事業者（送電担当、配電担当）	・電柱、架空線 ・設置位置 ・埋設深度
通信施設	通信関連事業者	・電柱、架空線 ・設置位置 ・埋設深度
下水道管路、取付け管	下水道管理者	・設置位置 ・埋設深度
その他埋設物	各施設管理者等	・設置位置 ・埋設深度

③対象区間の管路更生に関する計画

本技術は、管路更生工事と同時に採熱設備を設置する技術であるため、対象区間の管路更生に関する計画を調べ、更生時期や工法等について把握する。

④機械室及びセンサの設置場所

設置にあたっては、事前に現地を確認し、維持管理しやすい場所に設置することが望ましい。

⑤関連する条例及び融雪施設等に関する計画

本技術を設置するにあたって、導入地域における関連する条例及び融雪施設や除雪等に関する計画を確認する。

§ 11 導入効果の検討

§ 10 基礎調査で収集した情報を踏まえ、§ 8 で設定した評価項目について算出する。

- (1) 総費用 (年価換算値)
- (2) エネルギー消費量
- (3) 温室効果ガス排出量

【解説】

§ 8 実証研究に基づく本技術の評価を参考に、導入効果の検討に必要な各条件を整理した上で、本技術及び比較する従来技術について以下に基づき、総費用 (年価換算値)、エネルギー消費量及び温室効果ガス排出量を算出する。なお、実証研究での結果については、資料編 A.2.2 導入効果の検討(1) 総費用 (年価換算値) 2) 維持管理費を参照すること。

(1) 総費用 (年価換算値)

総費用 (年価換算値) C_l (千円/年) は、式 3-2 により算出する。

$$C_l = C_y + C_m \quad \text{式 3-2}$$

ここに、 C_y : 建設費 (年価換算値) (千円/年)

C_m : 維持管理費 (千円/年)

①建設費 (年価換算値)

建設費 (年価換算値) を算出する場合は、採熱設備、放熱設備、操作・制御設備等、本施設を構成する設備ごとに行う。建設費 (年価換算値) C_y (千円/年) は、初期投資額 C_i (千円) を踏まえ、式 3-3 により採熱設備、放熱設備、操作・制御設備等施設を構成する設備ごとに算出して合算する。

$$C_y = [i \times (1 + i)^n / ((1 + i)^n - 1)] \times C_i \quad \text{式 3-3}$$

ここに、 C_y : 建設費 (年価換算値) (千円/年)

C_i : 初期投資額 (千円)

i : 割引率 (= 2.3%)

n : 耐用年数

②維持管理費

年間の維持管理費 C_m (千円/年) を式 3-4 により算出する。

$$C_m = C_e + C_k \quad \text{式 3-4}$$

ここに、 C_e : 運転費 (千円/年)

C_k : 保守点検費 (千円/年)

算出の詳細については、資料編 A.2.2 導入効果の検討(1) 総費用 (年価換算値) 2) 維持管理費を参照すること。

・運転費: 運転費は、以下に示す算出方法を用いることを基本とする。まず、§ 10 基礎調査 (1) 放熱側情報 ②気象条件で収集したデータを基に、冬期間で想定される施設の最低稼働時間 T_h (h) を式 3-5 により算出する。

$$T_h = H / h_s \quad \text{式 3-5}$$

ここに、 H : 冬期間における合計降雪量の過去 10 年間平均値 (cm)

h_s : 設計時間降雪深 (cm/h)

次に、導入する地域の気象条件や現地の状況を踏まえて、最低稼働時間 T_h を下回らない範囲で冬期間における運転時間を設定し、導入地域における電力や燃料費の単価を参考に、設定した運転時間における融雪設備の運転費を算出する。

・保守点検費：保守点検費は、熱源の種類に応じた費用を個別に設定し、導入する地域の実績価格を入手してその値を用いる。本技術の実績価格を用意できない場合保守点検費 C_k (千円)は、管路内設置型熱回収技術を用いた下水熱利用導入ガイドライン(案)²⁾の p48 に従って、式 3-6 により算出する。

$$C_k = 0.02 \times (C_t + C_h) \dots\dots\dots \text{式 3-6}$$

ここに、 C_t : ヒートポンプの建設費 (千円)

C_h : 循環ポンプの建設費 (千円)

(2) エネルギー消費量

冬期間におけるエネルギー消費量 W (kWh)は、式 3-7 により算出する。

$$W = W_s \times t \dots\dots\dots \text{式 3-7}$$

ここに、 W_s : 熱源・ポンプ機器の1時間当たりの消費電力 (kW)

t : 冬期間における施設の稼働時間 (h)

(3) 温室効果ガス排出量

年間温室効果ガス排出量 G (kg-CO₂)は式 3-8 により算出する。

$$G = W \times e \dots\dots\dots \text{式 3-8}$$

ここに、 W : 冬期間におけるエネルギー消費量 (kWh)

e : 温室効果ガス排出係数 (kg-CO₂/kWh)「電気事業別排出係数一覧」(環境省公表)

また、石油焼き温水ボイラー方式の温室効果ガス排出量 G_q (kg-CO₂) については、灯油を燃焼していることから、消費電力量と灯油使用量別に算出し、合計した値を温室効果ガス排出量とする。

$$G_q = (e \times W_p) + (e_q \times Q_q) \dots\dots\dots \text{式 3-9}$$

ここに、 e : 温室効果ガス排出係数(kg-CO₂/kWh)「電気事業別排出係数一覧」「電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)(H30.12.27 環境省・経済産業省公表)」より

W_p : 冬期間における石油焼き温水ボイラー方式の消費電力量 (kWh)

e_q : 2.50 (kg-CO₂/L: 灯油 10当たりの温室効果ガス排出量の換算値※)

※「温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル (Ver.6) (令和 7 年 3 月)」(環境省)より

Q_q : 冬期間における灯油使用量 (L)

§ 12 導入判断

本技術の導入判断は、導入効果の検討結果から判断する。

【解説】

§ 11 導入効果の検討から、従来技術と比較して優位性が見込まれるとともに、事業全体の必要性が認められる場合には、第4章 計画・設計の内容に基づき、本技術を導入するための検討を進める。なお、導入効果が見込めない場合は、その原因を分析し特定したうえで条件を見直すことが望ましい。導入効果の判断は、総費用（年価換算値）、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量の3つの指標に基づき、現地の状況や事業全体の必要性等を踏まえた上で判断する。

第4章 計画・設計

§13 計画・設計の手順

計画・設計は、以下の手順で実施する。

- (1) 必要熱量の算出
- (2) 放熱設備の設計
- (3) 採熱設備の設計
- (4) 操作・制御設備の設計
- (5) 概算工事費の算出

【解説】

本技術は、図4-1のフローに沿って計画・設計を行う。

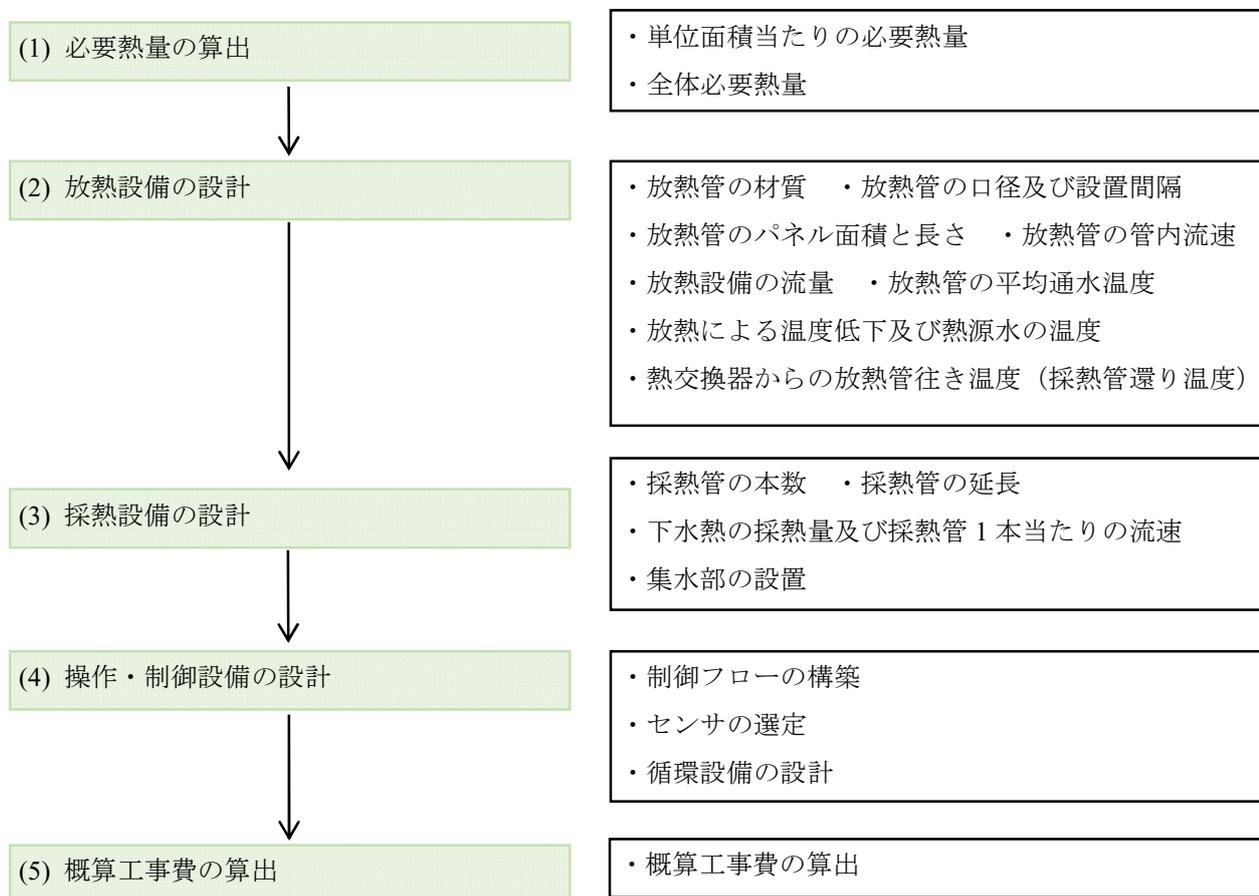


図4-1 計画・設計のフロー

§ 14 必要熱量の算出

必要熱量として、以下について算出する。

- (1) 単位面積当たりの必要熱量
- (2) 全体必要熱量

【解説】

(1) 単位面積当たりの必要熱量

単位面積当たりの必要熱量は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾にある式4-1～式4-9により融雪の必要熱量 q_1 及び凍結防止の必要熱量 q_2 を算出し、いずれか大きい値を必要熱量とする。算出にあたっては、§ 10 基礎調査 (1) 放熱側情報 ②気象条件で整理した降雪密度、風速及び外気温度を用いるが、設計条件の設定の詳細については、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾を参照すること。

$$q_1 = (1 / \eta) \times (q_s + q_n) \dots\dots\dots \text{式 4-1}$$

ここに、 q_1 : 必要熱量 (W/m²)

η : 熱効率 (一般的に、土工部 0.8～0.9、橋梁部 0.65～0.75)

q_s : 顕熱 (W/m²)

q_n : 融解熱 (W/m²)

$$q_s = 2.78 \times (c \times \Delta\theta \times h_s \times \rho_s) \dots\dots\dots \text{式 4-2}$$

$$q_n = 2.78 \times (J \times \rho_s \times h_s) \dots\dots\dots \text{式 4-3}$$

ここに、定数2.78 は、熱流束 J/cm² を W/m² に変換するために 3,600 J/Wh で除した数値

c : 雪の比熱 (2.1 J/g°C)

$\Delta\theta$: 雪温を 0°C まで高める温度 (雪温の絶対値: 設定外気温) (°C)

h_s : 設計時間降雪深 (cm/h)

ρ_s : 雪の密度 (g/cm³)

J : 雪の融解潜熱 (334 J/g)

設計時間降雪深 h_s (cm/h) は、施設が保有する融雪能力であり、式 4-4 により算出する。

$$h_s = 0.425 \times H_m^{0.7} \dots\dots\dots \text{式 4-4}$$

ここに、 H_m : 平均日降雪深 (cm/h)

$$q_2 = (1 / \eta) \times q_i \dots\dots\dots \text{式 4-5}$$

ここに、 q_2 : 必要熱量 (W/m²)

η : 熱効率 (一般的に、土工部 0.8～0.9、橋梁部 0.65～0.75)

q_i : 対流輻射熱 (W/m²)

$$q_i = (\alpha_c + \alpha_r) \times (T_m - T_a) \dots\dots\dots \text{式 4-6}$$

ここに、 α_c : 対流による表面熱伝導率 (W/m²°C)

α_r : 輻射による表面熱伝導率 (W/m²°C)

T_m : 路面温度 (°C)

T_a : 外気温度 (°C)

$$\alpha_c = 5.8 + 4.0 \times u \quad (u \leq 5 \text{ のとき}) \dots\dots\dots \text{式 4-7}$$

ここに、 u : 風速 (m/s)

$$\alpha_c = 7.14 \times u^{0.78} \quad (u > 5 \text{ のとき}) \dots\dots\dots \text{式 4-8}$$

$$\alpha_r = 5.41 / (T_m - T_a) \times [\{ (273 + T_m) / 100 \}^4 - \{ (273 + T_a) / 100 \}^4]$$

..... 式 4-9

(2) 全体必要熱量

全体必要放熱量（放熱量） Q_a (kW)は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾にある式 4-10 及び式 4-11 により算出する。

$$Q_a = (q \times A + q_3) / 1,000 \quad \text{..... 式 4-10}$$

$$q_3 = C_w \times \rho_w \times \Delta t_2 \times Q_r \quad \text{..... 式 4-11}$$

ここに、 q ：単位面積当たりの必要熱量 (W/m²) (q_1 、 q_2 のいずれか大きい値)

A ：融雪面積 (m²)

q_3 ：熱源水配管（送水管）からの損失熱量 (W)

C_w ：熱源水の比熱 (J/kg°C)

ρ_w ：熱源水の密度 (kg/m³)

Δt_2 ：送水管からの温度低下量 (°C)（「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾の p164 より、
送水温度が 20°C未満の場合は 0.2°C、20°C以上の場合は 0.5°C)

Q_r ：放熱設備の熱源水配管内流量 (m³/s)

§ 15 放熱設備の設計

放熱設備の設計では、以下の内容を決定する。

- (1) 放熱管の材質
- (2) 放熱管の口径及び設置間隔
- (3) 放熱管のパネル面積及び長さ
- (4) 放熱管の管内流速
- (5) 放熱設備の流量
- (6) 放熱管の平均通水温度
- (7) 放熱による温度低下及び熱源水の放熱管入口温度
- (8) 熱交換器からの放熱管行き温度（採熱管還り温度）

【解説】

(1) 放熱管の材質

放熱管の材質は、大別して金属管と樹脂管があるが、耐久性、経済性、施工性、送水温度等を考慮して決定する。樹脂管は、金属管と比べて施工性や経済性に優れているが、熱伝導率は金属管と比較して低い場合が多いことから、これらの特徴を踏まえて使用する放熱管の材質を決定する。放熱管は、熱伝導性の観点から樹脂管よりも金属管の使用が望ましい。一般的に使用される金属管材には、鉄管およびステンレス管があるが、引張強度の高さに加え腐食（錆）に対する耐性を考慮しステンレス管を採用した。表 4-1 に代表的な放熱管材の特性を、表 4-2 に樹脂管と金属管との比較を示す。

表 4-1 代表的な放熱管材の特性⁴⁾

		規格	引張強度 (N/mm ²)	軟化温度 (°C)	熱伝導率 (W/m°C)
樹脂管	ポリブテン管	8A~20A	16.7	119	0.23
	特殊ナイロン管	9A~13A	34.3	182	0.23
	架橋ポリエチレン管	8A~20A	20.6	124	0.35
金属管	炭素鋼鋼管 (SGP)	10A~20A	294	約 300	43.0
	ステンレス鋼管 (SUS304)	10A~20A	520	約 450	16.0



ポリブテン管



特殊ナイロン管



架橋ポリエチレン管



炭素鋼鋼管 (SGP)



ステンレス鋼管 (SUS304)

表 4-2 管材別の特長及び問題点⁵⁾

	金属管	樹脂管
特長	<ul style="list-style-type: none"> ・強度が大きい。 ・継ぎ手や付属品が豊富なため、配管工法が豊富。 ・高圧配管が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・軽量で扱いやすい。 ・耐食性に優れる。 ・保温性に優れる。 ・接続方法が簡単である。 ・弾力性、耐震性がある。
問題点	<ul style="list-style-type: none"> ・樹脂管と比較してやや保温性に欠ける。 ・管種によって腐食が懸念される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・金属管に比べ強度に欠ける。 ・高圧配管に適さない。

(2) 放熱管の口径及び設置間隔

「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾では、従来技術で用いられている放熱管の口径は、表 4-3 のとおり 10A～20A (JIS G 3444) が標準となっている。本技術もそれに従って標準とする。10A は経済性、施工性に優れているが、他と比べて口径が小さいため熱源水を送る流量が少ない。それに対して、20A は経済性や施工性は劣るものの、より多くの流量を流すことができる。設計した熱源水の流量によって適切な口径を選択する。放熱管の設置間隔は、150～200 mm の範囲で設定することを標準とする。

表 4-3 口径別の特徴¹⁾

	10A	15A	20A
経済性	安価 ←		→ 高価
施工性	良い ←		→ やや良い
汎用性	やや劣る	汎用性あり	汎用性あり
その他	閉塞し易い	施工例が多い	循環流量が増える

(3) 放熱管のパネル面積及び長さ

従来技術で用いられている一般的な放熱設備は、1 パネル 10～20 m²、1 パネル当たりの放熱管の長さは 100 m 程度である⁴⁾。これは、放熱管が長すぎると配管摩擦損失が増大し、逆に短いとパネル数が増えて流量が多くなり、循環ポンプの出力も大きくなるためである。そのため、本技術においてもこの範囲で設定することを標準とする。実証研究では、放熱管の設置間隔を 150～200 mm、1 パネル 12.5 m² を 4 パネル設置する構造とした。

(4) 放熱管の管内流速

放熱管の管内流速は、表 4-4 により設定する。

表 4-4 口径別設計流速⁴⁾

放熱管呼径 (mm)	10	15	20
設計流速 (m/s)	0.6～0.8	0.7～0.9	0.8～1.0

(5) 放熱設備の流量

放熱設備の熱源水の流量 Q_r (m³/s)は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾にある式 4-12 及び式 4-13 により算出する。

$$Q_r = q_r \times n \quad \dots\dots\dots \text{式 4-12}$$

$$q_r = \pi d^2 \times V / 4 \quad \dots\dots\dots \text{式 4-13}$$

ここに、 q_r : 1 パネル当たりの熱源水の流量 (m³/s)

n : 放熱管パネル数

d : 放熱管の内径 (m) (実証研究施設で採用した SUS 15A (JIS G 3444) は 0.0143m)

V : 放熱管内流速(m/s)

(6) 放熱管の平均通水温度

放熱管の平均通水温度 \bar{T} (°C)は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾にある式 4-14 により算出する。

$$\bar{T} = q_u \times \frac{l_1 + l_2}{2\lambda} + q \times \frac{a'}{2\pi \times \lambda_p \times l} \times \ln \frac{d_o}{d_i} + T_m \quad \dots\dots\dots \text{式 4-14}$$

ここに、 q : 単位面積当たりの必要熱量 (W/m²)

q_u : 上部放熱量 (W/m²)

熱効率を考慮しない融雪に必要な熱量=必要熱量 $q_l \times$ 熱効率 η (式 4-1 より)

