

環境省

平成22年度環境技術実証事業

ヒートアイランド対策技術分野

(地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム)

実証試験結果報告書

《詳細版》

平成23年3月

実証機関 : 特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会
実証単位 : (C) 地中熱交換部
実証申請者 : 株式会社福島地下開発
実証対象技術 : 株式会社福島地下開発本社事務所における
地中熱交換井



本実証試験結果報告書の著作権は、環境省に属します。

目 次

○ 全体の概要	1
1. 実証対象技術の概要	1
2. 実証試験の概要	3
3. 実証試験結果	5
4. 参考情報	9
○ 本編	10
1. 実証試験の目的及び概要	10
1.1 環境技術実証事業の概要	10
1.2 実証対象技術の概要と実証試験	10
1.3 実証単位（C）の実証項目	11
2. 実証機関・実証申請者・実証試験体制	13
3. 実証対象技術の概要	15
3.1 実証試験の実施場所	15
3.2 実証対象技術の仕様	17
3.2 実証対象技術の特徴・長所を含む参考情報	19
4. 地中熱交換部全体の実証項目の試験内容	20
4.1 サーマルレスポンス試験（TRT）の方法	20
4.2 本実証対象技術でのサーマルレスポンス試験（TRT）の方針	21
4.3 実証試験要領（第2版）に規定するサーマルレスポンス試験の測定方法の確認	22
4.4 サーマルレスポンス試験（TRT）の測定方法	23
4.5 サーマルレスポンス試験（TRT）の実施前の地下温度の状況と対応	27
4.6 サーマルレスポンス試験（TRT）の実施	28
5. 地中熱交換部全体の実証項目の試験における測定結果	31
5.1 温度検層結果	31
5.2 サーマルレスポンス試験（TRT）測定結果	33
5.3 有効熱伝導率と熱抵抗の解析結果	34
6. 熱媒循環部（U字管）の実証項目（性能を証明する書類の写しからの転用）	38
6.1 熱媒循環部の概要	38
6.2 熱媒循環部の実証内容	38
7. 熱媒の実証項目（性能を証明する書類の写しからの転用）	42
7.1 熱媒の概要	42
7.2 熱媒の実証内容	42
8. 考察	46
9. 実証試験の品質管理・監査	47
9.1 品質管理システムのあらまし	47
9.2 試験とデータの品質管理	47
9.3 実証試験の立会い	48
9.4 品質管理の内容	49
○ 付録（性能を証明する書類の写し）	50
1. 熱媒循環部（U字管）	50
2. 熱媒（不凍液（ブライン））	59
○ 別添【参考】	63

○ 全体の概要

実証対象技術	株式会社福島地下開発本社事務所における地中熱交換井
実証申請者	株式会社福島地下開発
実証単位	(C) 地中熱交換部
実証機関	特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会
実証試験期間	平成 22 年 8 月 30 日～平成 22 年 9 月 11 日

1. 実証対象技術の概要

1.1 地中熱交換部と実証試験

地中熱交換部は、地中熱利用において地下から熱を採取し、地下に熱を放熱する重要な施設である。一般に地中熱交換部は地中熱交換井と、地中熱交換井の中に挿入した U 字管などの熱媒循環部、地中熱交換井を充填する砂などの充填材、及び熱媒循環部 (U 字管) を循環する熱媒からなる。熱媒は地中熱交換井と地上に設置されたヒートポンプとの間を循環する流体で、熱を運ぶ媒質である。

本実証試験では、地中熱交換部全体の性能をサーマルレスポンス試験によって実証するとともに、熱媒循環部である U 字管、熱媒である不凍液 (ブライン) の性能を資料により実証したものである。なお、サーマルレスポンス試験は、熱応答試験あるいは TRT (Thermal Response Test) とも呼ばれている。

1.2 地中熱交換井

地中熱交換井はボーリングによって掘削された孔井である。地中熱交換井の中には U 字管を入れて、U 字管を入れた孔井は充填砂で充填されている。地中熱交換井内の充填砂は、阿武隈川で採取された砂である。産地は福島県郡山市西田町大網。粒度分布は次のとおり。

ふるいの呼び寸法 (mm)	5.00	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
ふるい通過重量百分率 (%)	100	95	79	61	18	3

1.3 熱媒循環部

本実証対象技術の熱媒循環部 (U 字管) の仕様は次のとおり。

製品名及び型式	地中熱交換システム用パイプ「U-ポリパイ」GPU-25A110
製造・販売事業者	株式会社イノアック住環境
材質	高密度ポリエチレン材料 (PE-100)
寸法	パイプ外径 34.0mm±0.20mm、厚さ 3.5mm±0.30mm、近似内径 27mm
設置方式	シングル U 字管
設置深度	100m まで挿入

