

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

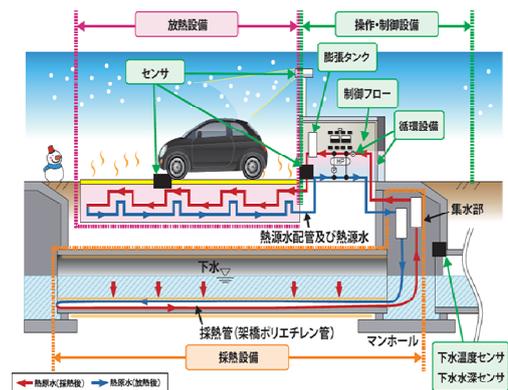


図 A-2 各設備の全体面図

(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)

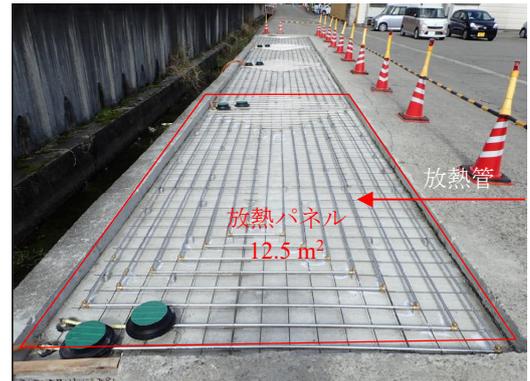


写真 A-3 放熱管 (配置完了全景)



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)

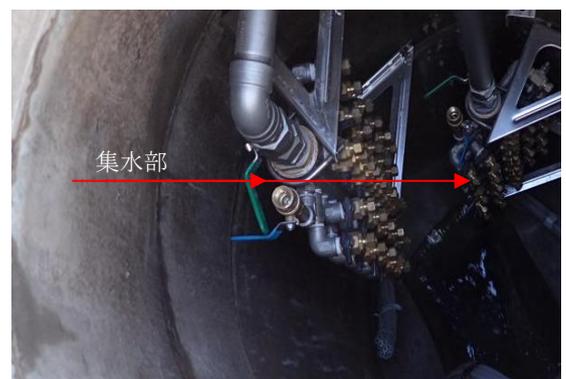


写真 A-8 集水部 (行き・還り 2本)

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

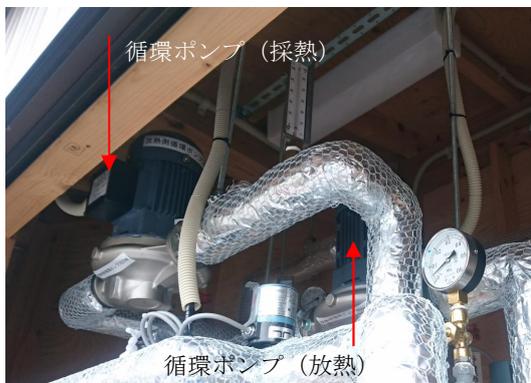


写真 A-14 循環ポンプ



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	—	<ul style="list-style-type: none"> ・舗装構成図、路盤構成図 ・車の往来等の交通情報
	気象条件	—	<ul style="list-style-type: none"> ・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）	<ul style="list-style-type: none"> ・下水水深、温度データ
	下水温度	—	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> ・設置の適用について確認
		敷設後年数	<ul style="list-style-type: none"> ・下水道台帳の内容を確認
		マンホールのサイズ、深さ	<ul style="list-style-type: none"> ・施工可否の判断
		関連計画（長寿命化計画、耐震化計画等）	<ul style="list-style-type: none"> ・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	—	<ul style="list-style-type: none"> ・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	—	<ul style="list-style-type: none"> ・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	—	<ul style="list-style-type: none"> ・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	—	<ul style="list-style-type: none"> ・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	—	<ul style="list-style-type: none"> ・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	石油焼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	石油焼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。