T_m : 路面温度 (°C) ※降雪中の路面温度 (0°C)

a' : 1 パネル当たりの放熱管の面積 (m²) (10~20 m²)

λ_p : 放熱管の熱伝導率 (W/m°C) (SUS 管 16 W/m°C)

l : 1 パネル当たりの放熱管の長さ (m)

d_o : 放熱管の外径 (m)

d_i : 放熱管の内径 (m)

p : 放熱管の設置間隔 (m) (標準 0.15 m)

l_1 : 放熱管中心から路面までの最長距離 (m)

l_2 : 放熱管中心から路面までの最短距離 (m)

λ : 舗装の熱伝導率 (W/m°C) (本ガイドラインの設計値 = 1.4 W/m°C)

$$l_1 = \sqrt{l_2^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2} \quad \dots\dots\dots \text{式 4-15}$$

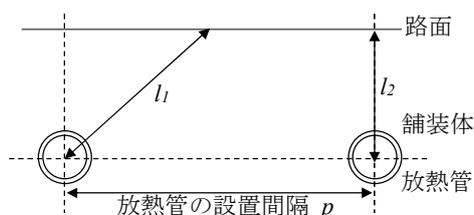


図 4-2 放熱管から路面までの距離のイメージ

(7) 放熱による温度低下及び熱源水の放熱管入口温度

運転時の放熱による温度低下 Δt_l (°C)は、式 4-16 により算出する。

$$\Delta t_l = (q \times a') \div (C_w \times \rho_w \times q') \dots\dots\dots \text{式 4-16}$$

- ここに、 q : 単位面積当たりの必要熱量 (W/m²)
- a' : 1 パネル当たりの放熱管面積 (10~20 m²)
- q' : 1 パネル当たりの熱源水の流量 (m³/s)
- ρ_w : 熱源水の密度 (kg/m³)
- C_w : 熱源水の比熱 (J/kg°C)

設計した必要熱量を放熱するための熱源水の放熱管入口温度 t_l (°C)を式 4-17 により算出する。

$$t_l = \bar{T} + (1/2) \times \Delta t_l \dots\dots\dots \text{式 4-17}$$

- ここに、 \bar{T} : 放熱管平均通水温度 (°C)
- Δt_l : 放熱による温度低下 (°C)

(8) 熱交換器からの放熱管行き温度 (採熱管還り温度)

熱源機器からの放熱管行き温度 (採熱管還り温度) T_a (°C)は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾にある式 4-18 により算出する。

$$T_a = t_l + \Delta t_2 \dots\dots\dots \text{式 4-18}$$

- ここに、 t_l : 放熱管入口温度 (°C) (式 4-17 を参照)
- Δt_2 : 送水管からの温度低下 (「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾のとおり、送水温度が 20 °C未満の場合は 0.2 °C、20 °C以上の場合は 0.5 °Cとすることを標準とする。)

§ 16 採熱設備の設計

採熱設備の設計では、以下の内容を決定する。

- (1) 採熱管の本数
- (2) 採熱管の延長
- (3) 下水量の採熱量及び採熱管 1 本当たりの流速
- (4) 集水部の設置

【解説】

採熱管の本数、採熱管の延長、熱源水の流速と採熱量、集水部の設置方法を決定する。

採熱管は管路更生工事と同時に設置するため、施工にあたっては現行のガイドライン（「管きょ更生工法における設計・施工管理ガイドライン 2017 年版」（日本下水道協会）に基づいて実施する必要がある。また、採熱管の設置を含めた更生後の流下能力については、管路更生を計画する段階で別途確認しておく必要がある。実証研究の中で検討した採熱管の設置による流下能力への影響については、資料 A.3.3 採熱設備の設計で示す。

(1) 採熱管の本数

採熱管は、既設管と更生材料との隙間の管底部に設置し、全ての採熱管が完全に下水の水面下に設置されるように設計する必要がある。そのため、使用する採熱管の厚みや外径、更生材料の厚みや施工性について検討し、使用する本数を決定しなければならない。また、採熱管の本数は、往きと還りから偶数本とする。設置本数は、管路更生後の状況を想定し、図 4-3 に示すように採熱管を水面下に設置した位置関係を別途図面で確認する。

実証研究では、管路更生工法としてアルファライナー工法を用いて採熱管を設置している。そのため、採熱管の設置本数は、表 4-5 の早見表から決定する。

現地の口径 400 mm の場合は、必要となる最低水深 55 mm に対して、現地で計測した最低水深 62.2 mm から、水面下に設置できる採熱管の本数は 24 本の設定となる。また、口径 250 mm、400 mm、800 mm での採熱管の標準設置断面図を図 4-4 に示す。

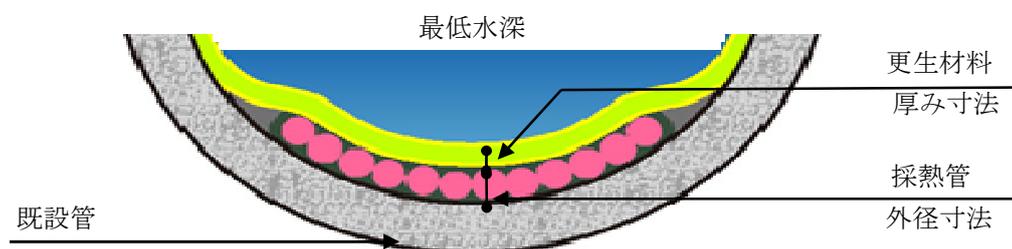


図 4-3 採熱管の配置図

表 4-5 口径毎の採熱管本数と最低水深

口径 (mm)	採熱管本数 (本)	最低水深 (mm)
250	16	30
300	16	30
350	18	35
400	24	55
500	28	60
600	32	66
700	40	89
800	48	113

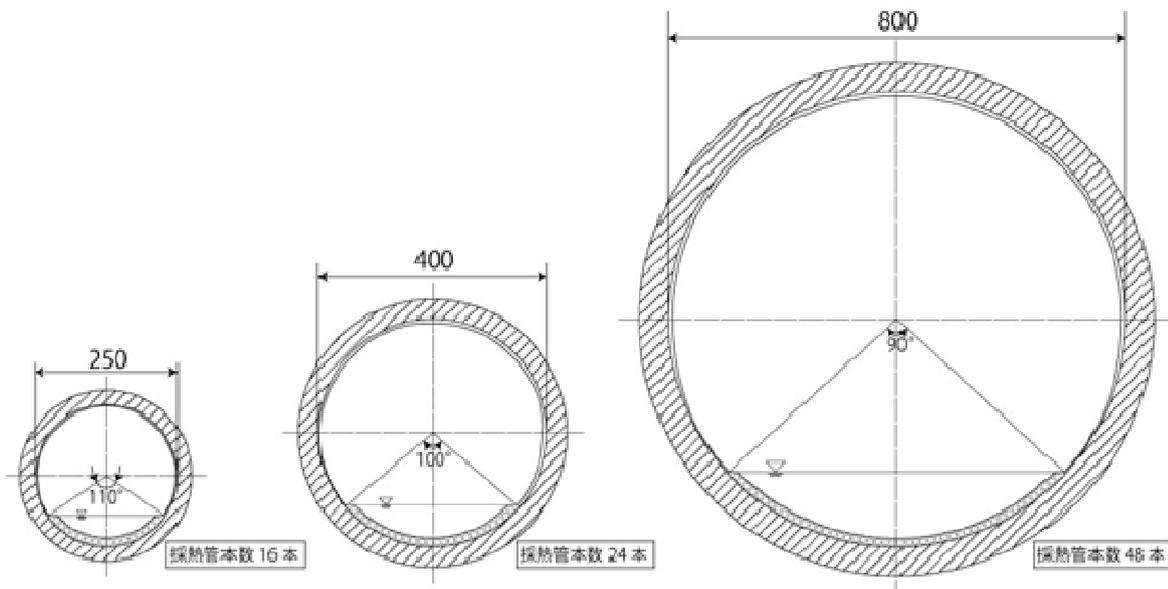


図 4-4 採熱管の標準設置断面図

(2) 採熱管の延長

採熱管の延長は、下水道管路内に設置され採熱を行う区間の延長、マンホール内の壁面に設置され集水部へ接続する区間の延長の2つに分けられる。

下水道管路内に設置され採熱を行う区間の延長は、下水から得られる採熱量を式 4-19 により確認した上で、必要な熱量以上を採熱可能な範囲で設定することとし、延長の設定はスパン単位で行う。また、マンホール内の壁面に設置され集水部へ接続する区間の延長は、下水道管路内に設置され採熱を行う区間の終端から集水部までの距離となるため、設置場所の状況を踏まえて設定する。

(3) 下水熱の採熱量及び採熱管 1 本当り流速

下水熱の採熱量 Q_v (kW)は、式 4-19～式 4-21 より算出する。なお、熱源水で用いる不凍液の密度及び比熱については、種類や濃度によって異なるため、採用する製品の仕様等から設定する。

$$Q_v = U \times A \times \Delta T_L \quad \dots\dots\dots \text{式 4-19}$$

$$A = N \times D \times L \quad \dots\dots\dots \text{式 4-20}$$

$$\Delta T_L = \frac{(T_1 - T_a) - (T_2 - T_b)}{\ln \frac{T_1 - T_a}{T_2 - T_b}} \quad \dots\dots\dots \text{式 4-21}$$

- ここに、 U : 総括伝熱係数 (W/m²°C)
- A : 採熱管接触面積 (m²)
- N : 採熱管本数 (本)
- D : 採熱管外径 (m)
- L : 採熱管の延長 (m)
- ΔT_L : 下水-熱源水対数平均温度差 (°C)
- T_1 : 上流側下水温度 (°C)
- T_2 : 下流側下水温度 (°C)
- T_b : 放熱管行き温度=採熱管還り温度 (°C)
- T_a : 放熱管還り温度=採熱管行き温度 (°C)

採熱管 1 本当り流速 V_m (m/s)は、式 4-22～4-24 により算出する。

$$V_m = Q_r / a \quad \dots\dots\dots \text{式 4-22}$$

$$Q_r = Q_m / n \quad \dots\dots\dots \text{式 4-23}$$

$$Q_m = Q_v / (C_w \times \rho_w \times \Delta t_2) \quad \dots\dots\dots \text{式 4-24}$$

- ここに、 Q_r : 採熱管 1 本当り流量 (m³/s)
- a : 採熱管の断面積 (m²)
- Q_m : 採熱設備の流量 (m³/s)
- n : 採熱管設置本数
- Q_v : 採熱量 (kW)
- C_w : 熱源水の比熱 (J/kg°C)
- ρ_w : 熱源水の密度 (kg/m³)
- Δt_2 : 熱源水の温度差 (°C) (= $T_b - T_a$)

(4) 集水部の設置

熱源水が流れる採熱管と放熱管の口径や本数が異なる場合は、必要に応じて写真 4-1 のような採熱管と放熱管とを接続するための集水部を設置する。

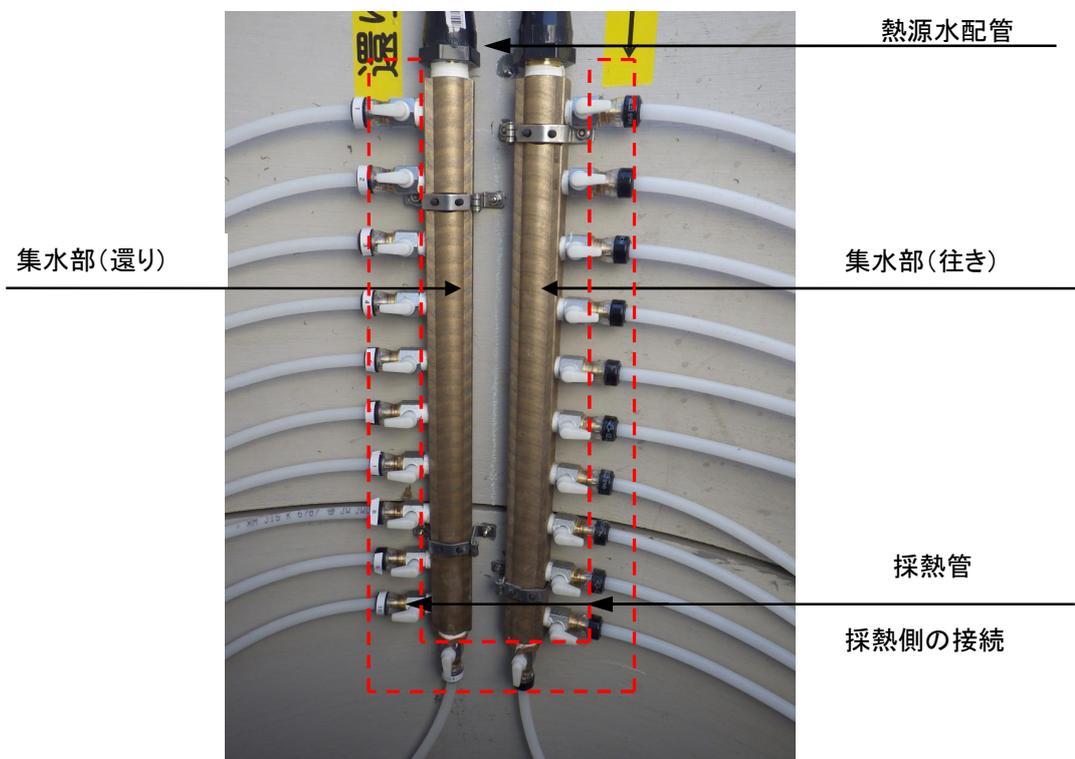


写真 4-1 集水部の設置例

§ 17 操作・制御設備の設計

操作・制御設備の設計では、以下の内容について決定する。

- (1) 制御フローの構築
- (2) センサの選定
- (3) 循環設備の設計

【解説】

(1) 制御フローの構築

本技術は、ヒートポンプレス運転とヒートポンプ運転との切替や待機を自動で行う。この運転を行うために、制御フローを構築する。

運転条件は、以下に示す 1) BASE 温度、2) その他の温度、3) 降雪の有無のことである。それぞれの運転条件は、以下より条件となる数値を決定する。なお本技術は、運転条件設定のための情報として外気温度と路面温度の両方を使用することを標準とするが、現地の状況に応じてどちらか一方のみで制御することも可能である。

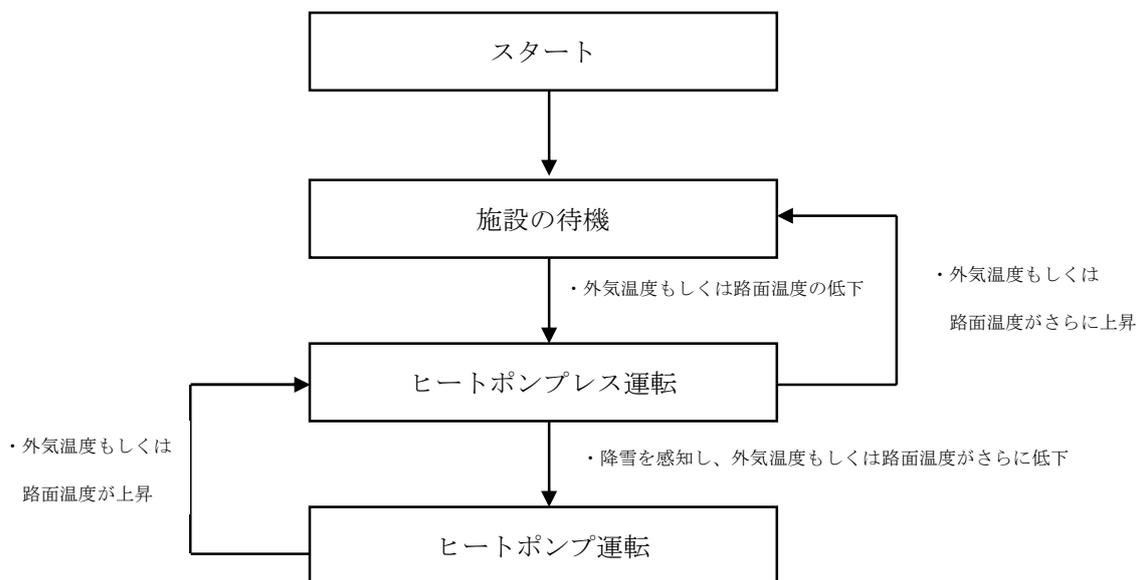


図 4-5 運転の概略フロー

1) BASE 温度

BASE 温度とは、制御フローの運転条件を設定するための基になる温度のことであり、ヒートポンプレス運転とヒートポンプ運転との切替え温度のことである。

BASE 温度のうち、外気温度に対する条件は、現地での計測又は近隣の観測所データを用いて、冬期間での平均日最低外気温度で設定することを標準とする。また路面温度に対する条件は、現地での計測データを用いて冬期間での平均日最低路面温度で設定することを基本とするが、計測が困難な場合は、路面温度を使用して融雪を行っている近傍の施設の設定データ又は気象条件に近い他都市における融雪施設の路面温度データ等から設定する。

なお、BASE 温度は、運用を開始後、定期的に数値を確認し必要に応じて見直すことが望ましい。

2) その他の温度

その他の温度とは、制御フローにおいて BASE 温度以外に必要となる温度である。これらの条件は、BASE 温度を基に表 4-6 に示す考え方に従って設定する。

3) 降雪の有無

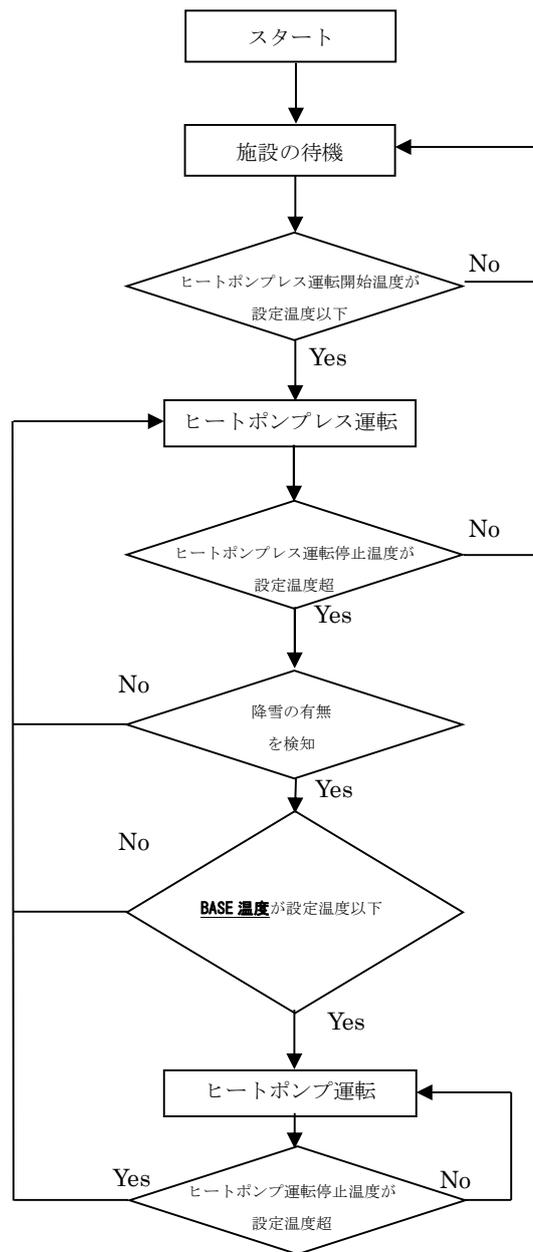
降雪の有無は、ヒートポンプレス運転とヒートポンプ運転とを切り替える条件として設定し、降雪センサにより判断する。