1.4 熱媒

本実証対象技術に使用した熱媒の仕様は次のとおりである。

製品名	KYK ロングライフクーラント（不凍液）
主成分	エチレングリコール 90%
製造・販売事業者	古河薬品工業株式会社
熱媒として使用時の形態	エチレングリコール 30%希釈液

1.5 地中熱交換井の地質条件及び熱媒循環部(U字管)の設置状況

実証対象技術は、地中熱交換井とその中に挿入したU字管、充填砂などからなるが、その地質条件や孔のサイズ、掘削条件などを下図（実証申請者から提出）に示す。

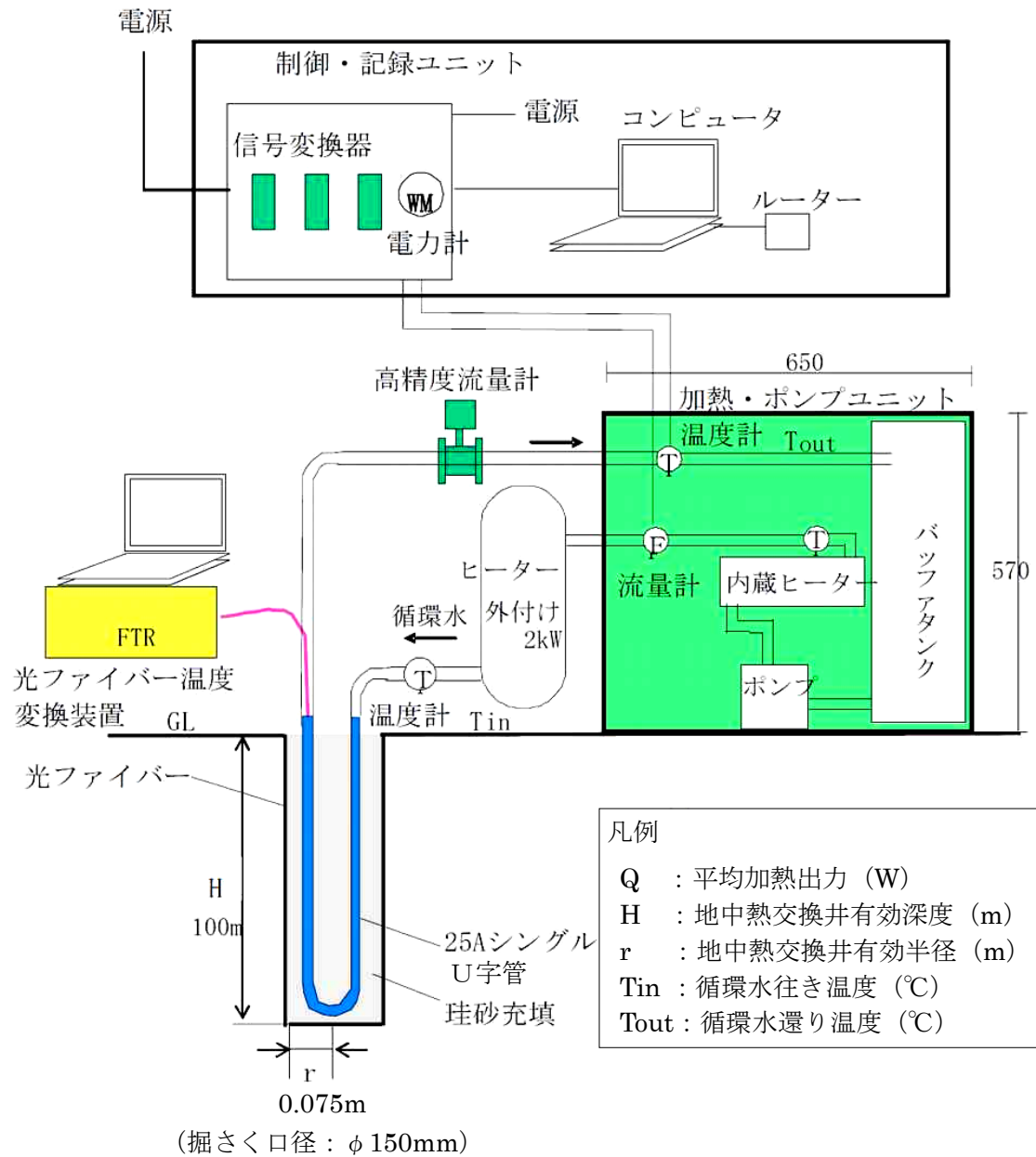
掘さく機械名	ソニックドリル 型	担 当 者	
掘さく口径	φ150 mm	自然水位	36.30 m
熱交換井方式	シングルUチューブ	揚水量	
掘さく深度	100.00 m	揚水ポンプ位置	m
完成深度	100.00 m	水温	17.3 °C
揚水ポンプ型式	型	ポンプ運転方法	圧力式・受水槽・融雪感知