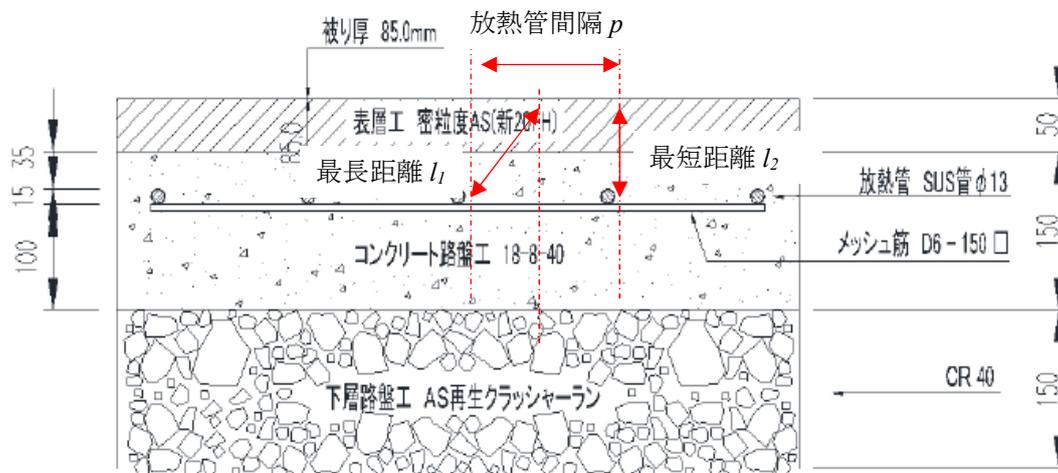


図 A-3 実証研究施設の路盤構成図

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}

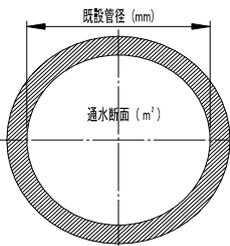
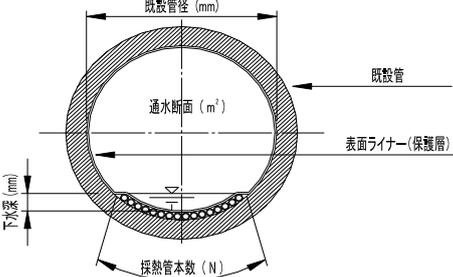
項目	適用範囲
下水道管路の口径	250～800 mm
段差	口径の 5%以下（最大 40 mm 以下）
継手隙間	50 mm 以下
クラック	ランク a ^{※2} のクラックでも施工可
浸入水	ランク a ^{※2} でも施工可
取付け管の突出し	撤去すれば施工可
堆積物	撤去すれば施工可
下水道管路の曲がり	口径 350 mm 未満：10%以下 口径 350 mm 以上：5%以下
管種	鉄筋コンクリート管、硬質塩化ビニル管等
水位	口径の 10%以上

※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	
		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	N = 16 本
		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。



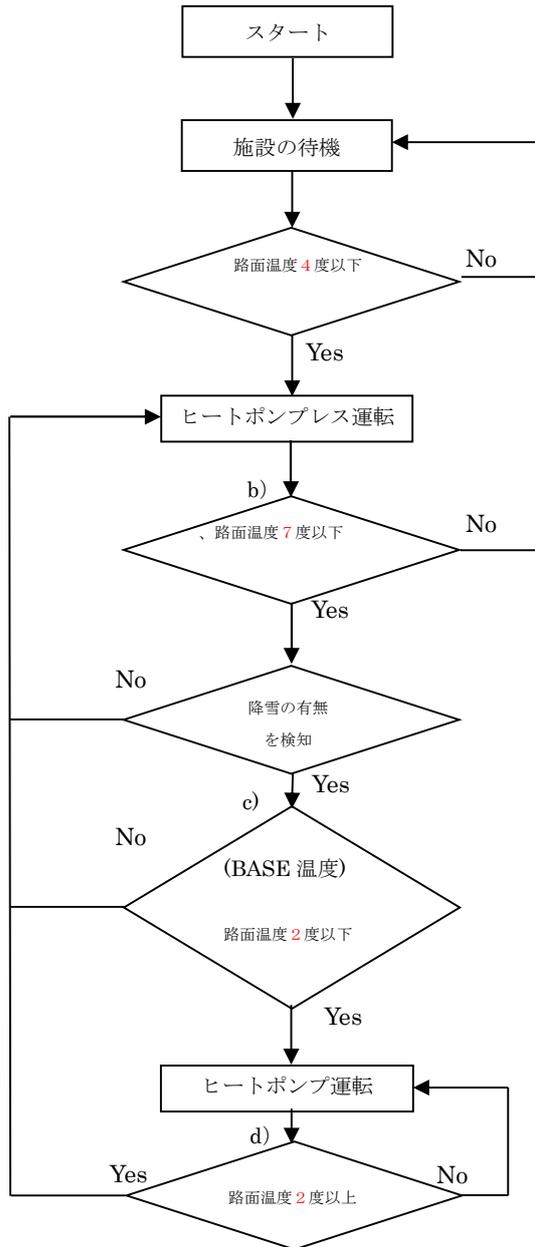
写真 A-16 温度センサの設置

(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)