表 4-6 BASE 温度及びその他の温度の設定方法

フローの位置	内容	標準的な設定の考え方
①ヒートポンプレス運転開始温度	設定した温度以下となった場合、ヒートポンプレス運転を開始する。	<ul style="list-style-type: none"> ・① > ③ : BASE 温度より高い温度を設定する。 ・高めに設定することで、早期に運転が開始されるため融雪や凍結防止の効果が高まるが、運転に要する費用が高くなる。
②ヒートポンプレス運転停止温度	設定した温度を超えた場合、ヒートポンプレス運転を停止する。	<ul style="list-style-type: none"> ・② > ① : ヒートポンプレス運転開始温度より高い温度を設定する。 ・ヒートポンプレス運転開始温度との差が少ないと施設の発停が頻発するおそれがあるため注意が必要。
③BASE 温度	降雪を感知後設定した温度以下となった場合、ヒートポンプ運転を開始する。	基礎調査より整理した、冬期間の平均日最低外気温度及び平均日最低路面温度より、外気温度及び路面温度に対する BASE 温度をそれぞれ決定。
④ヒートポンプ運転停止温度	設定した温度を超えた場合、ヒートポンプ運転を停止し、ヒートポンプレス運転に移行する。	<ul style="list-style-type: none"> ・① \geq ④ > ③ : BASE 温度より高く、かつヒートポンプレス運転開始温度以下の温度を設定する。 ・BASE 温度との差が少ないと施設の発停が頻発するおそれがあるため注意が必要。

以上の手順に従い各温度を設定することで、図 4-6 に示す本技術における制御フローが完成する。

なお運転の特徴として、ヒートポンプレス運転とヒートポンプ運転の開始温度と停止温度との差が大きいとヒートポンプ運転に入るタイミングが遅くなり、差が小さいとヒートポンプ運転に入るタイミングが早くなることを踏まえ、各条件を設定する必要がある。



・スタート電源の入力時からセンサで監視する待機状態となる。

・設定温度を超えた場合は、待機状態へ戻る。

・設定温度以下となった場合は、ヒートポンプ運転を開始。

・設定温度を超えた場合は、再び待機状態へ戻る。

・降雪センサより降雪を感知しない場合は、ヒートポンプ運転へ戻る。

・降雪センサより降雪を感知した場合は、BASE温度の確認へ進む。

・BASE温度が設定温度を超えた場合は、ヒートポンプ運転へ戻る。

・BASE温度が設定温度以下となった場合は、ヒートポンプ運転の開始。

・設定温度を超えた場合は、ヒートポンプ運転へ戻る。

図 4-6 本技術における制御フロー

(2) センサの選定

本技術は、気象状況から情報を収集し運転に反映する必要がある。そのため、本技術の運転に必要なセンサの種類は、降雪センサ、外気温度センサ、路面温度センサ、熱源水温度センサ、熱源水圧力センサ、下水温度センサ、下水水深センサであり、表 4-7 に示す。

なお、参考までに実証研究では、資料 A.3.4 操作・制御設備の設計に示すとおり、融雪面積 50 m² に対して 3 か所の温度を計測しており、放熱設備の中央部に設置した 1 か所を運転制御に用いた。

表 4-7 運転に必要なセンサ及び留意点

センサ	留意点
外気温度センサ	・安定した値を取得できるように百葉箱等を設置すること。
路面温度センサ	・交通量を考慮した耐荷重性を有する製品であること。 ・配線の切断に注意すること。
降雪センサ	・支柱等の上部に設置し、周囲の建物や風等の影響を受けない場所に設置すること。
熱源水温度センサ	・熱源水配管内に直接設置するため保守点検で支障のない場所に設置すること。
熱源水圧力センサ	
下水温度センサ	・マンホール内に設置するため保守点検で支障のない場所に設置すること。
下水水深センサ	

(3) 循環設備の設計

ヒートポンプ、循環設備である循環ポンプ、膨張タンク、熱源水配管及び熱源水について、以下のとおり設計する。

①ヒートポンプ

ヒートポンプに必要な能力は、表 4-8 に示す必要な能力を満足するように設定する。

なお、選定したヒートポンプの性能によっては、送り出し温度の設定値と実際の送り出し温度に差が生じる場合があるため、あらかじめ実際の送り出し温度を別途計測する等両者が一致していることを確認することが望ましい。

表 4-8 ヒートポンプに必要な能力

	必要な能力
定格暖房能力 (kW)	全体必要熱量 Q_a (kW) から下水熱の採熱量 Q_v (kW) を差し引いた熱量以上の能力
送り出し流量 (m ³ /s)	放熱設備の熱源水の流量 Q_r (m ³ /s) 以上の能力
外形寸法 (mm)	設置する箇所に収まる寸法のもの

②循環ポンプ

循環ポンプに必要な能力は、表 4-9 に示す項目を満足するように設定する。

表 4-9 循環ポンプに必要な能力

	必要な能力	
吐出量 (m ³ /s)	放熱設備	放熱設備の熱源水の流量 Q_r (m ³ /s)
	採熱設備	採熱管流量 Q_s (m ³ /s)
揚程 (m)	放熱設備	放熱設備に必要な揚程 h_1 (m)
	採熱設備	採熱設備に必要な揚程 h_2 (m)
	全施設	全揚程 h (m)

全揚程 h (m)は、以下のとおり Weston 公式を用いて各配管での揚程から算出する。
 吐出量は、§ 15 放熱設備の設計 (5) 放熱設備の流量で算出した値以上とする。
 なお、採熱側の循環ポンプは、全揚程を満足させる必要がある。

$$h = h_1 + h_2 \dots\dots\dots \text{式 4-25}$$

ここに、 h_1 : 放熱設備に必要な揚程 (m)
 h_2 : 採熱設備に必要な揚程 (m)

$$h_1 = h_a + h_b \dots\dots\dots \text{式 4-26}$$

ここに、 h_a : 放熱設備の熱源水配管の揚程 (行き) (m)
 h_b : 放熱設備の熱源水配管の揚程 (還り) (m)

$$h_a = [0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times d_a) / \sqrt{v_a}] \times (L_a / d_a) \times v_a^2 / 2g \dots\dots\dots \text{式 4-27}$$

ここに、 L_a : 放熱設備の熱源水配管の延長 (行き) (m)
 d_a : 放熱設備の熱源水配管の内径 (行き) (m)
 v_a : 放熱設備の熱源水配管内の平均流速 (行き) (m/s)
 g : 重力加速度 (m/s²)

$$h_b = [0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times d_b) / \sqrt{v_b}] \times (L_b / d_b) \times v_b^2 / 2g \dots\dots\dots \text{式 4-28}$$

ここに、 L_b : 放熱設備の熱源水配管の延長 (還り) (m)
 d_b : 放熱設備の熱源水配管の内径 (還り) (m)
 v_b : 放熱設備の熱源水配管内の平均流速 (還り) (m/s)
 g : 重力加速度 (m/s²)

$$h_2 = h_c + h_d + h_e \dots\dots\dots \text{式 4-29}$$

ここに、 h_c : 採熱設備の熱源水配管の揚程 (行き) (m)
 h_d : 採熱設備の熱源水配管の揚程 (還り) (m)
 h_e : マンホール深 (m)

$$h_c = [0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times d_c) / \sqrt{v_c}] \times (L_c / d_c) \times v_c^2 / 2g \dots\dots\dots \text{式 4-30}$$

ここに、 L_c : 採熱設備の熱源水配管の延長 (行き) (m)
 d_c : 採熱設備の熱源水配管の内径 (行き) (m)
 v_c : 採熱設備の熱源水配管内の平均流速 (行き) (m/s)
 g : 重力加速度 (m/s²)

$$h_d = [0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times d_d) / \sqrt{v_d}] \times (L_d / d_d) \times v_d^2 / 2g \dots\dots\dots \text{式 4-31}$$

ここに、 L_d : 採熱設備の熱源水配管の延長 (還り) (m)
 d_d : 採熱設備の熱源水配管の内径 (還り) (m)
 v_d : 採熱設備の熱源水配管内の平均流速 (還り) (m/s)
 g : 重力加速度 (m/s²)

③膨張タンク

膨張タンクは、表 4-10 のとおり、施設に対する全不凍液の量を集計し、それを超える量をタンク容量として設定する。

表 4-10 膨張タンクの仕様

	容量
融雪設備	放熱管内の容量 V_1 (ℓ)
操作・制御設備	熱源水配管内の容量 V_2 (ℓ)
採熱設備	採熱管の容量 V_3 (ℓ)
膨張タンク	膨張タンクの容量 V_4 (ℓ) $> V_1 + V_2 + V_3$

④熱源水配管及び熱源水

熱源水配管は、採熱設備と操作・制御設備及び放熱設備とを接続する配管のことで、配管内に熱源水が流れている。熱源水配管の口径は、採熱側の流量及び流速によって決定する。

使用する熱源水は、凍結防止のために不凍液を用いることを原則とし、現地の状況に応じて適切な種類を採用する。なお、実証研究では、不凍液としてロードヒーティング用（プロピレングリコール系（使用温度範囲 $-40\sim 90$ °C））を使用した。

§ 18 概算工事費の算出

概算工事費を、設計で定まった設備内容に沿って算出する。

【解説】

概算工事費は、設計した内容を基に概算数量を積み上げて算出する。算出にあたっては、積算単価の公表資料があるものはそれを用い、積算単価がないものは設計内容を基に複数の見積りを行うなどして適正価格となる概算工事費を算出する。

第5章 運用・維持管理

§ 19 運用・維持管理

導入した本技術の運用・維持管理を適切に行うために、運転管理及び保守点検を行う。

【解説】

(1) 運転管理

施設管理者は、表 5-1 に示すように、熱源水の行き還り温度及び流量、施設の運転状態、センサの稼働状況、下水温度、ヒートポンプの送り出し温度を定期的に確認し、所定の運転が維持されていることを確認する。また、定期的な巡回等によって、異常を早期に発見するように努める。異常を発見した場合等は、清掃及び部品交換等の適切な対応を行う。

なお、実証研究では、センサからの情報を機械室内に設置した制御盤に集約するシステムとしているため、制御盤面に表示される値にて一括でエラーの有無について確認することができた。

表 5-1 測定項目及び確認内容

測定対象	測定項目	確認内容
熱源水	採熱管/放熱管行き温度 採熱管/放熱管還り温度	・降雪時に温度差があるか。
	流量	・設定流量以上流れているか。 ・流量が安定しているか。
施設の運転状態	各運転（停止・ヒートポンプ プレス運転・ヒートポンプ 運転）のタイミング・時間	・制御フローどおり運転しているか。
センサの稼働状況	降雪、気温温度 路面温度等	・気象状況を受信して制御信号を出しているか。 ・制御信号にエラーが無く、適切な値か。 (必ず目視にて異常がないことを確認)
下水温度	下水温度	・設計時の下水温度と大きな差が生じていないか。
ヒートポンプ	送り出し温度	・設定した送り出し温度どおりか。

(2) 保守点検

保守点検は、従来技術で実施されている維持管理についての点検内容を参考に計画的に行う。「消融雪設備点検・整備ハンドブック」⁶⁾のチェックシート等を参考に保守点検を行い、次回以降の維持管理に活用することが望ましい。保守点検は、定期点検と臨時点検を区分して行う。

①定期点検

定期点検は、設備の劣化及び老朽化等による損傷箇所の発見を目的に実施するものである。定期点検は、冬期間前、冬期間中、冬期間後に区分して実施する。定期点検は、設置した設備に応じて点検項目を適切に設定した上で、実施する。本技術で実施することが望ましい主な定期点検の内容を表 5-2 に示す。ヒートポンプは、「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律」に則り点検を行う必要がある。

表 5-2 定期点検の内容例

	点検項目	点検内容	点検時期		
			冬期間前	冬期間中	冬期間後
採熱設備	損傷・汚れ	外観（目視）※1	○		
放熱設備	損傷・汚れ	圧力計	○		○
		外観（目視）	○		
	融雪状況	融雪状況		○	
循環設備	電動機	絶縁抵抗	○		
	ヒートポンプ※2	温度	○	○	
	循環ポンプ	循環流量	○	○	
	熱源水	濃度	○		
操作・制御設備	制御盤	外観（目視）	○		
	センサ	信号確認	○		
		外観（目視）	○	○	○
	計測内容	運転時間	○		○
電源設備	メーター	消費電力量	○		○
	引き込柱・配電盤	外観（目視）	○		

※1 マンホール内の採熱管及び集水部を確認

※2 3年に1回以上の法定点検

②臨時点検

臨時点検は、想定外の故障や災害が発生した場合等に行う点検のことである。地震災害が発生した場合は、各施設管理者が定める基準に応じて施設に異常がないか点検を行うことが望ましい。臨時点検によって故障の状態を把握したのち、できるだけ早急に対応を行ってシステムの復旧を図ることが望ましい。

参考文献

- 1) 「国総研資料第 1158 号 B-DASH プロジェクト No.35 ヒートポンプレスで低 LCC と高 COP を実現する下水熱融雪システム導入ガイドライン (案)」(国土交通省国土技術政策総合研究所、2021 年 3 月)
- 2) 「国総研資料第 804 号 B-DASH プロジェクト No.5 管路内設置型熱回収技術を用いた下水熱利用導入ガイドライン (案)」(国土交通省国土技術政策総合研究所、2014 年 8 月)
- 3) 「消融雪設備点検・整備標準要領 (案)」(国土交通省総合政策局公共事業企画調整課施工安全企画室、2016 年 3 月)
- 4) 「路面消・融雪施設等設計要領」(路面消・融雪施設等設計要領編集委員会、2008 年 5 月)
- 5) 「管きょ更生工法における設計・施工管理ガイドライン 2017 年版 (公社)日本下水道協会」
- 6) 「消融雪設備点検・整備ハンドブック」(消融雪設備点検・整備ハンドブック編集委員会、2018 年 7 月)
- 7) 「下水熱ポテンシャルマップ (広域ポテンシャルマップ) 作成の手引き」(環境省総合環境政策局、国土交通省水管理・国土保全局下水道部、2015 年 3 月)
- 8) 「温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル (Ver.6) (令和 7 年 3 月) 環境省」

資料編

資料 A 実証研究の内容

A.1 研究概要

十日町市は、図 A-1 に示す場所に位置している。新潟県の南部に位置し周囲は山に囲まれており冬には積雪量が年間で 3 m を超える年もある程の豪雪地である。実証フィールド（写真 A-1）は、十日町市内の主要道路から十日町駅へ通じる車道（市道島坂ノ下線）である。当該道路は、近隣に大型ショッピングセンターや複数の商店があることから、比較的交通量が多い区域である。そのため、降雪時には積雪や路面の凍結の影響により渋滞やスリップ等が発生する場所として、改善が必要とされていた。



（出典：十日町市ウェブサイト

<https://www.city.tokamachi.lg.jp/yukiguni/1898.html>



（出典：国土地理院発行 2万5千分1地形図）

図 A-1 十日町市の位置図



写真 A-1 実証フィールドの位置図

融雪範囲

2.5m x 20m

幅員 5.0 m

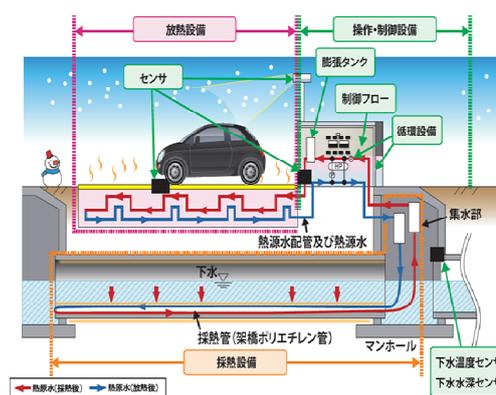


図 A-2 各設備の全体面図

(1) 計測期間

実証研究期間は平成 30 年度及び令和元年度の 2 年間であり、研究 1 年目は平成 30 年 12 月 19 日～平成 31 年 2 月 28 日に、研究 2 年目は令和元年 12 月 19 日～令和 2 年 2 月 15 日に施設を稼働し、計測を行った。

(2) 実証研究施設の位置

実証位置： 新潟県十日町市高田町 6 丁目地内

採熱設備： 十日町処理区中央第 2 処理分区（下水道管路の口径 400 mm、延長 102.8 m）

対象道路： 一般市道島坂ノ下線

(3) 施設諸元

実証研究施設の諸元・仕様を表 A-1 に示す。

表 A-1 実証研究施設の諸元・仕様

施設	項目	諸元・仕様
放熱設備	舗装構成	図 A-3 に記す
	気象条件	表 A-23 に記す
	融雪面積	50 m ² (B 2.5 m × L 20 m)
	計画放熱量	228 W/m ²
	放熱パネル	12.5 m ²
	放熱管の材質	SUS 15A (JIS G 3444)
	放熱管の設置間隔と深さ	間隔 150 mm / 深さ 85 mm
採熱設備	下水流量または水深	水深 62.2mm
	下水温度 (上流/下流)	13.6 °C / 13.5 °C
	下水道管路状況	表 A-33 の範囲
	管路延長	102.8 m
	排除方式 (分流式、合流式)	分流式
	下水道管路の口径・管種	口径 400 mm/鉄筋コンクリート管
	敷設後年数	1984 年
	マンホールのサイズ、深さ	一号人孔 / 深さ 3.0m
	採熱管の延長 (管路内)	102.8 m
	採熱管の材質	架橋ポリエチレン管
	採熱管の内径/外径	10.0 mm / 13.0 mm
	採熱管の本数	24 本
	集水部	口径 30 mm × L 500 mm 2 本
操作・制御設備	ヒートポンプ定格暖房能力	30.0 kW
	循環ポンプ能力	表 2-10 に記す
	膨張タンク	表 2-11 に記す
	熱源水配管の材質	ポリブテン管
	センサ関係一式	表 2-3～表 2-9 に記す
周辺情報	占用許可等の必要性	有り
	支障物件の確認	なし
	対象区間の管路更生に関する計画	有り
	機械室とセンサの設置場所	現地視察のうえ決定
	関係法令・融雪に関する施設計画	問題なし

実証研究施設の設定値を表 A-2 に示す。

表 A-2 実証研究施設の設定値

施設	項目	設定値
放熱設備	設計送り出し温度	18.6 °C
採熱設備	熱源水温度（行き／還り）	5.9 °C / 1.3 °C
操作・制御設備	気象条件	表 A-36 に記す
	下水温度（上流／下流）	13.6 °C / 13.5 °C
	最低下水水深	55.0 mm 以上
	降雪状況	降雪の有無
	日平均外気温度	-0.7 °C
	合計降雪深	910 cm
	平均日降雪深	17.4 cm/日
	採熱側流量	29.0 ℓ/min
	放熱側流量	23.1 ℓ/min
	センサ関係一式	表 2-3～表 2-9 に記す

(4) 施設写真

①放熱設備



写真 A-2 融雪範囲 (50m² 幅 2.5 m 延長 20.0 m)

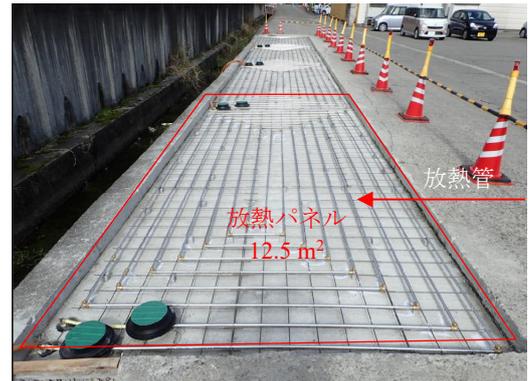


写真 A-3 放熱管 (配置完了全景)