標尺	深度	断面図	地 質 名	色 調	ケーシング断面図	備 考
	6.00		盛土(アスファルト, 砕石, 粘土)	暗灰色		
10			14.0m 30~50L/min 湧水 19.0~20.0m 暗灰色のシルト			
20	20.00		粘土混じり砂礫	暗青灰色		
	22.50		砂 礫	青灰色		
30			25.5m 湧水 100L/min 程度	灰 色		
	35.00		凝灰岩	淡青灰色		
40	40.50		砂 礫 38.0m付近 玉石混じる	茶褐色		← 磁砂にて充填
50			41.5mで湧水止まる 粘性あり 49.0m~徐々に粘性強まる 軟質			
60			55.0~56.5m湧水あり 約 30L/min 黄褐色	青灰色		
			60.0m付近湧水あり 約 50L/min			
70			65.5m~灰色やや硬くなる			← シングルU字管 Uポリパイ GUP-25A110 深度 100mまで 挿入
			68.5~74.0m湧水あり やや軟らかい 200~300L/min に増える			
80			80.0~95.0m やや軟質 石英粒多い			
90			凝灰岩	灰 色		
	95.00		95.0m~やや硬くなる			
100	100.00		礫混じり凝灰岩	灰 色		

2. 実証試験の概要

2.1 サーマルレスポンス試験の試験設備構成

本実証試験におけるサーマルレスポンス試験設備は、下図に示すように高温熱媒をU字管に循環させる加熱ポンプユニット、制御と記録をする制御記録ユニットから構成される。今回は、さらにU字管内の温度を詳しく計るための光ファイバー温度計も任意で併用した。



2.2 実証試験の条件

本実証対象技術でのサーマルレスポンス試験（TRT）の方法は、基本的には実証試験要領の規定に従い実施した。なお、本実証対象技術のある場所は地下水の流速が早いとの情報があり、サーマルレスポンス試験に際して地下水流動が地下の温度に与える影響が大きいのと予想がなされた。そこで、多段階の加熱を計画したが、結果的には通常の加熱で TRT の試験データを得ることができた。また実証試験の範囲外であるが、参考として光ファイバー温度計による温度測定も併用することとした。試験設備の写真を下に示す。



制御・記録ユニットの写真



加熱・ポンプユニットの写真



加熱・ポンプユニットと地中熱交換井の写真



地中熱交換井と光ファイバーの写真

TRT の加熱時間

地中熱交換井坑名	測定日時	イベント	加熱時間 [h]	温度回復時間 [h]	平均加熱出力 [W]	単位長さ当たりの熱交換量 [W/m]
No.1	9月3日 9:40	加熱循環開始	72.0		4,346	43.5
	9月6日 9:40	加熱循環停止		95.0		
	9月10日 8:40	測定終了				

3. 実証試験結果

3.1 地中熱交換部全体の実証項目(熱的性能)

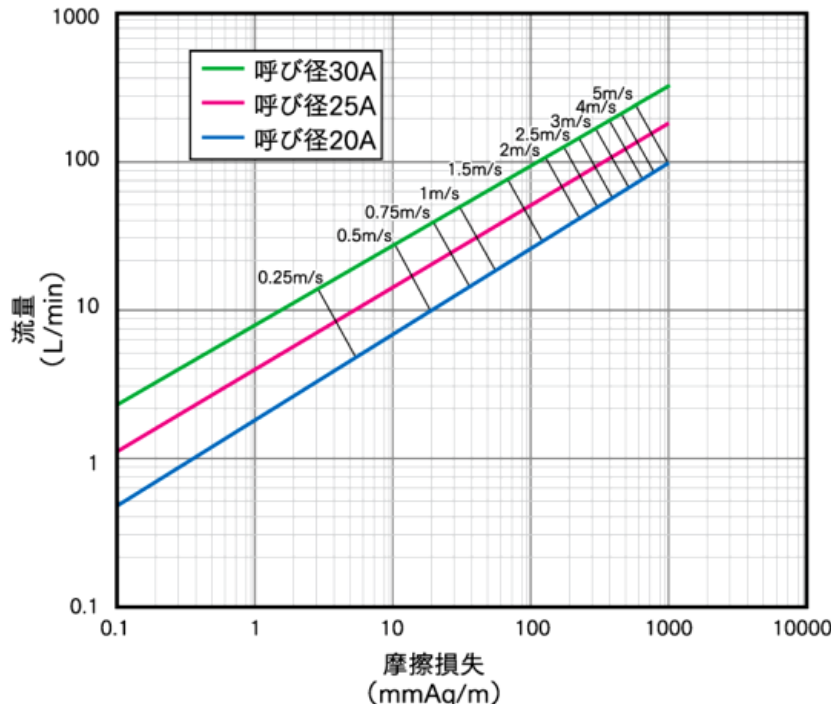
サーマルレスポンス試験結果

実証項目	試験結果	条件・備考
a. 熱交換井の熱抵抗 [K/(W/m)]	0.112	サーマルレスポンス試験から算出
b. 土壌部分の熱伝導率*1 [W/(m・K)]	2.73	サーマルレスポンス試験から算出