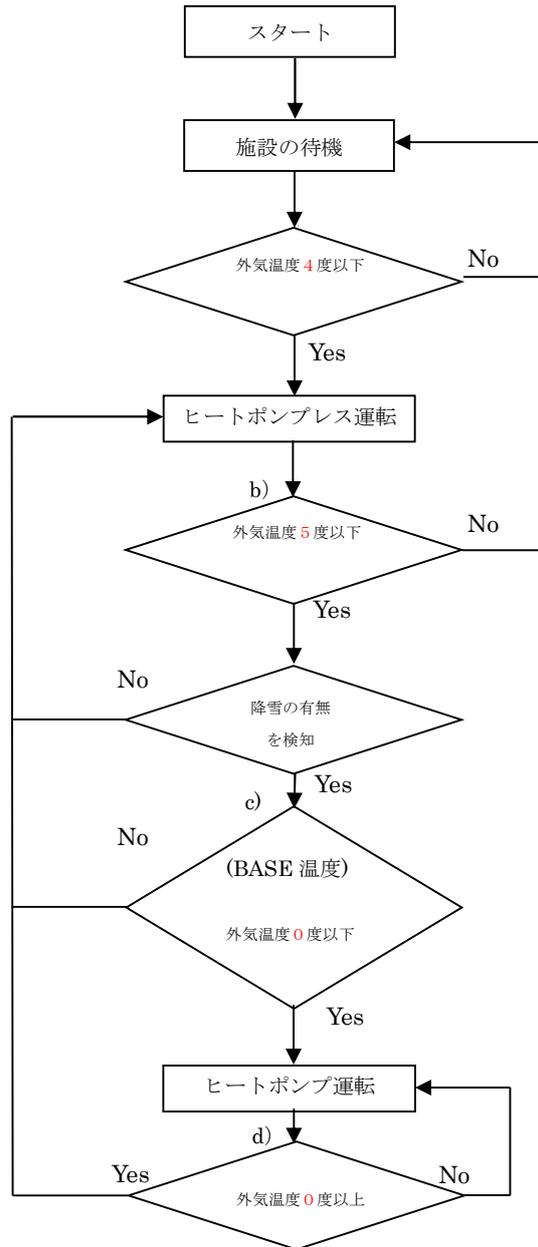


図 A-4 フロー運転の詳細

「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）>

$$\begin{aligned}
 h_a &= \{0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times d_a) / \sqrt{v_a}\} \times (L_a / d_a) \times v_a^2 / (2g) \\
 &= \{0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times 0.025) / \sqrt{0.8}\} \times (10 / 0.025) \times (0.8)^2 / (2 \times 9.81) \\
 &= 0.38 \text{ (m)}
 \end{aligned}$$

<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>

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

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_l	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）>

$$\begin{aligned}
 h_c &= \{0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times d_c) / \sqrt{v_c}\} \times (L_c / d_c) \times v_c^2 / (2g) \\
 &= \{0.0126 + (0.01739 - 0.1087 \times 0.030) / \sqrt{0.9}\} \times (22.8 / 0.030) \times (0.8)^2 / (2 \times 9.81) \\
 &= 0.86 \text{ (m)}
 \end{aligned}$$

<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>

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

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、246 ℓ であることから、300 ℓ (容量 50~600 ℓ) 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。

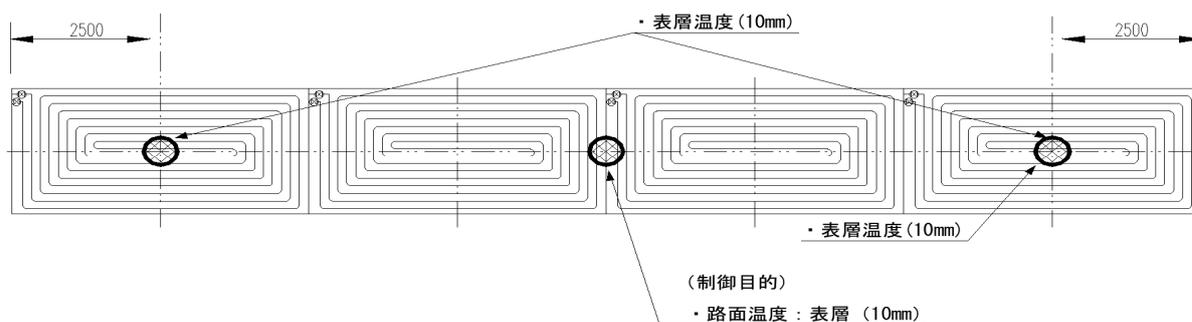


図 A-5 路面センサの配置図

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"> ・ 石油焚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"> ・ 石油焚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"> ・ 石油焚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。