写真 A-4 放熱管 (設置間隔 150 mm)

②採熱設備



写真 A-5 更生前の既設管



写真 A-6 採熱管



写真 A-7 採熱管 (マンホール内管口部付近)

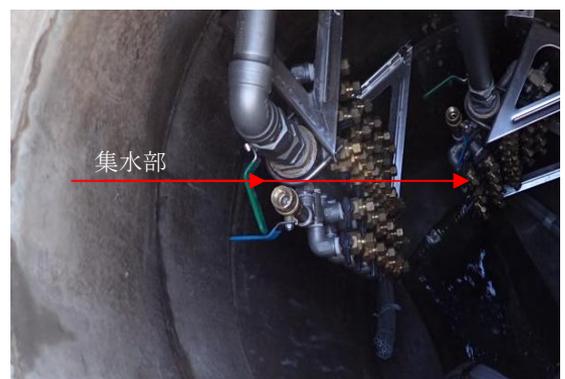


写真 A-8 集水部 (行き・還り 2本)

③操作・制御設備



写真 A-9 降雪センサ (非接触式 雪片数のカウント 3~100 個)



写真 A-10 降雪深センサ (非接触式 1cm 単位)

位)



写真 A-11 外気温度センサ (非接触式 0.1 °C 単位)



写真 A-12 路面温度センサ (接触式 0.1 °C 単位)



写真 A-13 ヒートポンプ

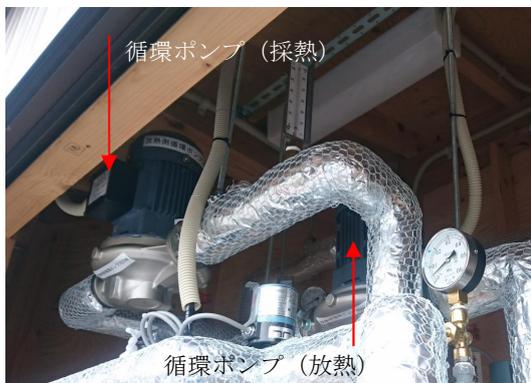


写真 A-14 循環ポンプ



写真 A-15 膨張タンク (容量 50~600 l)

A.2 基礎調査及び導入効果の検討

A.2.1 基礎調査

§ 10 基礎調査に基づいて基礎調査を実施した。収集した主な情報を表 A-3 に示す。

表 A-3 基礎調査で収集した主な情報

項目	細目	収集した情報	
放熱側	舗装構成	— ・ 舗装構成図、路盤構成図 ・ 車の往来等の交通情報	
	気象条件	— ・ 過去 10 年間における冬期間での平均降雪深、平均外気温度、日最低外気温度 ・ 前年度の冬期間における最も気温の低い月の平均風速 ・ 降雪密度は、路面消・融雪施設等設計要領 ⁴⁾ を参考に設定 ・ 路面温度は、冬期間における任意の 1 日で朝、夕方、夜中で計測を行い、最小値を確認 ・ 雪の密度（路面消・融雪施設等設計要領に記載の値を使用）	
採熱側	下水流量及び水深	排除方式（分流式、合流式） ・ 下水水深、温度データ	
	下水温度	— 温度、日最低外気温度 ・ 前年度の冬期間における最も気温の低い月の平均風速 ・ 降雪密度は、路面消・融雪施設等設計要領を参考に設定 ・ 路面温度は、冬期間における任意の 1 日で朝、夕方、夜中で計測を行い、最小値を確認	
	下水道管路状況	下水道管路の口径・管種	・ 設置の適用について確認
		敷設後年数	・ 下水道台帳の内容を確認
	マンホールのサイズ、深さ	・ 施工可否の判断	
	関連計画（長寿命化計画、耐震化計画等）	・ 管路延長、老朽化対策や耐震対策の必要性の判断 ・ 更生工事、改修工事の計画の有無を確認	
周辺	占用許可等の必要性	— ・ 調査及び工事時の道路占用許可について道路管理者に確認	
	支障物件の確認	— ・ 道路占用台帳より、支障となる可能性のある物件の有無を確認	
	対象区間の管路更生に関する計画	— ・ 対象区間の管路更生計画のヒアリング	
	機械室とセンサの設置場所	— ・ 現地確認と、土地所有者への許可申請	
	関係法令・融雪に関する施設計画	— ・ ヒートポンプを設置するため、フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律に該当することが判明	

A.2.2 導入効果の検討

§ 11 導入効果の検討に基づいて導入効果を検討した。検討にあたって比較する従来技術は、石油焚き温水ボイラー方式及び電熱方式とした。

なお、従来技術である電熱方式で用いる放熱線は、利用規模（最大負荷）相当の性能となる既製品（北日本電線株式会社製、製品名 RHVV）を、従来技術である石油焚き温水ボイラー方式で使用するボイラーは、利用規模（最大負荷）相当の性能となる既製品（長府工産株式会社製、製品名 HU-EN2000FF）を選定した。本技術で使用するヒートポンプは、利用規模（最大負荷）から下水の採熱量を差し引いた分以上の性能となる既製品（旧：サンポット株式会社製（現：長府工産株式会社）、製品名 GSHP-3003URF）を選定した。また循環ポンプは、本技術及び石油焚き温水ボイラー方式で必要となる能力相当となる既製品（株式会社荏原製作所製、製品名 25LPD5.15S）を選定した。

(1) 総費用（年価換算値）

1) 建設費（年価換算値）

実証研究で設置した施設規模（融雪面積 50 m²）に対する、本技術及び従来技術の建設費及び建設費年価（年価換算値）を以下のとおり整理した。なお、本技術の費用は実証研究での実績から、従来技術の費用は、実証施設と同等の施設を建設した場合を想定した費用をそれぞれ積み上げたものである。

整理の結果、本技術の建設費（年価換算値）は 487 千円、従来技術である石油焚き温水ボイラー方式の建設費（年価換算値）、電熱方式の建設費（年価換算値）は、それぞれ 318 千円、358 千円となった。

表 A-4 採熱設備の費用内訳（本技術）（融雪面積 50 m²）

項目	管路延長	総延長	単位	費用		備考
採熱管設置工事						
①採熱管材料費用		2,467.2	m	900,528	1,065,528	102.8 m × 24 本 365 円/m
②採熱管引き込み費用	110		m	165,000		1,500 円/m
集水部設置工事						
①集水部材料費用	2		箇所	140,000	200,000	70,000 円/箇所
②集水部設置費用	2		箇所	60,000		30,000 円/箇所
直接工事費					1,265,528	
諸経費		35	%		442,935	
合計					1,708,463	⇒1,700 千円を使用

表 A-5 放熱設備及び操作・制御設備の費用内訳（本技術）（融雪面積 50 m²）

項目	数量	単位	費用 (円)	備考
熱源水配管	1	式	680,000	
路盤工事	1	式	699,000	
制御盤	1	台	579,000	
自動制御装置	1	台	100,000	
電気設備工事	1	台	160,000	
降雪センサ	1	台	44,000	
路面温度センサ	1	式	28,000	地中埋込型
水分センサ	1	式	30,000	地中埋込型
ヒートポンプ	1	式	1,475,000	
循環ポンプ	1	式	125,000	
消耗品他	1	式	79,000	
直接工事費			3,999,000	
諸経費	35	%	1,399,650	
合計			5,398,650	⇒5,400 千円を使用

表 A-6 石油焚き温水ボイラー方式の費用内訳（融雪面積 50 m²）

項目	数量	単位	費用 (円)	備考
融雪配管設備工事	1	式	1,100,000	
制御装置	1	式	100,000	
路面温度センサ	1	台	28,000	地中埋込型
水分センサ	1	台	30,000	地中埋込型
制御盤・ボイラー	1	台	800,000	
消耗品他	1	台	79,000	
電気設備工事	1	式	160,000	
路盤工事	1	式	699,000	
直接工事費			2,996,000	
諸経費	35	%	1,048,600	
合計			4,044,600	⇒4,000 千円を使用

表 A-7 電熱方式の内訳（融雪面積 50 m²）

項目	数量	単位	費用(円)	備考
ロードヒーターユニット	1	式	600,000	
リードケーブル	1	式	100,000	
制御装置	1	台	150,000	
路面温度センサ	1	台	58,000	
水分センサ	1	台	52,000	
制御盤	1	台	600,000	
消耗品他	1	式	79,000	
システム工事費	1	式	850,000	
電気整備工事	1	式	170,000	
路盤工事	1	式	699,000	
直接工事費			3,358,000	
諸経費	35	%	1,175,300	
合計			4,533,300	⇒4,500 千円を使用

表 A-8 建設費（融雪面積 50 m²）

項目	単位	採熱設備	放熱設備及び操作・制御設備	合計
本技術	千円	1,700	5,400	7,100
石油焚き温水ボイラー方式	千円	—	4,000	4,000
電熱方式	千円	—	4,500	4,500

< 本技術の建設費（年価換算値） >

$$C_y = C_i \times i (1+i)^n / ((1+i)^n - 1)$$

C_i : 初期投資額（千円）

i : 割引率（= 2.3%）

n : 耐用年数(地上設備 15 年、採熱設備 50 年)

放熱設備及び操作・制御設備

$$C_y = 5,400 \times 0.023 (1+0.023)^{15} / ((1+0.023)^{15} - 1) = 429 \text{ (千円/年)}$$

採熱設備

$$C_y = 1,700 \times 0.023 (1+0.023)^{50} / ((1+0.023)^{50} - 1) = 58 \text{ (千円/年)}$$

< 石油焚き温水ボイラー方式の建設費（年価換算値） >

$$C_y = C_i \times i (1+i)^n / ((1+i)^n - 1)$$

C_i : 初期投資額（千円）

i : 割引率（= 2.3%）

n : 耐用年数(地上設備 15 年)

放熱設備及び操作・制御設備

$$C_y = 4,000 \times 0.023 (1+0.023)^{15} / ((1+0.023)^{15} - 1) = 318 \text{ (千円/年)}$$

< 電熱方式の建設費（年価換算値） >

$$C_y = C_i \times i (1+i)^n / ((1+i)^n - 1)$$

C_i : 初期投資額（千円）

i : 割引率（= 2.3%）

n : 耐用年数(地上設備 15 年)

放熱設備及び操作・制御設備

$$C_y = 4,500 \times 0.023 (1 + 0.023)^{15} / ((1 + 0.023)^{15} - 1) = 358 \text{ (千円/年)}$$

表 A-9 建設費（年価換算値）（融雪面積 50 m²）

	採熱設備 (千円/年)	放熱設備及び 操作・制御設備 (千円/年)	建設費(年価換算値) (千円/年)
本技術	58	429	487
石油焚き温水ボイラー方式	—	318	318
電熱方式	—	358	358

2) 維持管理費

維持管理費は、§ 11 導入効果の検討 ②維持管理費 式 3-3 に基づき、融雪設備の運転費と保守点検費との合計として算出した。

・運転費の算出

①冬期間における最低稼働時間の運転コストの設定

冬期間における施設の最低稼働時間は、§ 11 導入効果の検討 1)維持管理費 式 3-4 より算出する。

ここで、冬期間における合計降雪量の過去 10 年間の平均値は、基礎調査で収集した気象庁十日町観測所の気象データ（表 A-10）より 910 cm であった。また、設計時間降雪深は 3.14 cm/h（資料 A 3.1 必要熱量の算出を参照）であることから、両者より、冬期間における施設の最低稼働時間は 293 時間（= 910 cm ÷ 3.1 cm/h）となった。

表 A-10 合計降雪深

	合計降雪深 (cm)
平成 21 年度	966
平成 22 年度	1,066
平成 23 年度	1,166
平成 24 年度	1,084
平成 25 年度	839
平成 26 年度	1,051
平成 27 年度	602
平成 28 年度	755
平成 29 年度	888
平成 30 年度	676
平均	910

さらに、過去 10 年間の冬期間における月平均降雪量及び設計時間降雪量より、各月における施設の最低稼働時間を表 A-11 のとおり整理した。

表 A-11 冬期間における月毎の最低稼働時間

	月毎の合計降雪深 (cm)	月毎の融雪時間 (時間)
12 月	208	67
1 月	364	117
2 月	230	74
3 月	108	35
合計	910	293

②各技術における 1 時間当たりの運転費コストの設定

1) 建設費（年価換算値）の整理において設定した、各技術において使用する熱源・ポンプ機器の 1 時間当たりのエネルギー消費電力を、製品カタログ等により表 A-12 のとおり整理した。また、表 A-11 で整理した月毎の最低稼働時間から、冬期間における各技術のエネルギー消費電力量を表 A-13 のとおり整理した。

表 A-12 熱源・ポンプ機器の 1 時間当たりのエネルギー消費電力

	消費電力 (kW)			消費灯油量 (ℓ/時間)
	本技術	従来技術		
		電熱方式	石油焚き温水ボイラー方式	
ヒートポンプ	0.44	11.4	—	—
循環ポンプ	0.15	—	0.15	—
ボイラー	—	—	0.10	1.3
合計	0.59	11.4	0.25	1.3

表 A-13 総運転エネルギー消費電力量

	月平均降雪量 (cm)	各月の最低稼働時間 (h)	消費電力量 (kWh)		消費灯油量 (ℓ/年)		
			本技術	従来技術			
				電熱方式	石油焚き温水ボイラー方式		
12 月	208	67	40	705	17	87.1	
1 月	364	117	69	1,334	29	152.1	
2 月	230	74	44	844	19	96.2	
3 月	108	35	21	399	9	45.5	
合計	910	293	174	3,282	74	381	

表 A-13 で整理した最低稼働時間における各技術のエネルギー消費量と、実証フィールドにおける電力料金（東北電力「よりそう C スノー B（平成 31 年）」）と灯油料金（86 円/ℓ：配達価格・JA 十日町 2019.2.9 調査）から、最低稼働時間における各技術の運転費を以下のとおり整理した。

表 A-14 本技術の総運転コスト

契約電力	従量電灯 B		60 A
適用電気料金	基本料金 (未使用月は 1/2)		1,944 円/月
	電力料金	最初の 120 kWh まで	18.24 円/kWh
		120 kWh を超えて 300 kWh まで	24.87 円/kWh
		300 kWh を超える	28.75 円/kWh
使用期間	12 月 ~ 3 月		
項目	内訳		
基本料金	(12 月~3 月) 1,944 円/月 × 4 か月 =		7,776 円/年
	(4 月~11 月) 972 円/月 × 8 か月 =		7,776 円/年
電気料金	最初の 120 kWh まで : 174 kWh × 18.24 円/kWh・月 =		3,174 円/年
	120 kWh を超えて 300 kWh まで : 0 kWh × 24.87 円/kWh・月 =		0 円/年
	300 kWh を超える : 0 kWh × 28.75 円/kWh・月 =		0 円/年
合計			18,726 円/年

表 A-15 最低稼働時間における電熱方式の総運転費

契約電力	よりそう C スノー B		11.4 kW
適用電気料金 (東北電力契約)	電力料金	基本料金 (最初の 3 か月間)	1,922 円/月
		基本料金 (4 か月目以降)	454 円/月
		電力料金	11.75 円/kWh
使用電力量	50 m ² × 293 時間 =		3,282 kWh
項目	内訳		
基本料金	最初の 3 か月間 =		64,593 円/年
	4 か月目以降 =		5,080 円/年
	小計		69,973 円/年
電気料金	3,282 kWh × 11.75 円/kWh =		38,564 円/年
合計			108,237 円/年

表 A-16 最低稼働時間における石油焚き温水ボイラー方式の総運転費（電力分）

契約電力	従量電灯 B		60 A
適用電気料金	基本料金（未使用月は 1/2）		1,944 円/月
	電力料金	最初の 120 kWh まで	18.24 円/kWh
		120～300 kWh	24.87 円/kWh
		300 kWh を超える	28.75 円/kWh
使用期間	12 月～3 月		
項目	内訳		
基本料金	(12 月～3 月) 1,944 円/月 × 4 か月 =		7,776 円/年
	(4 月～11 月) 972 円/月 × 8 か月 =		7,776 円/年
電気料金	最初の 120 kWh まで : 74 kWh × 18.24 円/kWh・月 =		1,350 円/年
	120 kWh ～300 kWh : 0 kWh × 24.87 円/kWh・月 =		0 円/年
	300 kWh を超える : 0 kWh × 28.75 円/kWh・月 =		0 円/年
合計	16,902 円/年		

なお、石油焚き温水ボイラー方式で使用する灯油の消費量は、表 A-13 に整理したとおり 381 ℓ であることから、灯油分の運転費は 32,766 円となった。

したがって、最低稼働時間における石油焚き温水ボイラー方式の運転費は、表 A-16 で整理した電力分の運転費と合わせて、49,668 円となった。

以上より、各技術における 1 時間当たりの運転コストは以下のとおり設定した。

- ・本技術 : $(18,726 \text{ 円/年}) / (293 \text{ h/年}) = 64 \text{ 円/h}$
- ・石油焚き温水ボイラー方式 : $(49,668 \text{ 円/年}) / (293 \text{ h/年}) = 169 \text{ 円/h}$
- ・電熱方式 : $(108,237 \text{ 円/年}) / (293 \text{ h/年}) = 369 \text{ 円/h}$

③運転時間の設定

導入効果の検討においては、冬期間の全時間において運転する設定とし、運転時間は、24 時間 (= 121 日 × 24 時間) = 2,904 時間/年とした。

④各技術における運転費の算出

①及び②で設定した各技術における 1 時間当たりの運転コスト並びに③で設定した運転時間より、冬時間における各技術の運転費は表 A-17 のとおりとした。

表 A-17 冬期間における各技術の運転費

	運転費用 (千円)	備考
本技術	186	64 円/h × 2904h = 185,856 円
石油焚き温水ボイラー方式	491	169 円/h × 2904h = 490,776 円
電熱方式	1,072	369 円/h × 2904h = 1,071,576 円

・保守点検費及び維持管理費の算出

実証研究では、融雪設備の保守点検費及び維持管理費として、実証フィールド周辺における他の融雪設備に関する実績より 20 千円/年と設定した。表 A-18 に点検費用として示す。以上より、年間の維持管理費は表 A-19 のとおりとした。

表 A-18 点検費用

	点検費 (千円/年)
本技術	20
石油焚き温水ボイラー方式	20
電熱方式	20

表 A-19 維持管理費

	運転費用 (千円/年) A	点検費 (千円/年) B	合計 (千円/年) A + B
本技術	186	20	206
石油焚き温水ボイラー方式	491	20	511
電熱方式	1,072	20	1,092

3) 総費用 (年価換算値)

表 A-20 に 1)建設費と 2)維持管理費を合算した総費用 (年価換算値) を示す。

表 A-20 維持管理費

	建設費 (千円/年) A	維持管理費 (千円/年) B	合計 (千円/年) A + B
本技術	487	206	693
石油焚き温水ボイラー方式	318	511	829
電熱方式	358	1,092	1,450

(2) エネルギー消費量

§ 11 導入効果の検討の式 2-2 に基づき、表 A-12 で整理した熱源・ポンプ機器の 1 時間当たりのエネルギー消費量と、冬期間における運転時間 2,904 時間から、以下のとおり各技術におけるエネルギー消費量を算出した。

(i) エネルギー消費量の算出

- ・本技術 : $0.59 \text{ kW} \times 2,904 \text{ h} = 1,713 \text{ kWh}$
- ・石油焚き温水ボイラー方式 : $0.25 \text{ kW} \times 2,904 \text{ h} = 726 \text{ kWh}$