*1：実証項目の「土壌部分の熱伝導率」は、一般的には「有効熱伝導率」と言われている。

3.2 熱媒循環部(U字管)の実証項目 (性能を証明する書類の写しからの転用)

本実証項目は、熱媒循環部 (U字管) の性能を証明する書類を確認することで実証を代用する項目である。各実証項目の実証内容は、熱媒循環部の製造・販売事業者の株式会社イノアック住環境による地中熱交換システム用パイプ U-ポリパイのカタログ等の関係資料を確認し、引用した。引用した資料は、詳細版付録 50～53 ページ参照。

実証項目	結 果																								
c. 流量範囲	本実証対象技術では呼び径 25A を使用しており、不凍液（エチレングリコール 30%希釈液）を流した場合の適正流量は、下限は 10L/min、上限は 68L/min である。適正流量の上限値及び下限値の考え方については、表 6-2（詳細版本編 38 ページ）参照。また、参考としてUーポリパイの流量線図を下記に示す。  The diagram is a log-log plot of flow rate (L/min) on the y-axis (0.1 to 1000) versus friction loss (mmAq/m) on the x-axis (0.1 to 10000). Three lines represent different pipe diameters: 30A (green), 25A (pink), and 20A (blue). Diagonal lines indicate flow velocities from 0.25m/s to 5m/s. The 25A line is the primary reference for the test results.																								
d. 熱伝導性	熱伝導率： 0.38W/(m・K)																								
e. 耐熱性	『U-ポリパイ』の温度別最大使用圧力は下表の通りである。 <table><tr><th>呼び径 25A</th><th colspan="5">連続安全使用温度範囲</th><th colspan="2">年間 1,500 時間以内</th></tr><tr><th>使用温度</th><th>20℃</th><th>25℃</th><th>30℃</th><th>35℃</th><th>40℃</th><th>45℃</th><th>50℃</th></tr><tr><td>最大使用圧力 (MPa)</td><td>1.51</td><td>1.41</td><td>1.32</td><td>1.21</td><td>1.12</td><td>1.01</td><td>0.92</td></tr></table> ※この製品の連続安全使用温度範囲は-20～40℃である。ただし、50℃迄の温度での運転が上記圧力以下で、且つ年間 1,500 時間以内であれば、50℃迄の使用が可能である。	呼び径 25A	連続安全使用温度範囲					年間 1,500 時間以内		使用温度	20℃	25℃	30℃	35℃	40℃	45℃	50℃	最大使用圧力 (MPa)	1.51	1.41	1.32	1.21	1.12	1.01	0.92
呼び径 25A	連続安全使用温度範囲					年間 1,500 時間以内																			
使用温度	20℃	25℃	30℃	35℃	40℃	45℃	50℃																		
最大使用圧力 (MPa)	1.51	1.41	1.32	1.21	1.12	1.01	0.92																		

下表に記載の内容は、株式会社イノアック住環境による地中熱交換システム用パイプ U・ポリパイの関係資料を確認し、引用した。引用した資料は、詳細版付録 54～58 ページ参照。

実証項目		結 果				
f. 脆化温度		脆化温度：＜－70℃				
g. 耐腐食性 (耐薬品性)	耐薬品性の一例（温度 20℃）					
	酸		アルカリ	ガス		
	塩酸 35%	◎	アンモニア水溶液	◎	亜硫酸ガス	◎
	硫酸 65%	◎	苛性ソーダ	◎	炭酸ガス	◎
	硝酸 25%	◎	水酸化カルシウム	◎	一酸化炭素	◎
	塩類					
	重クロム酸カリウム 10%	◎	過マンガン酸カリウム	◎	硫安	◎
	塩化第二鉄 60%	◎	塩化バリウム	◎		
	過酸化水素 30%	◎	炭酸カリウム	◎		
	90%	◎				
備考：1. この表は ISO/TR10358* ¹ に基づいたものである。						
2. ◎印は耐薬品性があることを示している。						
h. 寿命	ISO 9080 に規定される、材料の長期耐久性の試験方法により、管が 20℃で 50 年間の使用に耐えうる周方向応力（フープストレス：管の断面にかかる円周方向の応力）が 10MPa 以上である材料である。					
	100.0 20.0℃ 40.0℃ 60.0℃ 80.0℃ <					

* 1 : Plastics pipes and fittings-Combined chemical-resistance classification table.