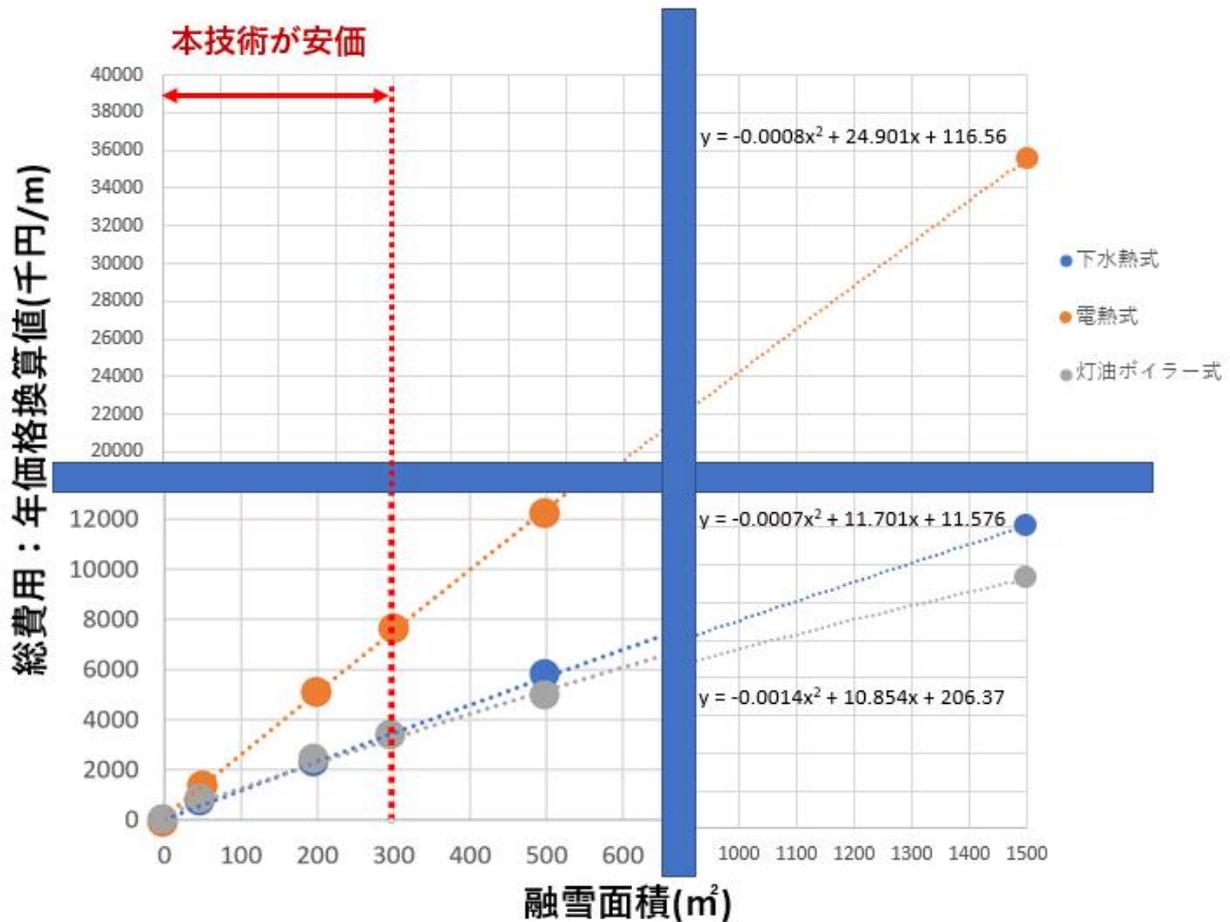


図 A-6 各技術の融雪面積と総費用（年価換算値）との関係

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		
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/