式 2-4 により灯油によるエネルギー消費量を kWh に換算した上で算出した。灯油使用量は、1 時間当たりの消費量 1.3 l/h に時間 2,904 h を乗じることで 3,775 l を算出し、これを消費電力に換算した。

よって、 $36.7 \text{ MJ/l} \times 1.3 \text{ l/h} \times 0.278 \text{ kWh/MJ} \times 2,904 \text{ h}$ から $38,517 \text{ kWh}$ となる。合算することで、 $39,243 \text{ kWh}$ を算出した。

・電熱方式： $11.4 \text{ kW} \times 2,904 \text{ h} = 33,106 \text{ kWh}$

表 A-21 本技術及び従来技術の冬期間におけるエネルギー消費量

	本技術	石油焚き温水 ボイラー方式	電熱方式
消費電力量 (kWh)	1,713	39,243	33,106
削減効果	—	96%	95%

(3) 温室効果ガス排出量

§ 11 導入効果の検討 式 2-4 及び式 2-5 に基づき、各技術の温室効果ガス排出量を以下のとおり算出した。なお、電気の温室効果ガス排出係数は、「電気事業者別排出係数（特定排出者の温室効果ガス排出量算定用）－平成 29 年度実績－H30.12.27 環境省・経済産業省公表」（https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/h31_coefficient_rev.pdf）に記載のある「一般送配電事業者」の東北電力株式会社の数値 $0.496 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh}$ を使用した。また灯油の温室効果ガス排出係数は、「特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令（平成三十年経済産業省・環境省令第八号）第二条 7 及び別表第一」より、 $36.7 \times 0.0185 \times 44/12 = 2.489 \text{ kg-CO}_2/\text{L}$ を使用した。

(i) 消費電力又は灯油使用量

本技術及び従来技術は、エネルギー消費量での項目と同様に算出した。

(ii) 温室効果ガス排出量の算出

- ・本技術： $1,713 \text{ kWh} \times 0.496 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh} = 849.6 \text{ kg-CO}_2$
- ・石油焚き温水ボイラー方式：灯油燃焼分 $3,775 \text{ L} \times 2.489 \text{ kg-CO}_2/\text{L} = 9,395.9 \text{ kg-CO}_2$
 電気使用分 $726 \text{ kWh} \times 0.496 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh} = 360 \text{ kg-CO}_2$
 よって、 $9,395.9 \text{ kg-CO}_2 + 360 \text{ kg-CO}_2 = 9,755.9 \text{ kg-CO}_2$
- ・電熱方式： $33,106 \text{ kWh} \times 0.496 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh} = 16,420.6 \text{ kg-CO}_2$

表 A-22 本技術及び従来技術の冬期間における温室効果ガス排出量

	本技術	石油焚き温水 ボイラー方式	電熱方式
温室効果ガス排出量 (kg-CO ₂)	849.6	9,755.9	16,420.6
削減効果	—	91%	95%

A.3 設計

A.3.1 必要熱量の算出

(1) 設計時間降雪深

§ 10 基礎調査の内容をもとに設計時間降雪深を算出する。平均日降雪深は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾に記載されている十日町市における降雪日当たりの平均日降雪深の分布より、17.4 cm/日を使用した。

設計時間降雪深は、式 4-4 より算出し、施設が保有する融雪能力となる。なお、この式は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾の記載内容を参考にした。

<設計時間降雪深>

$$\begin{aligned}h_s &= 0.425 \times H_m^{0.7} \\ &= 0.425 \times (17.4)^{0.7} \\ &= 3.14 \text{ (cm/h)}\end{aligned}$$

表 A-23 気象条件

	記号	単位	数値	備考
平均日降雪深	H_m	cm/日	17.4	※1
設計時間降雪深	h_s	cm/h	3.14	

※1 「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾に記載の考え方を参考

(2) 単位面積当たりの必要熱量

ヒートポンプ運転時の必要熱量は、§ 14 必要熱量の算出 式 4-1～式 4-9 により算出する。算出に使用した値は、表 A-24 のとおりであり、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾に記載の式及び数値、データ等を参考にした。融雪又は凍結防止に必要な熱量は、「i. 融雪に必要な熱量」と「ii. 凍結防止に必要な熱量」を算出し、大きい方を単位面積当たりの必要熱量 q (W/m²)とする。

「i. 融雪に必要な熱量」を算出する。

$$\begin{aligned}q_s &= 2.78 (c \cdot \Delta\theta \cdot h_s \cdot \rho_s) \\ &= 2.78 \times 2.1 \times 0.7 \times 3.14 \times 0.07 = 0.9 \text{ (W/m}^2\text{)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}q_n &= 2.78 (J \cdot h_s \cdot \rho_s) \\ &= 2.78 \times 334 \times 3.14 \times 0.07 = 204.1 \text{ (W/m}^2\text{)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}q_1 &= 1/\eta \cdot (q_s + q_n) \\ &= 1/0.9 \times (0.9 + 204.1) \\ &= 228 \text{ (W/m}^2\text{)}\end{aligned}$$

「ii. 凍結防止に必要な熱量」を算出する。

$$\begin{aligned}q_2 &= 1/\eta \cdot q_i \\ &= 1/0.9 \times 30.9 \\ &= 34.4 \text{ (W/m}^2\text{)}\end{aligned}$$

<対流輻射熱>

$$q_i = (\alpha_c + \alpha_r) \cdot (T_m - T_a)$$

$$= (13.8 + 4.4) \times (1.0 + 0.7) = 30.9 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

<対流による表面熱伝導率>

設定した風速 $u = 2.0$ より、

$$\alpha_c = 5.8 + 4.0 \cdot u \text{ (風速 } u \leq 5\text{m/s の時)}$$

$$= 5.8 + 4.0 \times 2.0 = 13.8 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$$

<輻射による表面熱伝導率>

$$\alpha_r = 5.41 / (T_m - T_a) \cdot \{ [(273 + T_m) / 100]^4 - [(273 + T_a) / 100]^4 \}$$

$$= 5.41 / (1.0 + 0.7) \cdot \{ [(273 + 1.0) / 100]^4 - [(273 - 0.7) / 100]^4 \}$$

$$= 4.4 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$$

以上より、 $q_1 > q_2$

$$228 > 34.4$$

$q_1 = 228 \text{ (W/m}^2\text{)}$ を必要発熱量として採用する。

表 A-24 ヒートポンプ運転時の必要熱量算出設定値

	記号	単位	数値	備考
雪の比熱	c	J/g/°C	2.1	※1
雪温	$\Delta\theta$	°C	0.7	※2
設計時間降雪深	h_s	cm/h	3.14	
雪の密度	ρ_s	g/cm ³	0.07	※1
雪の融解潜熱	J	J/g	334	※1
熱効率	η	—	0.9	※1
路面温度	T_m	°C	1.0	※1
外気温度	T_a	°C	-0.7	※2
風速	u	m/s	2.0	※2
顕熱	q_s	W/m ²	0.9	
融解熱	q_n	W/m ²	204.1	
対流輻射熱	q_i	W/m ²	30.9	
対流による表面熱伝導率	α_c	W/m ² ・°C	13.8	
凍結防止に必要な熱量	q_2	W/m ²	34.4	
単位面積当たりの必要熱量	q_l	W/m ²	228	

※1 「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾

※2 導入地域の外気温データより

雪の比熱は、 $c = 2.1 \text{ J/g/°C}$ を使用した。雪温は、雪を 0 °C まで高める温度であり、気象庁十日町観測所の研究前年度の気象データより冬期間で最も気温の低い月となる平均日最低気温が -0.7 °C であることから、絶対値となる $\Delta\theta = 0.7\text{°C}$ を使用した。

設計時間降雪深は、前頁の計算結果より $h_s = 3.14 \text{ cm/h}$ を使用した。

雪の密度は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾を参考に、表 A-23 で設定した外気温度と時間降雪深より、 $\rho_s = 0.07 \text{ g/cm}^3$ を使用した。

熱効率は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾を参考に、該当箇所が土工部におけるアスファルト舗装であることから、 $\eta = 0.9$ を使用した。

路面温度は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾を参考に $1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ とし、外気温度は上記の平均日最低気温より $-0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ を使用した。

風速は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾を参考に、気象庁十日町観測所の研究前年度の気象データから得られた、冬期間で最も気温の低い月の平均風速 1.3 m/s と 2.0 m/s と比較し、大きい方の 2.0 m/s を用いた。

(3) 全体必要熱量

ヒートポンプ運転時の必要熱量は、§ 14 必要熱量の算出 式 4-10～式 4-11 により算出する。算出に使用した値は、表 A-25 に示すとおりである。

実証研究では、熱源水配管からの損失熱量について、熱源水配管を保温材で被覆するとともに、送水距離が 10.0 m と非常に短いことから、熱源水配管からの温度低下量は (Δt_2) は 0 とみなし、損失熱量 (q_3) は発生しないものとした。

<全体必要熱量>

$$Q_a = (q \cdot A + q_3) / 1,000 = (228 \times 50.0 + 0) / 1,000 = 11.4 \text{ (kW)}$$

<熱源水配管 (送水管) からの損失熱量>

$$q_3 = Q_r \cdot \rho_w \cdot C_w \cdot \Delta t_2 = 0.0004 \times 1,037 \times 3,807 \times 0 = 0 \text{ (W)}$$

表 A-25 必要熱量の算出設定値

	記号	単位	数値	備考
単位面積当たりの必要熱量	q	W/m^2	228	
融雪面積	A	m^2	50.0	
熱源水の密度	ρ_w	kg/m^3	1,037	
熱源水の比熱	C_w	$\text{J/kg}^\circ\text{C}$	3,807	
送水管からの温度低下量	Δt_2	$^\circ\text{C}$	0	
必要熱量	Q_a	kW	11.4	
熱源水配管 (送水管) からの損失熱量	q_3	W	0	

A.3.2 放熱設備の設計

(1) 全体の送水量

全体の送水流量は、§ 15 放熱設備の設計 式 4-12～式 4-13 より算出する。放熱管流速は、§ 15 表 4-4 「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾により、一般的には $0.6 \sim 1.0 \text{ m/s}$ で計画することから、研究体では 0.6 m/s で設定した。算出に使用した値は、表 A-26 のとおりである。また、一般的な放熱管の1パネル面積は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾によると $10 \sim 20 \text{ m}^2/\text{パネル}$ が望ましいことから、4パネル ($12.5 \text{ m}^2/1 \text{ パネル}$) とした。

<1 パネル当たりの熱源水の流量>

$$q_r = \pi \cdot d^2 \cdot V / 4 = \pi \times (0.0143)^2 \times 0.6 / 4 = 0.000096 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

<放熱設備の熱源水の流量>

$$Q_r = q_r \cdot n = 0.000096 \times 4 = 0.000385 \text{ (m}^3/\text{s)} = 23.1 \text{ (l/min)}$$

表 A-26 全体の送水量

	記号	単位	数値	備考
放熱管 (内径)	d	m	0.0143	
放熱管内流速	V	m/s	0.6	※1
放熱管パネル数	n	パネル	4	
1 パネル当たりの熱源水の流量	q_r	m ³ /s	0.000096	
放熱設備の熱源水の流量	Q_r	m ³ /s	0.000385	

※1 「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾に記載の考え方を参考

(2) 放熱管の平均通水温度

放熱管の平均通水温度は、§ 15 放熱設備の設計 式 4-14～式 4-15 より算出する。算出に使用した値を表 A-27 に示す。また、上部放熱量 q_u は、「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾によると単位面積当たりの必要熱量であり、「i. 熱効率を考慮しない融雪の熱量」、「ii. 凍結防止に必要な熱量」のうち大きい値を使用する。本施設の路盤構成図は図 A-3 に示す。

<放熱管の平均通水温度>

$$\begin{aligned} \bar{T} &= q_u \frac{l_1 + l_2}{2\lambda} + q \frac{a'}{2\pi\lambda_p l} \ln \frac{d_o}{d_i} + T_m \\ &= 205 \times \frac{(0.109 + 0.079)}{2 \times 1.4} + 228 \times \frac{12.5}{8293.8} \times \ln \frac{0.01588}{0.01428} + 1.0 \\ &= 14.8 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

<上部放熱量>

「i. 熱効率を考慮しない融雪の熱量」 > 「ii. 凍結防止に必要な熱量」

$$\begin{aligned} q_u &= q_s + q_n = 0.9 + 204.1 = 205 > 34.4 \text{ W/m}^2 \\ &= 205 \text{ (W/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

表 A-27 放熱管の平均通水温度

項目	記号	単位	数値	備考
単位面積当たりの必要熱量	q	W/m ²	228	
顕熱	q_s	W/m ²	0.9	
融解熱	q_n	W/m ²	204.1	
凍結防止に必要な熱量	q_2	W/m ²	34.4	
上部放熱量	q_u	W/m ²	205	
路面温度	T_m	°C	1.0	※1
1 パネル当たりの放熱管の面積	a'	m ²	12.5	
舗装の熱伝導率	λ	W/m°C	1.4	※1
放熱管の熱伝導率	λ_p	W/m°C	16.0	
1 パネル当たりの放熱管の長さ	l	m	82.5	
放熱管の外径	d_o	m	0.0159	
放熱管の内径	d_i	m	0.0143	
放熱管の設置間隔	p	m	0.15	路盤構成図
放熱管中心から路面までの最長距離	l_1	m	0.109	路盤構成図
放熱管中心から路面までの最短距離	l_2	m	0.079	路盤構成図
放熱管の平均通水温度	\bar{T}	°C	14.8	

※1 「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾に記載の考え方を参考

実証研究施設の路盤構成は、図 A-3 に示すとおりであり 150 mm のコンクリート材を、表層には車の通行による維持管理を想定して 50 mm のアスファルト材を配置する構造とした。路盤構成図における放熱設備の設定は、表 A-28 のとおりとした。

また実証研究では、表層のアスファルト層にひび割れが入り雨水が放熱管周りのコンクリート層まで浸入した場合を想定し、放熱設備（放熱管）は 15 年で更新する設定とした。

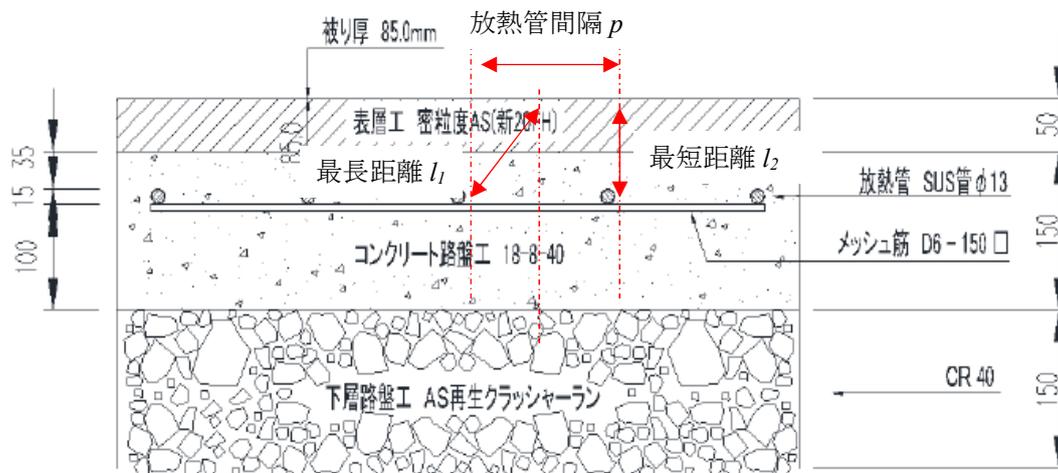


図 A-3 実証研究施設の路盤構成図

表 A-28 路盤構成図における放熱設備の設定

項目	記号	単位	数値・内容	備考
放熱管の材質	—	—	SUS	
放熱管の口径	—	—	15A	
放熱管の設置間隔	p	m	0.15	路盤構成図
放熱管中心から路面までの最長距離	l_1	m	0.109	路盤構成図
放熱管中心から路面までの最短距離	l_2	m	0.079	路盤構成図

(3) 放熱による温度低下及び熱源水の放熱管入口温度

運転時の放熱による温度低下は、式 4-16～式 4-17 により算出する。算出に使用した値を表 A-29 に示す。

<放熱による温度低下及び熱源水の温度>

$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= \frac{q a'}{q' \rho_w C_w} \\ &= \frac{228 \times 12.5}{0.000096 \times 1,037 \times 3,807} \\ &= 7.5 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_1 &= t + \frac{1}{2} \Delta t_1 \\ &= 14.8 + 3.75 \\ &= 18.6 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

表 A-29 放熱による温度低下及び熱源水の温度

項目	記号	単位	数値
単位面積当たりの必要熱量	q	W/m ²	228
1 パネル当たりの放熱管の面積	a'	m ²	12.5
1 パネル当たりの熱源水の流量	q'	m ³ /s	0.000096
熱源水の密度	ρ_w	kg/m ³	1,037
熱源水の比熱	C_w	J/kg [°] C	3,807
放熱による温度低下	Δt_1	°C	7.5
熱源水の放熱管入口温度	t_1	°C	18.6

(4) 熱交換器からの放熱管行き温度（採熱管還り温度）

熱交換器からの放熱管行き温度は、式 4-18 より算出する。算出に使用した値は、表 A-30 のとおりである。

$$T_a = t_1 + \Delta t_2 = 18.6 - 0.2 = 18.4 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

表 A-30 熱交換器からの放熱管行き温度

	記号	単位	数値	備考
放熱管入口温度	t_1	°C	18.6	
送水管からの温度低下	Δt_2	°C	0.2	※1
放熱管行き温度	T_a	°C	18.4	

※1 「路面消・融雪施設等設計要領」⁴⁾に記載の考え方を参考

A.3.3 採熱設備の設計

(1) 採熱管の本数

実証研究では、口径 400 mm を用いた。また、基礎調査から得られた最低水深の計測結果 (62.2 mm) を踏まえて、表 4-5 より採熱管の本数は 24 本とした。

(2) 採熱管の延長

下水から得られる採熱量を確認し、計画する必要熱量が不足する場合には、延伸させるか検討を行う。

(3) 下水熱の採熱量及び採熱管 1 本当たりの流速

下水熱の採熱量は、式 4-19～式 4-21 により算出する。算出に使用した値を表 A-31 に示す。なお、実証研究では、下水熱からの採熱量は必要熱量の 7 割以上となるよう設定した。また、総括伝熱係数は、実証研究等で確認した $30.1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ を使用した。実証研究で使用した素材の熱伝導率は、更生材が $0.21 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ （不飽和ポリエステル樹脂）、採熱管は $0.35 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ （ポリエチレン樹脂）である。

<下水熱の採熱量>

$$A = N \cdot D \cdot L = 24 \times 0.013 \times 102.8 = 32.07 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_L &= \frac{(T_1 - T_a) - (T_2 - T_b)}{\ln(T_1 - T_a) - \ln(T_2 - T_b)} \\ &= \frac{(13.6 - 5.9) - (13.5 - 1.3)}{\ln(13.6 - 5.9) - \ln(13.5 - 1.3)} \\ &= \frac{7.7 - 12.2}{2.04 - 2.50} \\ &= 9.78 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

$$Q_v = U \cdot A \cdot \Delta T_L = 30.1 \times 32.07 \times 9.78 = 9.4 \text{ (kW)}$$

$$Q_{v2} = Q_a \cdot 0.7 = 11.4 \times 0.7 = 8.0 \text{ (kW)}$$

$$\rightarrow Q_v = 9.4 \text{ (kW)} > Q_{v2} = 8.0 \text{ (kW)} \quad \text{ok!}$$