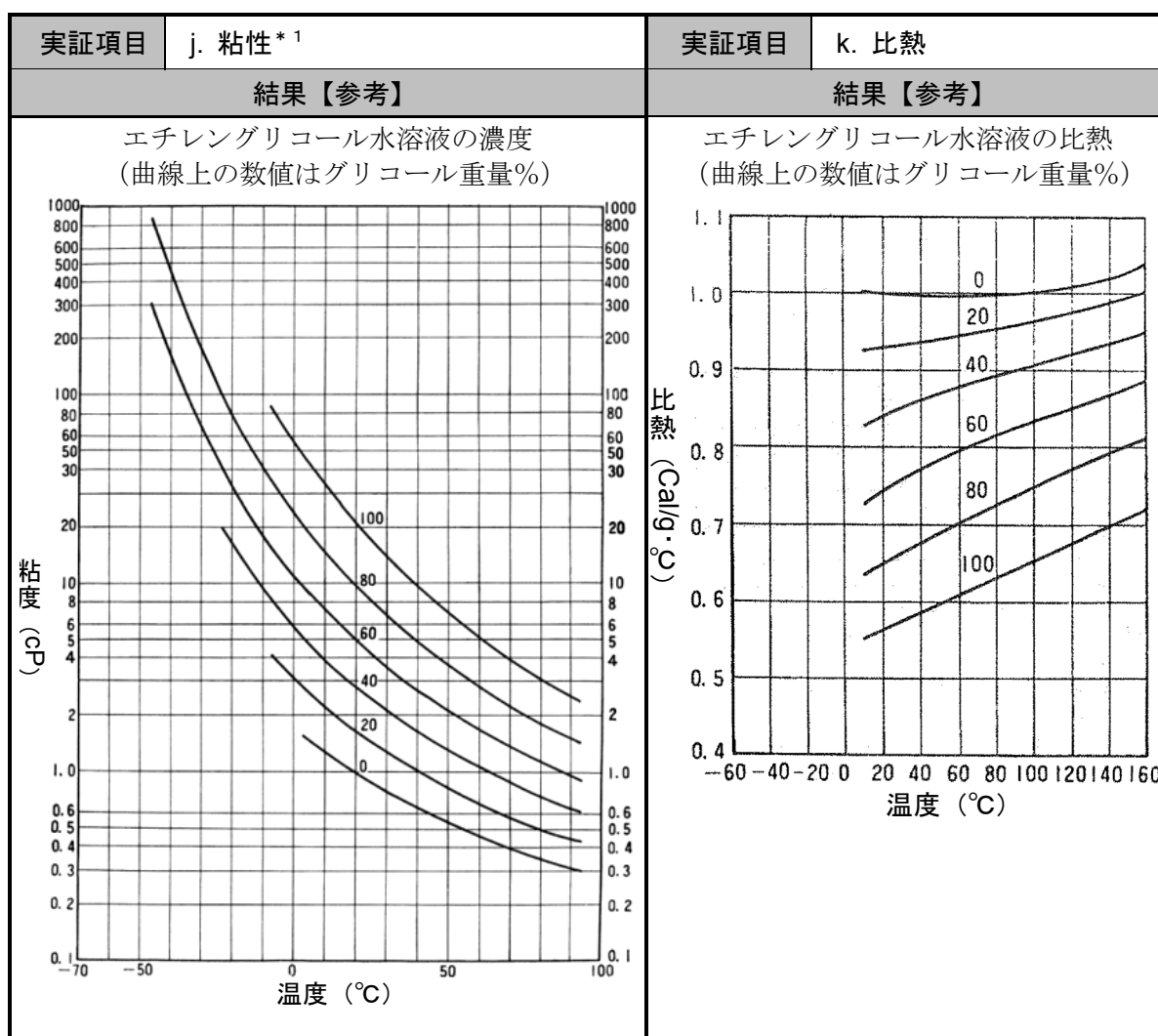
なお、本熱媒循環部の実証項目の実証内容の性能の証明の担保として、その製品の製造事業者の品質管理システムを確認した。熱媒循環部の製造企業である株式会社イノアック住環境は、ISO9001:2008 及び ISO140001:2004 を取得していることを確認した。

3.3 熱媒の実証項目 (性能を証明する書類の写しからの転用)

本実証項目は、熱媒の性能を証明する書類を確認することで実証を代用する項目である。それら実証項目のうち、腐食性、粘性、比熱の実証項目を示す資料がない。そこで、粘性と比熱については、主成分であるエチレングリコールの製造・販売事業者 (丸善石油化学株式会社) 作成の技術資料を確認し、その引用を参考として示す。また、引火性、毒性、生分解性/残留性の実証項目については、製造・販売事業者の古河薬品工業株式会社による製品安全データシートを確認し、引用した。

引用した資料は、詳細版付録 59～60 ページ参照。

実証項目	結 果
i. 腐食性	腐食性に関する資料はない。



また、実証項目の引火性、毒性、生分解性／残留性については、熱媒の製品安全データシートから引用して示す。引用した資料は、詳細版付録 61～62 ページ参照。

実証項目	結果																
l. 引火性	引火点：129℃																
m. 毒性	毒性については、GHS 分類^{*1}で示す。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>GHS 分類の危険有害性</th><th>区分</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>急性毒性^{*2}（経口） 経口：ラット LD₅₀^{*3}：4,000～10,200 mg/kg</td><td>区分 5</td></tr> <tr> <td>皮膚腐食性/刺激性</td><td>区分 3</td></tr> <tr> <td>眼に対する重篤な損傷/眼刺激性</td><td>区分 2B</td></tr> <tr> <td>生殖毒性</td><td>区分 1B</td></tr> <tr> <td>特定標的臓器・全身毒性（単回暴露）</td><td>区分 1</td></tr> <tr> <td>特定標的臓器・全身毒性（反復暴露）</td><td>区分 1</td></tr> <tr> <td>水生毒性（急性）</td><td>区分 3</td></tr> </tbody> </table>	GHS 分類の危険有害性	区分	急性毒性 ^{*2} （経口） 経口：ラット LD ₅₀ ^{*3} ：4,000～10,200 mg/kg	区分 5	皮膚腐食性/刺激性	区分 3	眼に対する重篤な損傷/眼刺激性	区分 2B	生殖毒性	区分 1B	特定標的臓器・全身毒性（単回暴露）	区分 1	特定標的臓器・全身毒性（反復暴露）	区分 1	水生毒性（急性）	区分 3
GHS 分類の危険有害性	区分																
急性毒性 ^{*2} （経口） 経口：ラット LD ₅₀ ^{*3} ：4,000～10,200 mg/kg	区分 5																
皮膚腐食性/刺激性	区分 3																
眼に対する重篤な損傷/眼刺激性	区分 2B																
生殖毒性	区分 1B																
特定標的臓器・全身毒性（単回暴露）	区分 1																
特定標的臓器・全身毒性（反復暴露）	区分 1																
水生毒性（急性）	区分 3																
n. 生分解性／残留性	水生環境では、急速分解性があり、かつ生物蓄積性が低いと推定される。（製品安全データシートには、環境影響情報の水生環境慢性有害性として記載。）																

*1：GHS 分類の詳細及び区分についての説明は、環境省ウェブサイト「化学品の分類および表示に関する世界調和システムについて」（<http://www.env.go.jp/chemi/ghs/pdf/all.pdf>）参照。

*2：急性毒性（経皮）については、ラット LD₅₀：10,600 mg/kg で、GHS 分類は区分外である。

*3：半数の動物が死ぬ体重 1kg 当たりの経口摂取量。

なお、本熱媒の実証項目の実証内容の性能の証明の担保として、その製品の製造事業者の品質管理システムを確認した。熱媒の製造・販売事業者である古河薬品工業株式会社は、ISO9001:2008 を取得していることを確認した。た、熱媒の主成分であるエチレングリコールの製造事業者（丸善石油化学株式会社）については、本社（機能化学品本部）、研究所、四日市工場及び千葉工場が、ISO9001:2008 を取得し、四日市工場及び千葉工場が、ISO14001:2004 を取得していることを確認した。