表 A-31 下水熱の採熱量

	記号	単位	数値・内容
上流側下水温度	T_1	°C	13.6
下流側下水温度	T_2	°C	13.5
採熱管行き温度	T_a	°C	5.9
採熱管還り温度	T_b	°C	1.3
総括伝熱係数	U	W/m ² ・°C	30.1
採熱管設置本数	N	本	24
採熱管設置延長	L	m	102.8
採熱管外径	D	m	0.013
必要熱量	Q_a	kW	11.4
採熱管接触面積	A	m ²	32.07
下水 - 熱源水対数平均温度差	ΔT_L	°C	9.76
下水熱の採熱量	Q_v	kW	9.4
必要とする下水熱の採熱量	Q_{v2}	kW	8.0

採熱管 1 本当たりの流速は、式 4-22～式 4-24 により算出する。算出に使用した値を表 A-32 に示す。使用した採熱管の内径は、使用した製品の寸法であり、その内径寸法から断面積を算出した。また、採熱管は、設置延長に対して端部の人孔内にて折り返す構造としたため計算では半分の本数となる。

<採熱設備の流量>

$$Q_m = Q_v / \Delta t_2 / (\rho_w C_w) = 9.4 / 4.6 / (1,037 \times 3,087) \times 1,000$$

$$= 0.00064 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

よって、採熱管 1 本の流量 $Q_r = 0.00059 / 12 = 0.000053 \text{ (m}^3\text{/s)}$

<採熱管 1 本当たりの流速>

$$V_m = \frac{Q_r}{a} = \frac{0.000053}{0.00007} = 0.8 \text{ (m/s)}$$

表 A-32 採熱管流速

	記号	単位	数値・内容
下水の採熱量	Q_v	kW	9.4
熱源水の温度差	Δt_2	°C	4.6
採熱管行き温度	T_a	°C	5.9
採熱管還り温度	T_b	°C	1.3
熱源水の密度	ρ_w	kg/m ³	1,037
熱源水の比熱	C_w	J/kg°C	3,807
設置本数の半分	n	本	12
採熱管 1 本当たりの流量	Q_r	m ³ /s	0.000053
採熱管の内径	D	m	0.010
採熱管の断面積	a	m ²	0.00007
採熱設備の流量	Q_m	m ³ /s	0.00064
採熱管 1 本当たりの流速	V_m	m/s	0.8

実証研究では、管路更生技術の一つである形成工法に分類される「光硬化工法（アルファライナー工法）」を採用しており、この技術の施工範囲について表 A-33 に示す。また下水道管路内へ採熱管を設置できる本数は、表 4-5 で示すとおり口径によって変化する。なお本技術は、管路更生にあたり現行のガイドライン（「管きょ更生工法における設計・施工管理ガイドライン 2017 年版」（日本下水道協会））に基づき施工すれば、採用しても問題が生じないことを確認している。

表 A-33 適用範囲^{※1}

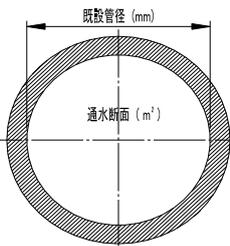
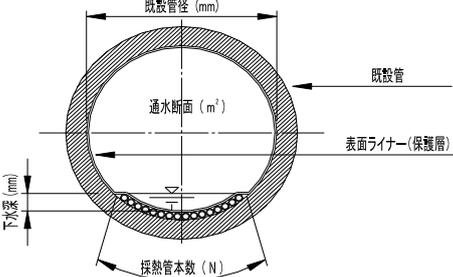
項目	適用範囲
下水道管路の口径	250～800 mm
段差	口径の 5%以下（最大 40 mm 以下）
継手隙間	50 mm 以下
クラック	ランク a ^{※2} のクラックでも施工可
浸入水	ランク a ^{※2} でも施工可
取付け管の突出し	撤去すれば施工可
堆積物	撤去すれば施工可
下水道管路の曲がり	口径 350 mm 未満：10%以下 口径 350 mm 以上：5%以下
管種	鉄筋コンクリート管、硬質塩化ビニル管等
水位	口径の 10%以上

※1：出典 「下水道管きょの更生工法（自立管） -形成工法- アルファライナー工法」（建設技術審査証明報告書 公益財団法人日本下水道新技術機構）

※2：出典 「下水道維持管理指針実務編 -2014 年版-」（公益社団法人日本下水道協会）

通常の管路更生と同様に既設管へ更生材を適用させる段階にて流量に関する確認を行う。参考までに、採熱管を固定する更生材料の材質と通水する断面積を図化して流量計算を行った口径 250 mm の下水道管路での例を表 A-34 に示す。表面の粗度係数は $n = 0.010$ 、既設管の粗度係数を $n = 0.013$ （「日本道路協会 道路土工—排水工指針」マンシングの粗度係数より引用：コンクリート 2 次製品はマンシングの粗度係数 $n = 0.013$ ）を用いて採熱管を 16 本設置した場合は、通水面積は縮小するが、粗度係数が改善されるため通水流量を保つことが可能となる。

表 A-34 断面図

		各断面図				
		既設管	本技術			
既設管 の口径	設定水位					
	250 mm	40 mm	0.0491 m ²	0.0440 m ²	通水面積	
	15%	100 %	89.6 %			
計算値	40 mm	断面積	0.0491 m ²	断面積	0.0440 m ²	N = 16 本
		潤辺	0.7854 m	潤辺	0.7461 m	
		径深	0.0625 m	径深	0.0590 m	
	15%	流速	0.6635 m/s	流速	0.8301 m/s	
		流量	0.0326 m ³ /s	流量	0.0365 m ³ /s	

A.3.4 操作・制御設備の設計

(1) ヒートポンプで設定した送り出し温度の留意点

ヒートポンプで設定した送り出し温度と不凍液の温度とが一致していることを確認することが望ましい。実証研究施設では、写真 A-16 のとおり不凍液の温度を計測し、設計値どおり 18.6 °C と一致していることを確認したうえで運転を行った。



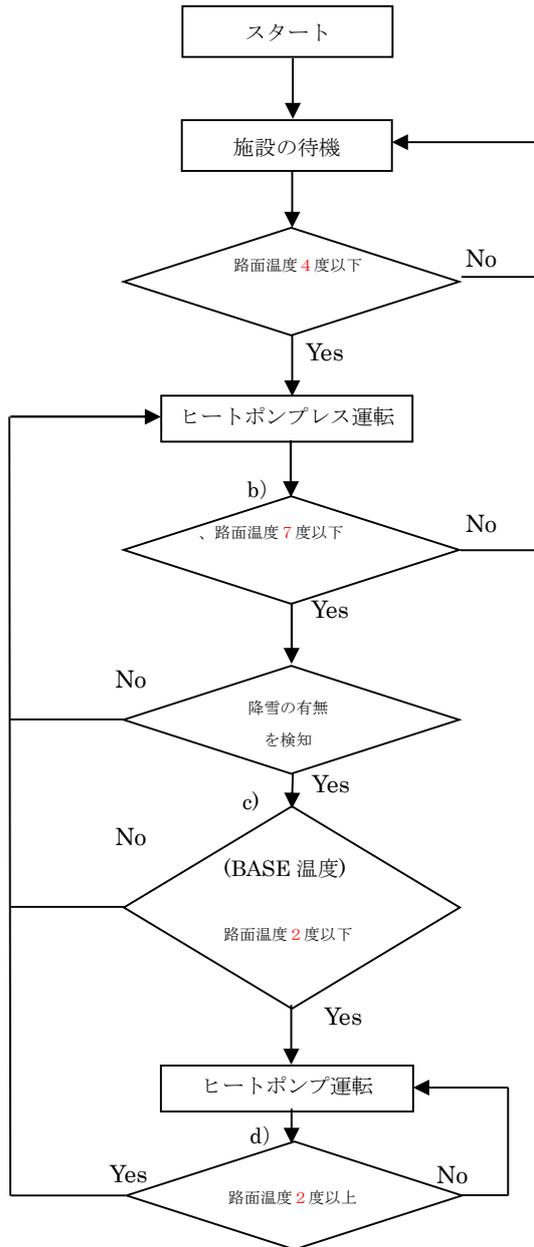
写真 A-16 温度センサの設置

(2) 運転条件

本技術は、ヒートポンプレス運転、ヒートポンプ運転、施設の稼働・停止を含むシステムである。この運転を行うためには、制御フローを構築する必要がある。

実証研究では、ヒートポンプレスとヒートポンプ運転との切替え条件として、「路面温度」及び「外気温度」での制御とした。そのため、図 A-4 に示すフロー制御にて路面温度を切替え条件とする A モード、外気温度を切替え条件とする B モードの 2 種類にて運転した。

A モード (路面温度制御)



B モード(外気温度制御)

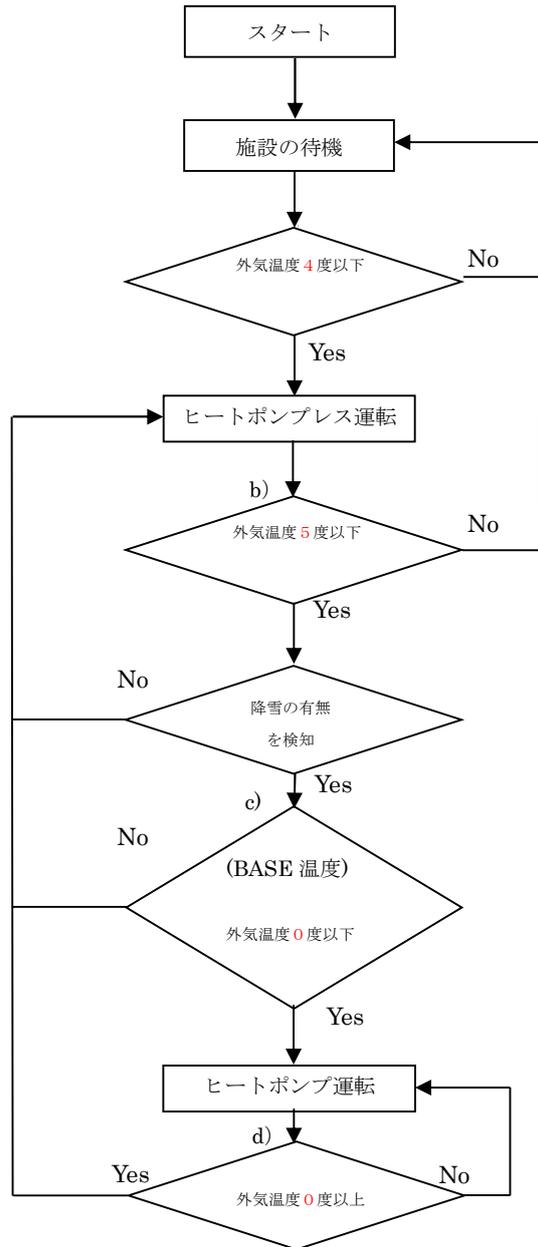


図 A-4 フロー運転の詳細

「路面温度」(A モード)、「外気温度」(B モード)での制御としたが、このヒートポンプレスとヒートポンプ運転との切り替え条件となる運転の開始温度のことを「BASE 温度」と呼んでいる。実証研究では、ヒートポンプ運転の開始温度 (BASE 温度) は、路面温度で 2 °C、外気温度で 0 °C としたが設定の根拠について以下に示す。

外気温度の設定は、表 A-35 のとおりであり、冬期間 (12 月～3 月) での十日町市における 10 年間の平均日最低外気温度は、-0.7 °C であったことから、運転切り替えの温度条件として 0 °C を採用した。また、路面温度は、路面制御の融雪を実施している都市での設定例を参考にして、運転切り替えの温度条件として 2 °C を採用することとした。また、この BASE 温度以外の設定は、可能な限り下水熱のみで融雪を行う設定とした。

以上より、実証研究施設での運転条件は、表 A-36 の温度設定で運用した。

表 A-35 日最低外気温度

	日最低外気温度 (°C)
平成 21 年度	-0.1
平成 22 年度	-1.8
平成 23 年度	-1.6
平成 24 年度	-1.3
平成 25 年度	-1.1
平成 26 年度	-0.3
平成 27 年度	0.2
平成 28 年度	0.0
平成 29 年度	-0.9
平成 30 年度	-0.3
平均	-0.7

表 A-36 各運転の運転条件

		実証研究施設の設定
ヒートポンプレス運転	a) 開始温度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 路面温度：4°C以下 ・ 外気温度：4°C以下
	b) 停止温度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 路面温度：7°C以下 ・ 外気温度：5°C以下
ヒートポンプ運転 【BASE 温度】	c) 開始温度	以下の制御の、どちらか一方を選択できる方式 <ul style="list-style-type: none"> ・ 路面温度：2°C以下 ・ 外気温度：0°C以下
	d) 停止温度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 路面温度：2°C以上 ・ 外気温度：0°C以上

(3) 循環ポンプの設計

循環ポンプの設計は、式 4-25～式 4-31 により算出した値を用いて選定する。算出にあたって、まずは、放熱設備側に必要な揚程を式 4-26～式 4-28 により算出し、次頁の採熱側と合算する。算出に使用した値を表 A-37 に示す。

<放熱設備側に必要な揚程（往き）>

$$h_a = \{0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times d_a) / \sqrt{v_a}\} \times (L_a / d_a) \times v_a^2 / (2g)$$

$$= \{0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times 0.025) / \sqrt{0.8}\} \times (10 / 0.025) \times (0.8)^2 / (2 \times 9.81)$$

$$= 0.38 \text{ (m)}$$

<放熱設備の流速>

$$v_a = \frac{Q_r}{a-2} = \frac{0.000385}{0.000491} = 0.8 \text{ (m/s)}$$

<放熱設備に必要な揚程>

$$h_1 = h_a + h_b = 0.38 + 0.38 = 0.76 \text{ (m)}$$

表 A-37 循環ポンプの選定（放熱側）

項目	記号	単位	数値・内容	備考
放熱設備の熱源水配管の延長（往き）	L_a	m	10.0	
放熱設備の熱源水配管の内径（往き）	d_a	m	0.025	
放熱側の熱源水配管の断面積	$a-2$	m ²	0.000491	
放熱設備の熱源水配管内の平均流速（往き）	v_a	m/s	0.8	
放熱設備の熱源水配管の延長（還り）	L_b	m	10.0	= L_a
放熱設備の熱源水配管の内径（還り）	d_b	m	0.025	= d_a
放熱設備の熱源水配管内の平均流速（還り）	v_b	m/s	0.8	= v_a
重力加速度	g	m/s ²	9.81	
放熱設備に必要な揚程	h_1	m	0.76	
放熱設備に必要な揚程（往き）	h_a	m	0.38	
放熱設備に必要な揚程（還り）	h_b	m	0.38	= h_a
放熱設備の流量	Q_r	m ³ /s	0.000385	

採熱設備側に必要な揚程は、式 4-29～式 4-31 により算出する。設定した値を表 A-38 に示す。

<採熱設備側に必要な揚程（往き）>

$$h_c = \{0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times d_c) / \sqrt{v_c}\} \times (L_c / d_c) \times v_c^2 / (2g)$$

$$= \{0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times 0.030) / \sqrt{0.9}\} \times (22.8 / 0.030) \times (0.8)^2 / (2 \times 9.81)$$

$$= 0.86 \text{ (m)}$$

<採熱設備の流速>

$$v_c = \frac{m}{a-2} = \frac{0.00064}{0.0007} = 0.9 \text{ (m/s)}$$

<採熱設備側に必要な揚程>

$$h_2 = h_c + h_d + h_e = 0.86 + 0.86 + 3.0 = 5.14 \text{ (m)}$$

<全揚程>

$$h = h_1 + h_2 = 0.76 + 5.14 = 5.90 \text{ (m)}$$

表 A-38 循環ポンプの選定（採熱側）

項目	記号	単位	数値・内容	備考
採熱設備の熱源水配管の延長（往き）	L_c	m	22.8	
採熱設備の熱源水配管の内径（往き）	d_c	m	0.030	
採熱側の熱源水配管の断面積	$a-2$	m ²	0.0007	
採熱設備の熱源水配管内の平均流速（往き）	v_c	m/s	0.9	
採熱設備の熱源水配管の延長（還り）	L_d	m	22.8	= L_c
採熱設備の熱源水配管の内径（還り）	d_d	m	0.030	= d_c
採熱設備の熱源水配管内の平均流速（還り）	v_d	m/s	0.9	= v_c
重力加速度	g	m/s ²	9.81	
採熱設備の揚程	h_2	m	5.14	
採熱設備に必要な揚程（往き）	h_c	m	0.86	
採熱設備に必要な揚程（還り）	h_d	m	0.86	= h_c
マンホール深	h_e	m	3.0	
採熱設備の流量	Q_m	m ³ /s	0.00064	
放熱設備に必要な揚程	h_l	m	0.76	
全揚程	h	m	5.9	

(4) 膨張タンクの設計

膨張タンクの選定は、表 4-10 より集計した値を用いて選定する。本施設での集計結果は、表 A-39 に示すとおり、246ℓであることから、300ℓ（容量 50～600ℓ）を設置した。

表 A-39 膨張タンクの仕様

項目	容量
融雪設備	放熱管内の容量 V_1 (ℓ) 管路径 (呼び径) : 13A 延長 : 80m パネル数 : 4 $\{(0.013/2)^2 \times \pi\} \text{ m}^2 \times 80\text{m} \times 4 = 0.0425 \text{ m}^3 = 42.5 \text{ ℓ}$
操作・制御設備	熱源水配管内の容量 V_2 (ℓ) 放熱側 : 管路径 (呼び径) : 25A 延長 : 10m 本数 : 2 $\{(0.025/2)^2 \times \pi\} \text{ m}^2 \times 10\text{m} \times 2 = 0.0098 \text{ m}^3 = 9.8 \text{ ℓ}$ 採熱側 : 管路径 (呼び径) : 30A 延長 : 22.8m 本数 : 2 $\{(0.030/2)^2 \times \pi\} \text{ m}^2 \times 22.8\text{m} \times 2 = 0.0322 \text{ m}^3$
採熱設備	熱源水配管内の容量 V_3 (ℓ) 管路径 (呼び径) : 10A 延長 : 102.8m 本数 : 2 $\{(0.010/2)^2 \times \pi\} \text{ m}^2 \times 102.8\text{m} \times 2 = 0.1937 \text{ m}^3 = 193.7 \text{ ℓ}$
合計	膨張タンクの容量 V_4 (ℓ) $> V_1 + V_2 + V_3 = 246$ (ℓ)

(5) 路面温度センサの配置

センサは、§ 17 操作・制御設備の設計を参考に記載事項について検討した。なお、実証試験で設置した路面温度センサの配置は、図 A-5 に示す。この中央に配置した路面温度でヒートポンプレス運転とヒートポンプ運転を制御した。

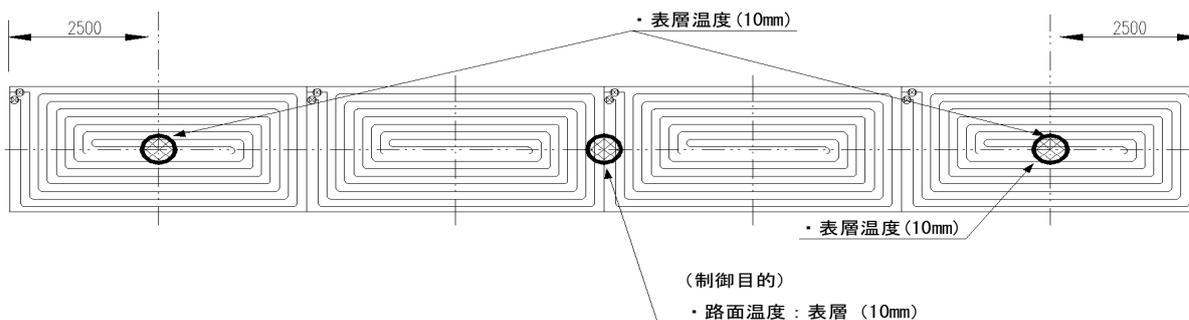


図 A-5 路面センサの配置図

A.4 研究結果

A.4.1 運転結果

(1) 研究1年目

計測期間の運転時間は表 A-40 のとおりであり、結果を表 A-41 に示す。

表 A-40 運転時間（研究1年目）

計測期間	運転	時間 (時間)
平成31年2月1日 ～平成31年2月28日	ヒートポンプ運転	50
	ヒートポンプレス運転	384
	停止	238

表 A-41 運転結果（研究1年目）

計測期間	運転日数	降雪日数
2月1日 ～ 2月5日	5日間	2日間
2月7日 ～ 2月11日	5日間	3日間
2月13日 ～ 2月17日	5日間	4日間
2月19日 ～ 2月23日	5日間	0日間
2月25日 ～ 2月28日	4日間	0日間

(2) 研究2年目（令和元年度）

計測期間の運転時間は表 A-42 のとおりであり、路面温度制御及び外気温度制御の運転結果を表 A-43 に示す。

表 A-42 運転時間（研究2年目）

計測期間	運転	時間 (時間)
令和元年12月19日 ～令和2年2月15日	ヒートポンプ運転	49
	ヒートポンプレス運転	692
	停止 (120時間はメンテナンス)	555

表 A-43 運転結果（研究2年目）

計測期間	運転日数	降雪日数
12月19日 ～ 12月26日	3日間	0日間
12月27日 ～ 1月9日	14日間	7日間
1月10日 ～ 1月23日	14日間	0日間
1月24日 ～ 1月29日	6日間	0日間
1月30日 ～ 2月3日	5日間	2日間
2月4日 ～ 2月8日	4日間	3日間
2月8日 ～ 2月15日	8日間	4日間

A.4.2 計測結果

(1) 融雪能力

本研究での融雪評価は、ヒートポンプ運転時の融雪状況を評価対象とし、ヒートポンプが安定して連続稼働した時間を評価対象時間帯として1時間毎に評価を行った。ただし、ヒートポンプ運転とヒートポンプレス運転の切り替えが頻繁に起こってしまった時のように、連続的に稼働しなかった場合や、設計値を超える降雪深（3.14 cm/h）や残雪による影響も判定から除外している。なお、設計値以上の降雪深があった場合は、今回の条件では残雪が見られた。

判定の方法は、融雪面積が 50 m² の融雪施設の全てに積雪のない状態で路面のアスファルト色が確認できることとした。この確認は、融雪施設の周囲に 5 台の定点式カメラを常設し、融雪の状況を記録することで画像から目視にて行った。結果は表 A-44 のとおりであり、車道融雪として、概ね融雪性能が実用できる融雪能力を確認した。

表 A-44 融雪評価の結果

記号	判定内容	研究1年目	研究2年目	総合評価
○	100%融雪	79	22	101
		85.9%	100.0%	88.6%
×	残雪	13	0	13
		13.2%	0.0%	11.4%
評価対象外	設計値以上の積雪量	53	22	75
合計	有効判定 (○+×)	92	22	114
	評価時間の合計	144	44	188

総合評価：88.6% (=101/114)



○：100%融雪（路面色を確認）

×：残雪あり

写真 A-17 定点式カメラ評価例

(2) 放熱量及び採熱量

研究1年目及び研究2年目で得られた各種計測結果を表 A-45 に示す。本実証研究では、下水から回収した熱量となる循環水温度と流量より採熱量を算出し、融雪を終えた循環水温度と流量より放熱量を算出した。また、総合評価とは、運転時間、累積降雪量に関しては研究1年目及び研究2年目の合計値を指し、その他の項目に関しては、研究1年目及び研究2年目の平均値を指す。

表 A-45 各種計測の結果

	研究 1 年目	研究 2 年目	総合評価	備考
ヒートポンプ運転時間 (時間)	50	49	99	
ヒートポンプレス運転時間 (時間)	384	692	1076	
停止 (時間)	238	555	793	
累積降雪深 (cm)	48.5	55.5	104	
融雪時の路面温度 (°C)	0.7	1.6	1.2	
融雪時の外気温度 (°C)	-1.1	-1.4	-1.3	
放熱循環水温度 (還) (°C)	10.8	11.5	11.2	
放熱循環水温度 (往) (°C)	17.5	18.6	18.1	
融雪時の放熱量 (W/m ²)	212.3	235.1	223.7	
下水温度 (°C)	11.8	13.4	12.6	
採熱循環水温度 (還) (°C)	1.3	1.1	3.5	
採熱循環水温度 (往) (°C)	4.1	5.7	2.6	
融雪時の採熱量 (kW/m)	0.088	0.085	0.087	
消費電力平均 (kWh)	1.00	1.20	1.10	

以上の結果より放熱量・採熱量を整理すると、表 A-46 のとおりとなり、概ね設計を満足する性能を確認した。表 2-12 は、本施設を計画する段階での想定する冬期稼働時間 (2904 時間) であり、表 A-45 は実証期間中の実稼働時間である。

表 A-46 放熱量・採熱量

	設計値	研究 1 年目	研究 2 年目	総合評価	備考
融雪時の放熱量 (W/m ²)	228.0	212.3	235.1	223.7	
融雪時の採熱量 (kW/m)	0.085	0.088	0.085	0.087	

(3) 冬期間におけるエネルギー消費量

表 A-21 冬期間におけるエネルギー消費量と表 A-23 温室効果ガス排出量は、計画での運転時間とカタログでの消費電力であるが、ここでは、実証結果にて得られた実際の運転時間を用いて以下に整理した。

研究 1 年目及び研究 2 年目で得た計測結果から算出される 1 時間当たりのエネルギー消費量は表

A-47、冬期間での値は表 A-48 に示すとおりであり、エネルギー消費量は従来技術を下回ることを確認した。なお、研究1年目の運転時間は、表 A-40 より、ヒートポンプ運転 50 時間・ヒートポンプレス運転 384 時間、合計 434 時間の運転であり、研究2年目の運転時間は、表 A-42 より、ヒートポンプ運転 49 時間・ヒートポンプレス運転 692 時間、合計 741 時間の運転をもとに整理した。

表 A-47 1 時間当たりのエネルギー消費量

項目	研究1年目			研究2年目			総合評価		
	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式
エネルギー消費量 (kWh)	0.59	13.5	11.4	0.59	13.5	11.4	0.59	13.5	11.4
削減効果 (%)	—	95.7	94.9	—	95.7	94.9	—	96	95

表 A-48 冬期間におけるエネルギー消費量

項目	研究1年目			研究2年目			総合評価		
	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式
エネルギー消費量 (kW/年)	256.0	5865.0	4948.0	437.0	10013.0	8447.0	346.50	7939.0	6697.5
削減効果 (%)	—	95.7	94.9	—	95.7	94.9	—	96	95

(4) 温室効果ガス排出量

研究1年目及び研究2年目で得た計測結果から算出される1時間当たりの温室効果ガス排出量について表 A-49 に示す。また、冬期間での値は、表 A-50 に示すとおり、温室効果ガス排出量は従来施設を下回ることを確認した。なお、研究1年目の運転時間は、表 A-40 に示すとおり、ヒートポンプ運転 50 時間・ヒートポンプレス運転 384 時間、合計 434 時間の運転であり、研究2年目の運転時間は、表 A-42 より、ヒートポンプ運転 49 時間・ヒートポンプレス運転 692 時間、合計 741 時間の運転をもとに整理した。

表 A-49 1 時間当たりの温室効果ガス排出量

項目	研究1年目			研究2年目			総合評価		
	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式
消費電力 (kWh)	0.59	0.25	11.4	0.59	0.25	11.4	0.59	0.25	11.4
灯油使用量 (ℓ/h)	—	1.3	—	—	1.3	—	—	1.3	—
温室効果ガス排出量 (kg-CO ₂ /h)	0.30	3.38	5.905	0.29	3.37	5.654	0.295	3.375	5.78
削減効果 (%)	—	91.2	95	—	91.4	94.9	—	91	95

表 A-50 冬期間における温室効果ガス排出量

項目	研究1年目			研究2年目			総合評価		
	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式	本技術	石油焚き 温室*行-方式	電熱方式
エネルギー消費量 (kW/年)	256.0	5864.8	4948.0	437.0	10013.4	8447.0	346.5	7939.1	6697.5
温室効果ガス排出量 (kg-CO ₂ /年)	132.6	1467.0	2563.0	216.8	2500.0	4190.0	174.7	1984.0	3377.0
削減効果 (%)	—	91.0	94.9	—	91.4	94.9	—	91	95

(5) 総括伝熱係数

総括伝熱係数とは、熱の伝わりを示す値である。この値は、複数の素材を取りまとめて伝熱性能の数値として示すことができ、下水から得られる採熱量を計算することができる。

研究1年目及び研究2年目で得た計測結果を表 A-51 及び表 A-52 に示す。総括伝熱係数は、研究2年目の測定結果が研究1年目と比較し低かったことから、最小値である 30.1 W/m²°C を採用した。

表 A-51 総括伝熱係数

	研究1年目	研究2年目	総合評価
ヒートポンプ運転	32.6	30.1	30.1

表 A-52 計測結果

HP安定運転データ（平成30年2月1日～平成31年2月28日）

日付	採熱管 設置 面積 (m ²)	下水 温度 (°C)	① 一次 循環 (往き) (°C)	② 一次 循環 (還り) (°C)	①-② 一次 循環 (温度差) (°C)	対数平均 温度差 (°C)	一次 循環 (流量)		下水 採熱 量 (kW)	総括伝熱係数 (W/m ² ・°C)
							(L/min)	ℓ/s		
1/9	29.6	11.1	3.4	0.2	3.2	9.21	44.8	0.75	9.59	35.2
1/16	29.6	14.6	6.5	3.7	2.9	9.43	47.5	0.79	9.22	33.0
1/17	29.6	15.1	6.4	3.3	3.1	10.17	47.3	0.79	9.81	32.6
1/18	29.6	15.0	5.8	2.6	3.2	10.72	46.8	0.78	10.02	31.6
1/20	29.6	15.0	6.6	3.6	3.0	9.82	47.2	0.79	9.48	32.6
1/21	29.6	13.0	5.6	2.7	2.9	8.77	46.7	0.78	9.06	34.9
1/22	29.6	10.6	2.4	-1.0	3.4	9.80	43.9	0.73	9.99	34.4
1/23	29.6	14.8	6.5	3.7	2.8	9.63	47.4	0.79	8.88	31.2
1/24	29.6	12.4	3.7	0.9	2.8	10.03	45.2	0.75	8.47	28.5
1/26	29.6	13.5	4.4	0.9	3.5	10.76	45.5	0.76	10.66	33.5
2/1	29.6	11.8	3.7	0.7	3.0	9.52	45.1	0.75	9.05	32.1
2/2	29.6	10.7	2.7	-0.6	3.3	9.56	44.1	0.74	9.74	34.5
2/8	29.6	12.3	5.1	2.7	2.4	8.34	46.4	0.77	7.45	30.2
2/9	29.6	13.5	5.5	2.9	2.6	9.24	46.7	0.78	8.13	29.7
2/10	29.6	11.0	3.9	1.5	2.4	8.24	45.4	0.76	7.29	29.9
2/13	29.6	12.7	4.9	1.7	3.2	9.31	46.0	0.77	9.85	35.8
2/14	29.6	10.4	2.5	-0.8	3.3	9.45	43.9	0.73	9.69	34.7
平均	29.6	12.8	4.7	1.7	3.0	9.53	45.9	0.8	9.20	32.6

HP安定運転データ（令和元年12月19日～令和2年2月15日）

日付	採熱管 設置 面積 (m ²)	下水 温度 (°C)	① 一次 循環 (往き) (°C)	② 一次 循環 (還り) (°C)	①-② 一次 循環 (温度差) (°C)	対数平均 温度差 (°C)	一次 循環 (流量)		下水 採熱 量 (kW)	総括伝熱係数 (W/m ² ・°C)
							(L/min)	ℓ/s		
1/5 7:55～8:50	29.6	12.9	6.9	3.0	3.9	7.79	28.8	0.48	7.52	32.6
2/5 16:20	29.6	13.5	6.0	1.3	4.7	9.66	28.0	0.47	8.81	30.8
2/6 6:55	29.6	14.2	6.2	1.7	4.5	10.08	28.3	0.47	8.52	28.6
2/6 17:15	29.6	14.1	6.2	1.1	5.1	10.24	27.9	0.47	9.52	31.4
2/6 19:45	29.6	15.9	7.4	2.6	4.8	10.72	27.1	0.45	8.70	27.4
2/8 4:55	29.6	11.8	4.3	-0.8	5.1	9.83	28.4	0.47	9.69	33.3
2/8 19:55～2/9 9:10	29.6	11.2	4.2	-0.5	4.7	9.15	28.3	0.47	8.90	32.9
2/9 16:45～23:40	29.6	15.6	6.1	1.8	4.3	11.52	28.3	0.47	8.14	23.9
平均	29.6	13.7	5.9	1.3	4.6	9.9	28.1	0.5	8.7	30.1

A.4.3 研究結果のまとめ

実証研究にて得られた結果は、表 A-53 のとおりである。

表 A-53 実証研究の結果

評価項目	結果
融雪能力の評価	(1) 融雪能力 <ul style="list-style-type: none"> ・ 車道融雪として、概ね融雪性能が実用できる融雪能力を確認した。 ・ 融雪評価 88.6% (2) 放熱量と採熱量 <ul style="list-style-type: none"> ・ 設計を満足する性能を確認 ・ 放熱量 223.7 W/m²・採熱量 0.087 kW/m
既存技術に対する優位性の評価	(3) 冬期間におけるエネルギー消費量 <ul style="list-style-type: none"> ・ 石油焼き温水ボイラー方式より 96%削減 ・ 電熱方式より 95%の削減 (4) 冬期間における温室効果ガス排出量 <ul style="list-style-type: none"> ・ 石油焼き温水ボイラー方式より 91%削減 ・ 電熱方式より 95%の削減 (5) 総括伝熱係数 <ul style="list-style-type: none"> ・ 30.1 W/m²・°C (6) 総費用（年価換算値） <ul style="list-style-type: none"> ・ 石油焼き温水ボイラー方式より 16%削減 ・ 電熱方式より 52%削減

A.5 実証施設と異なる施設規模におけるコスト比較

実証研究の総費用（年価換算値）の縮減効果は、融雪面積が 50 m²にて確認した。同様に、融雪面積が 200 m²、300 m²、500 m²、1,500 m²にて総費用（年価換算値）の構成モデルを作成し、算出した。

その結果、図 A-6 及び表 A-54 のとおり、融雪面積が 300 m²以下の範囲で、本技術は従来技術に対して有利となることを確認した。

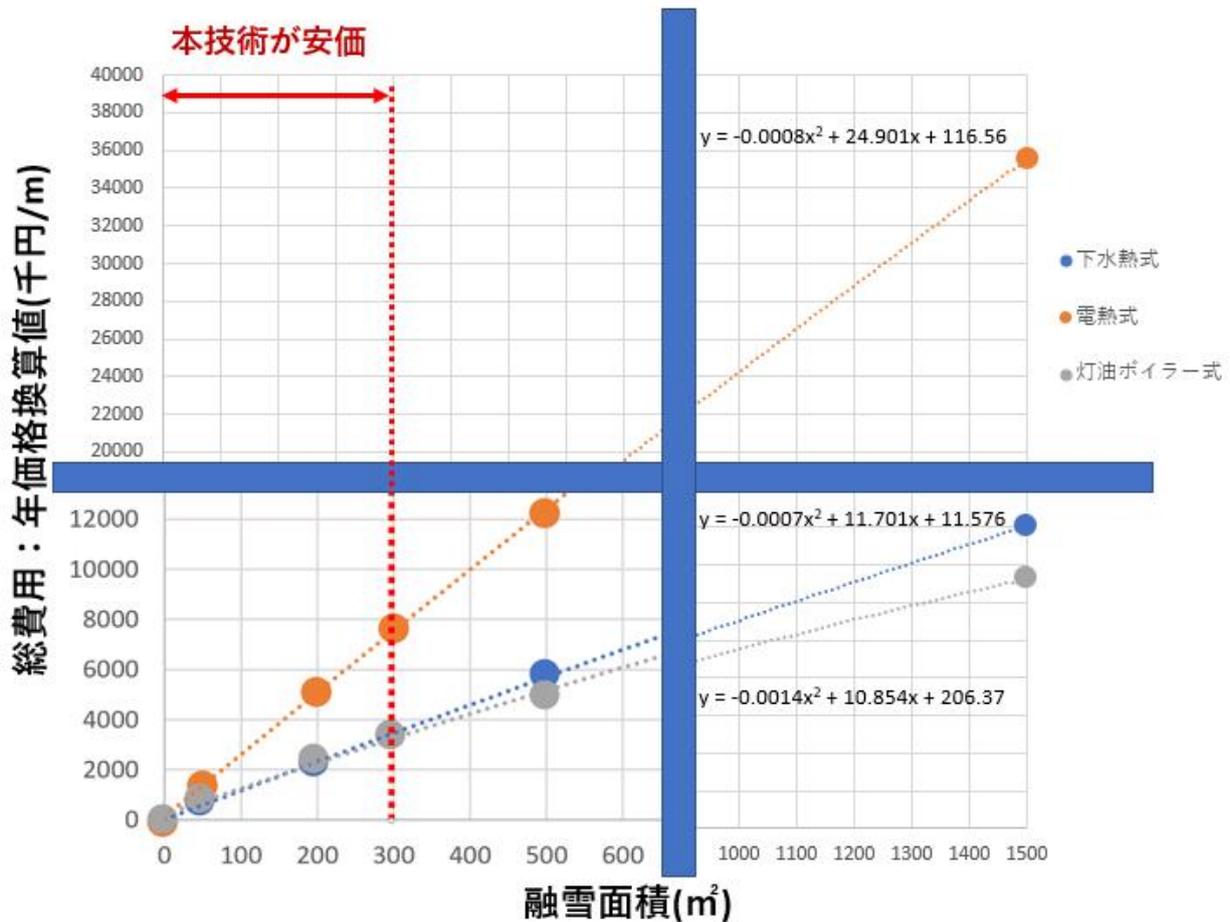


図 A-6 各技術の融雪面積と総費用（年価換算値）との関係

表 A-54 融雪面積毎の各技術の費用比較

	単位	50m ²			200m ²			300m ²			500m ²			1500m ²		
		下水熱式	電熱式	灯油ボイラー式	下水熱式	電熱式	灯油ボイラー式	下水熱式	電熱式	灯油ボイラー式	下水熱式	電熱式	灯油ボイラー式	下水熱式	電熱式	灯油ボイラー式
①維持管理費	千円/年	206	1,092	511	770	4,334	1,772	1,068	6,574	2,459	1,664	10,739	3,583	7,448	31,613	10,573
②建設費年価	千円/年	487	358	318	1,534	776	663	2,317	1,060	960	4,829	1,488	1,398	11,732	3,316	2,374
③総費用 (年価換算値)	千円/年	693	1,450	829	2,305	5,110	2,435	3,385	7,634	3,419	6,493	12,227	4,981	19,180	34,929	12,947
経済性 (削減効果)	%	-	52	16	-	55	5	-	56	1	-	47	-30	-	45	-48