4. 参考情報

本ページに示された情報は、全て実証申請者が自らの責任において申請したものであり、環境省及び実証機関は、内容に関して一切の責任を負いません。

○実証対象技術の概要（参考情報）

項 目		実証申請者 記入欄
製品名		株式会社福島地下開発本社事務所における地中熱交換井
製造（販売）企業名		株式会社 福島地下開発
連絡先	TEL/FAX	TEL024-943-2298 / FAX024-943-3453
	Web アドレス	http://www.ftk-44.jp
	E-mail	akinori@ftk-44.jp
設置条件		ある程度の地下水が確保できかつ地下水の流向・流速が活発な地形および地質賦存状況下にあるとより効率がよくなります。例（河川付近の河床および岩盤内に発達した亀裂を有し地下水をある程度確保できるボーリング孔であること）また、地下水がなくても地中熱の利用は可能です。
メンテナンスの必要性・コスト・耐候性・製品寿命等		・メンテナンス：ヒートポンプ・ファンコイルユニット点検および配管の漏水・破損点検、不凍液の補充等。 ・耐候性・製品寿命等：現在、追跡調査中だが、概ね稼動状況に、環境要因も含めて無理が生じない運転使用状況なら、50 年程度は持続して稼動が可能と思われる。（定期的な点検必須）
施工性		熱交換器設置の為のボーリング工事を実施する為、ボーリングマシンが設置できる作業スペースが必要不可欠。
技術上の特徴		当社は、地中熱の利用に適した最新鋭の掘削機（ソニックドリル）、特殊振動工法から極硬岩用掘削機（ダウンザホールハンマー工法）を多数所有しており、熱交換井掘削を実施する箇所の地質状況に応じた機械の選定・掘削・施工管理・コストパフォーマンス等の熱交換井を 1 社でまかなうことができます。
コスト概算		掘削のコストは、熱交換器（シングル U チューブ・WUチューブ等）に応じて掘削の口径・仕上げ深度・施工条件・施工本数・地質条件・掘削工法等と幅広い諸事情がありますが、今回の実証試験の地中熱交換井のコストは下記のとおりとなります。 100m の地中熱交換井一本の掘削費 概ね 1.0m あたり @12,000 円×深度（L）100m＝1,200,000 円 U字管設置費 1 孔あたり 115,000 円（材料費別途） よってセットにして約 1,315,000 円程度のコストとなります。 （仮設費・旅費滞在費別途）

○その他実証申請者からの情報（参考情報）

当社は地中熱交換井の掘削においては、大手ゼネコンおよび地元建設会社・同業者の下請工事等で受注していますが、稼動エリアは主に北は青森県、南は岐阜県・静岡県くらいまで実績があります。

○ 本編

1. 実証試験の目的及び概要

1.1 環境技術実証事業の概要

（1）環境技術実証事業の目的と定義

環境技術実証事業の目的と本事業の「実証」の定義は、「平成 22 年度 環境技術実証事業 実施要領」*¹に次のように定められている。

『環境技術実証事業は、既に適用可能な段階にありながら、環境保全効果等についての客観的な評価が行われていないために普及が進んでいない先進的環境技術について、その環境保全効果を第三者が客観的に実証することにより、環境技術を実証する手法・体制の確立を図るとともに、環境技術の普及を促進し、環境保全と環境産業の発展に資することを目的とする。』

本実証事業において「実証」とは、環境技術の開発者でも利用者でもない第三者機関が、環境技術の環境保全効果、副次的な環境影響、その他環境の観点から重要な性能（以下、「環境保全効果等」という。）を試験等に基づき客観的なデータとして示すことをいう。「実証」とは、一定の判断基準を設けて、この基準に対する適合性を判定する「認証」とは異なるものである。』

（2）本実証試験の仕様

本実証試験は、「環境技術実証事業 ヒートアイランド対策技術分野（地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム）実証試験要領（第 2 版）」*²に基づいて実施されたものである。

1.2 実証対象技術の概要と実証試験

本技術分野の対象とする地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システムとは、地中熱及び地下水熱、下水熱等を熱源とし、ヒートポンプによって効率的に暖冷房を行うシステム全般のことである。当該システムは、多層的な技術の組み合わせで構成されており、図1-1のとおり階層的に分類される。

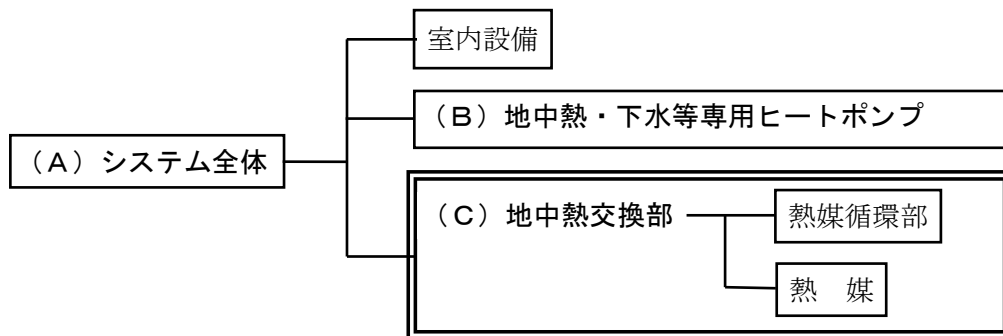


図 1-1 実証対象技術の全体像

本報告書はこれらの階層的技術の内、「（C）地中熱交換部」に関する報告書である。「（C）地中熱交換部」は「地中熱交換井からヒートポンプの地中熱源側の熱媒出入り口までを範囲とするシステム。土木系企業の技術のみで設置可能な技術範囲である。」と実証試験要領（第 2 版）に定義されている。