(1) 融雪面積が 200 m²の場合

建設費は、口径 800 mm、管路延長 190 m、採熱管の設置本数 48 本での採熱設備の内訳として表 A-55 に、放熱設備及び操作・制御設備の内訳を表 A-56 に整理した。石油焚き温水ボイラー方式は表 A-57、電熱方式は表 A-58 に示し、これらの合計を表 A-59 に示す。また、建設費（年価換算値）を表 A-60、

運転費を表 A-61、維持管理費を表 A-62 に示す。本面積での必要熱量は 45 kW より、ヒートポンプは出力が可能な機種を選定した。下水熱の採熱量は、総括伝熱係数 $30.1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 、採熱管接触面積 118.5 m^2 、下水-熱源水対数平均温度差 $9.76 \text{ }^\circ\text{C}$ とし、 $34.8 \text{ kW} = 30.1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \times 118.5 \text{ m}^2 \times 9.76^\circ\text{C}$ と考えた。

表 A-55 採熱設備の内訳（本技術）（融雪面積＝200 m²）

	管路延長	総延長	単位	費用 (円)		備考
採熱管設置工事						
① 採熱管材料費用		9,120	m	3,319,680	3,604,680	190 m × 48 本 364 円/m
②採熱管引き込み費用	190		m	285,000		1,500 円/m
集水部設置工事						
①集水部材料費用	2		箇所	180,000	300,000	90,000 円/箇所
②集水部設置費用	2		箇所	120,000		60,000 円/箇所
直接工事費					3,904,680	⇒3,900 千円を使用
諸経費		35	%		1,366,638	
合計					5,271,318	⇒5,270 千円を使用

表 A-56 放熱設備及び操作・制御設備の内訳（本技術）（融雪面積＝200 m²）

	数量	単位	費用 (円)	備考
熱源水配管	1	式	2,004,000	
路盤工事	1	式	2,782,000	
制御盤	1	台	753,000	
自動制御装置	1	台	180,000	
電気設備工事	1	台	288,000	
降雪センサ	1	台	44,000	
路面温度センサ	1	式	28,000	地中埋込型
水分センサ	1	式	30,000	地中埋込型
ヒートポンプ	1	式	5,532,000	
循環ポンプ	1	式	468,000	
消耗品他	1	式	510,000	
直接工事費			12,619,000	
諸経費	35	%	4,416,650	
合計			17,035,650	⇒17,040 千円を使用

表 A-57 石油焚き温水ボイラー方式の内訳（融雪面積＝200 m²）

	数量	単位	費用 (円)	備考
融雪配管設備工事	1	式	2,000,000	
制御装置	1	式	200,000	
路面温度センサ	1	台	28,000	地中埋込型
水分センサ	1	台	30,000	地中埋込型
制御盤・ボイラー	1	台	400,000	
消耗品他	1	台	510,000	
電気設備工事	1	式	200,000	
路盤工事	1	式	2,800,000	
直接工事費			6,168,000	
諸経費	35	%	2,158,800	
合計			8,326,800	⇒8,300 千円を使用

表 A-58 電熱方式の内訳（融雪面積＝200 m²）

	数量	単位	費用(円)	備考
ロードヒーターユニット	1	式	1,250,000	
リードケーブル	1	式	200,000	
制御装置	1	台	400,000	
路面温度センサ	1	台	44,000	
水分センサ	1	台	58,000	
制御盤	1	台	750,000	
消耗品他	1	式	510,000	
システム工事費	1	式	1,000,000	
電気整備工事	1	式	480,000	
路盤工事	1	式	2,529,000	
直接工事費			7,221,000	
諸経費	35	%	2,527,350	
合計			9,748,350	⇒9,750 千円を使用

表 A-59 建設費（融雪面積＝200 m²）

	単位	採熱設備	放熱設備及び 操作・制御設備	合計
本技術	千円	5,270	17,040	22,300
石油焚き温水ボイラー方式	千円	—	8,300	8,300
電熱方式	千円	—	9,750	9,800

表 A-60 建設費（年価換算値）（融雪面積＝200 m²）

	単位	採熱設備	放熱設備及び 操作・制御設備	合計
本技術	千円	178	1,356	1,534
石油焚き温水ボイラー方式	千円	—	663	663
電熱方式	千円	—	776	776

表 A-61 運転費（融雪面積＝200 m²）

	単位	運転費用の内訳	合計
本技術	千円	224 円/h ・ 2904 h	650
石油焚き温水ボイラー方式	千円	569 円/h ・ 2904 h	1,652
電熱方式	千円	1,451 円/h ・ 2904 h	4,214

表 A-62 維持管理費（融雪面積＝200 m²）

	単位	運転費	点検費	合計
本技術	千円	650	120	770
石油焚き温水ボイラー方式	千円	1,652	120	1,772
電熱方式	千円	4,214	120	4,334

(2) 融雪面積が 300 m² の場合

建設費は、口径 800 mm、管路延長 280 m、採熱管の設置本数 48 本での採熱設備の内訳として表 A-63 に、放熱設備及び操作・制御設備の内訳を表 A-64 に整理した。石油焚き温水ボイラー方式は表 A-65、電熱方式は表 A-66 に示し、これらの合計を表 A-67 に示す。また、建設費（年価換算値）を表 A-68、運転費を表 A-69、維持管理費を表 A-70 に示す。本面積での必要熱量は 67 kW より、ヒートポンプは出力が可能な機種を選定した。下水熱の採熱量は、総括伝熱係数 30.1 W/m²・°C、採熱管接触面積 174.7 m²、下水-熱源水対数平均温度差 9.76°C とし、51.3 kW = 30.1 W/m²・°C × 174.7 m² × 9.76 °C とした。

表 A-63 採熱設備の内訳（本技術）（融雪面積 300 m²）

	管路 延長	総延長	単位	費用 (円)		備考
採熱管設置工事						
① 採熱管材料費用		13,440	m	4,858,560	5,278,560	280m × 48 本 361.5 円/m
② 採熱管引き込み費用	280		m	420,000		1,500 円/m
集水部設置工事						
① 集水部材料費用	2		箇所	180,000	300,000	90,000 円/箇所
② 集水部設置費用	2		箇所	120,000		60,000 円/箇所
直接工事費					5,578,560	
諸経費		35	%		1,952,496	
合計					7,531,056	⇒7,530 千円を使用

表 A-64 放熱設備及び操作・制御設備の内訳（本技術）（融雪面積＝300 m²）

	数量	単位	費用(円)	備考
熱源水配管	1	式	4,000,000	
路盤工事	1	式	6,000,000	
制御盤	1	台	770,000	
自動制御装置	1	台	230,000	
電気設備工事	1	台	290,000	
降雪センサ	1	台	44,000	
路面温度センサ	1	式	28,000	地中埋込型
水分センサ	1	式	30,000	地中埋込型
ヒートポンプ	1	式	6,654,000	
循環ポンプ	1	式	546,000	
消耗品他	1	式	600,000	
直接工事費			19,192,000	
諸経費	35	%	6,717,200	
合計			25,909,200	⇒25,900 千円を使用

表 A-65 石油焚き温水ボイラー方式の内訳（融雪面積＝300 m²）

	数量	単位	費用(円)	備考
融雪配管設備工事	1	式	2,843,000	
制御装置	1	式	220,000	
路面温度センサ	1	台	28,000	地中埋込型
水分センサ	1	台	30,000	地中埋込型
制御盤・ボイラー	1	台	480,000	
消耗品他	1	台	600,000	
電気設備工事	1	式	246,000	
路盤工事	1	式	3,869,000	
直接工事費			8,316,000	
諸経費	35	%	2,910,600	
合計			11,226,600	⇒11,200 千円を使用

表 A-66 電熱方式の内訳（融雪面積＝300 m²）

	数量	単位	費用 (円)	備考
ロードヒーターユニット	1	式	1,550,000	
リードケーブル	1	式	240,000	
制御装置	1	台	440,000	
路面温度センサ	1	台	44,000	
水分センサ	1	台	58,000	
制御盤	1	台	760,000	
消耗品他	1	式	600,000	
システム工事費	1	式	1,400,000	
電気整備工事	1	式	520,000	
路盤工事	1	式	3,489,000	
直接工事費			9,101,000	
諸経費	35	%	3,185,350	
合計			12,286,350	⇒12,300 千円を使用

表 A-67 建設費（融雪面積＝300 m²）

	単位	採熱設備	放熱設備及び 操作・制御設備	合計
本技術	千円	7,530	25,900	33,400
石油焚き温水ボイラー方式	千円	—	11,200	11,200
電熱方式	千円	—	12,300	12,300

表 A-68 建設費（年価換算値）（融雪面積＝300 m²）

	単位	採熱設備	放熱設備及び 操作・制御設備	合計
本技術	千円	255	2,062	2,317
石油焚き温水ボイラー方式	千円	—	960	960
電熱方式	千円	—	1,060	1,060

表 A-69 運転費（融雪面積＝300 m²）

	単位	運転費用の内訳	合計
本技術	千円	316 円/h ・ 2904 h	918
石油焚き温水ボイラー方式	千円	795 円/h ・ 2904 h	2,309
電熱方式	千円	2,212 円/h ・ 2904 h	6,424

表 A-70 維持管理費（融雪面積＝300 m²）

	単位	運転費	点検費	合計
本技術	千円	918	150	1,068
石油焚き温水ボイラー方式	千円	2,309	150	2,459
電熱方式	千円	6,424	150	6,574

(3) 融雪面積が 500 m² の場合

建設費は、口径 800 mm、管路延長 470 m、採熱管の設置本数 48 本での採熱設備の内訳として表 A-70 に、放熱設備及び操作・制御設備の内訳を表 A-71 に整理した。石油焚き温水ボイラー方式は表 A-72、電熱方式は表 A-73 に示し、これらの合計を表 A-74 に示す。また、建設費（年価換算値）を表 A-75、運転費を表 A-76、維持管理費を表 A-77 に示す。本面積での必要熱量は 111 kW より、ヒートポンプは出力が可能な機種を選定した。下水熱の採熱量は、総括伝熱係数 30.1 W/m²・°C、採熱管接触面積 293.2 m²、下水-熱源水対数平均温度差 9.76°C とし、86.1 kW = 30.1 W/m²・°C × 293.2 m² × 9.76 °C とした。

表 A-71 採熱設備の内訳（本技術）（融雪面積＝500 m²）

	管路延長	総延長	単位	費用 (円)		備考
採熱管設置工事						
① 採熱管材料費用		22,560	m	8,144,160	8,849,160	470 m × 48 本 361 円/m
② 採熱管引き込み費用	470		m	705,000		1,500 円/m
集水部設置工事						
① 集水部材料費用	2		箇所	180,000	300,000	90,000 円/箇所
② 集水部設置費用	2		箇所	120,000		60,000 円/箇所
直接工事費					9,149,160	
諸経費		35	%		3,202,206	
合計					12,351,366	⇒12,350 千円を使用

表 A-72 放熱設備及び操作・制御設備の内訳（本技術）（融雪面積＝500 m²）

	数量	単位	費用 (円)	備考
熱源水配管	1	式	8,000,000	
路盤工事	1	式	10,800,000	
制御盤	1	台	800,000	
自動制御装置	1	台	250,000	
電気設備工事	1	台	300,000	
降雪センサ	1	台	44,000	
路面温度センサ	1	式	28,000	地中埋込型
水分センサ	1	式	30,000	地中埋込型
ヒートポンプ	1	式	18,440,000	
循環ポンプ	1	式	1,560,000	
消耗品他	1	式	800,000	
直接工事費			41,052,000	
諸経費	35	%	14,368,200	
合計			55,420,200	⇒55,420 千円を使用

表 A-73 石油焚き温水ボイラー方式の内訳（融雪面積＝500 m²）

	数量	単位	費用 (円)	備考
融雪配管設備工事	1	式	4,000,000	
制御装置	1	式	250,000	
路面温度センサ	1	台	28,000	地中埋込型
水分センサ	1	台	30,000	地中埋込型
制御盤・ボイラー	1	台	600,000	
消耗品他	1	台	800,000	
電気設備工事	1	式	300,000	
路盤工事	1	式	7,000,000	
直接工事費			13,008,000	
諸経費	35	%	4,552,800	
合計			17,560,800	⇒17,560 千円を使用

表 A-74 電熱方式の内訳（融雪面積＝500 m²）

	数量	単位	費用 (円)	備考
ロードヒーターユニット	1	式	2,000,000	
リードケーブル	1	式	300,000	
制御装置	1	台	500,000	
路面温度センサ	1	台	44,000	
水分センサ	1	台	58,000	
制御盤	1	台	800,000	
消耗品他	1	式	751,000	
システム工事費	1	式	1,800,000	
電気整備工事	1	式	600,000	
路盤工事	1	式	7,000,000	
直接工事費			13,853,000	
諸経費	35	%	4,848,550	
合計			18,701,550	⇒18,700 千円を使用

表 A-75 建設費（融雪面積＝500 m²）

	単位	採熱設備	放熱設備及び 操作・制御設備	合計
本技術	千円	12,350	55,420	67,800
石油焚き温水ボイラー方式	千円	—	17,560	17,600
電熱方式	千円	—	18,700	18,700

表 A-76 建設費（年価換算値）（融雪面積＝500 m²）

	単位	採熱設備	放熱設備及び 操作・制御設備	合計
本技術	千円	418	4,410	4,829
石油焚き温水ボイラー方式	千円	—	1,398	1,398
電熱方式	千円	—	1,488	1,488

表 A-77 運転費（融雪面積＝500 m²）

	単位	運転費用の内訳	合計
本技術	千円	504 円/h × 2,904 h	1,464
石油焚き温水ボイラー方式	千円	1,165 円/h × 2,904 h	3,383
電熱方式	千円	3,629 円/h × 2,904 h	10,539

表 A-78 維持管理費（融雪面積＝500 m²）

	単位	運転費	点検費	合計
本技術	千円	1,464	200	1,664
石油焚き温水ボイラー方式	千円	3,383	200	3,583
電熱方式	千円	10,539	200	10,739

(4) 融雪面積が 1,500 m² の場合

建設費は、口径 800 mm、管路延長 1,400 m、採熱管の設置本数 48 本での採熱設備の内訳として表 A-79 に、放熱設備及び操作・制御設備の内訳を表 A-80 に整理した。石油焚き温水ボイラー方式は表 A-81、電熱方式は表 A-82 に示し、これらの合計を表 A-83 に示す。また、建設費（年価換算値）を表 A-84、運転費を表 A-85、維持管理費を表 A-86 に示す。本面積での必要熱量は 335 kW より、ヒートポンプは出力が可能な機種を選定した。下水熱の採熱量は、総括伝熱係数 30.1 W/m²・°C、採熱管接触面積 873.6 m²、下水-熱源水対数平均温度差 9.76 °C とし、256.6 kW = 30.1 W/m²・°C × 873.6 m² × 9.76°C とした。

表 A-79 採熱設備の費用内訳（本技術）（融雪面積が 1,500 m² の場合）

	管路延長	総延長	単位	費用 (円)		備考
採熱管設置工事						
①採熱管材料費用		67,200	m	24,192,000	26,290,000	1,400m x 48 本
②採熱管引き込み費用	1,400		m	2,100,000		360 円/m
集水部設置工事						
①集水部材料費用	2		箇所	180,000	300,000	90,000 円/箇所
②集水部設置費用	2		箇所	120,000		60,000 円/箇所
直接工事費					26,592,000	
諸経費		35	%		9,307,200	
合計					35,899,200	⇒35,900 千円を使用

表 A-80 放熱設備及び操作・制御設備の費用内訳（本技術）（融雪面積が 1,500 m² の場合）

	数量	単位	費用 (円)	備考
熱源水配管	1	式	20,000,000	
路盤工事	1	式	25,000,000	
制御盤	1	台	2,200,000	
自動制御装置	1	台	500,000	
電気設備工事	1	台	1,000,000	
降雪センサ	1	台	44,000	
路面温度センサ	1	式	28,000	地中埋込型
水分センサ	1	式	30,000	地中埋込型
ヒートポンプ	1	式	43,869,000	
循環ポンプ	1	式	3,711,000	
消耗品他	1	式	1,500,000	
直接工事費			97,882,000	
諸経費	35	%	34,258,700	
合計			132,140,700	⇒132,140 千円を使用

表 A-81 石油焚き温水ボイラー方式の費用内訳（融雪面積が 1,500 m² の場合）

	数量	単位	費用 (円)	備考
融雪配管設備工事	1	式	8,314,000	
制御装置	1	式	500,000	
路面温度センサ	1	台	28,000	地中埋込型
水分センサ	1	台	30,000	地中埋込型
制御盤・ボイラー	1	台	2,244,000	
消耗品他	1	台	1,583,000	
電気設備工事	1	式	400,000	
路盤工事	1	式	9,000,000	
直接工事費			22,099,000	
諸経費	35	%	7,734,650	
合計			29,833,650	⇒29,830 千円を使用

表 A-82 電熱方式の費用内訳（融雪面積が 1,500 m² の場合）

	数量	単位	費用 (円)	備考
ロードヒーターユニット	1	式	9,200,000	
リードケーブル	1	式	1,000,000	
制御装置	1	台	800,000	
路面温度センサ	1	台	44,000	
水分センサ	1	台	58,000	
制御盤	1	台	1,000,000	
消耗品他	1	式	150,000	
システム工事費	1	式	3,000,000	
電気整備工事	1	式	1,400,000	
路盤工事	1	式	14,214,000	
直接工事費			30,870,000	
諸経費	35	%	10,804,500	
合計			41,674,500	⇒41,670 千円を使用

表 A-83 建設費（融雪面積が 1,500 m² の場合）

	採熱設備 (千円)	放熱設備及び操作・ 制御設備 (千円)	建設費 (千円)
本技術	35,900	132,140	168,000
石油焚き温水ボイラー方式	—	29,830	29,800
電熱方式	—	41,670	41,700

表 A-84 建設費（年価換算値）（融雪面積 1,500 m²）

	採熱設備 (千円/年)	放熱設備及び操作・ 制御設備 (千円/年)	建設費 (千円/年)
本技術	1,216	10,516	11,732
石油焚き温水ボイラー方式	—	2,374	2,374
電熱方式	—	3,316	3,316

表 A-85 運転費（融雪面積 1,500 m²）

	計算式	運転費 (千円/年)
本技術	2,427 円/h × 2,904 h/年	7,048
石油焚き温水ボイラー方式	3,641 円/h × 2,904 h/年	10,573
電熱方式	10,886 円/h × 2,904 h/年	31,613

表 A-86 維持管理費（融雪面積 1,500 m²）

	運転費 (千円/年)	保守点検費 (千円/年)	維持管理費 (千円/年)
本技術	7,048	400	7,448
石油焚き温水ボイラー方式	10,573	400	10,973
電熱方式	31,613	400	32,013

資料 B 問い合わせ先

国土交通省国土技術政策総合研究所	上下水道研究部 下水道研究室 〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地 029-864-3343 https://www.nilim.go.jp/lab/ebg/index.htm
------------------	--

【実証研究の実施者】

東亜グラウト工業株式会社	管路グループ 技術開発室 〒160-0004 東京都新宿区四谷 2 丁目 10-3 03-3355-1531 https://www.toa-g.co.jp/
株式会社丸山工務所	土木部 〒948-0101 新潟県十日町市稲葉 456-1 025-757-8125 https://maruyama-k.net/
十日町市役所	上下水道局 上下水道課 〒948-0072 新潟県十日町市西本町 3 丁目 688 番地 025-757-3141 https://www.city.tokamachi.lg.jp/

国土技術政策総合研究所資料
Technical Note of NILIM
No.1338 January 2026

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは
〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地
企画部研究評価・推進課 029-864-2675