* 1 : 環境省 平成 22 年 4 月『平成 22 年度 環境技術実証事業 実施要領』

http://www.env.go.jp/policy/etv/pdf/intro/yoryo_h22.pdf

* 2 : 環境省 水・大気環境局 平成 22 年 5 月 18 日『環境技術実証事業 ヒートアイランド対策技術分野（地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム）実証試験要領（第 2 版）』

http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=17387&hou_id=12495

地中熱交換部は、地中熱利用において地下から熱を採取し、地下に熱を放熱する重要な施設である。一般に地中熱交換部は地中熱交換井と、地中熱交換井の中に挿入したU字管などの熱媒循環部、地中熱交換井を充填する砂などの充填材、及び熱媒循環部（U字管）を循環する熱媒からなる。熱媒は地中熱交換井と地上に設置されたヒートポンプとの間を循環する流体で、熱を運ぶ媒質である。

本実証試験では、地中熱交換部全体の性能をサーマルレスポンス試験によって実証するとともに、熱媒循環部であるU字管、熱媒である不凍液（グライン）の性能を資料により実証したものである。なお、サーマルレスポンス試験は熱応答試験あるいはTRT（Thermal Response Test）とも呼ばれている。そこで、本実証試験結果報告書では、「サーマルレスポンス試験」を「TRT」と省略して書く場合がある。

1.3 実証単位（C）の実証項目

(1) 実証項目の構成

地中熱交換部は、それを構成する複数の技術に分割できる。そのため実証項目は、図 1-2 に示すように、地中熱交換部全体でのみ実証が可能な実証項目と、各技術個別の実証項目から構成される。

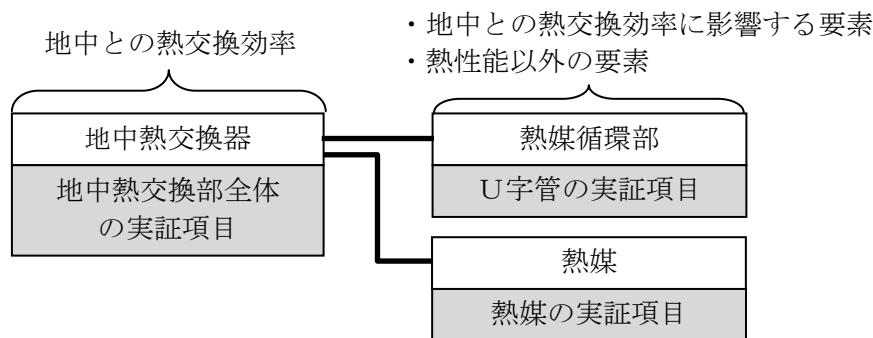


図 1-2 地中熱交換部における実証項目の構成

(2) 実証項目

実証単位（C）「地中熱交換部」における実証項目は、実証試験要領（第 2 版）に以下の表 1-1～表 1-3（詳細版本編 12 ページ）のように規定されている。

表 1-1 の「地中熱交換部全体の実証項目」については、実証試験を行い求める。また表 1-2（詳細版本編 12 ページ）の「熱媒循環部の実証項目」及び表 1-3（詳細版本編 12 ページ）の「熱媒の実証項目」については、各項目の性能を証明する書類を確認することで実証を代用すると規定されている。

表 1-1 地中熱交換部全体の実証項目

実証項目	内容	評価方法
a. 熱交換井の熱抵抗	熱抵抗値 $[K/(W/m)]$	サーマルレスポンス試験から算出
b. 土壌部分の熱伝導率	熱伝導率 $[W/(m \cdot K)]$	サーマルレスポンス試験から算出

表 1-2 熱媒循環部の実証項目

実証項目	内容	評価方法
c. 流量範囲	適正流量（上限と下限）[cm ³ /s]	各項目の性能を証明する書類の写しを提出する。
d. 熱伝導性	素材の熱伝導率 [W/(m・K)]	
e. 耐熱性	—	
f. 脆化温度	脆化温度 [°C]	
g. 耐腐食性	—	
h. 寿命	—	

表 1-3 熱媒の実証項目

実証項目	内容	評価方法
i. 腐食性	—	各項目の性能を証明する書類の写しを提出する。
j. 粘性	粘性率 [Pa・s]	
k. 比熱	[J/kg・K]	
l. 引火性	—	
m. 毒性	—	
n. 生分解性／残留性	—	

2. 実証機関・実証申請者・実証試験体制

実証試験に参加する組織は、図 2-1 に示すとおりである。また、実証試験参加者とその責任分掌は、表 2-1 に示すとおりである。

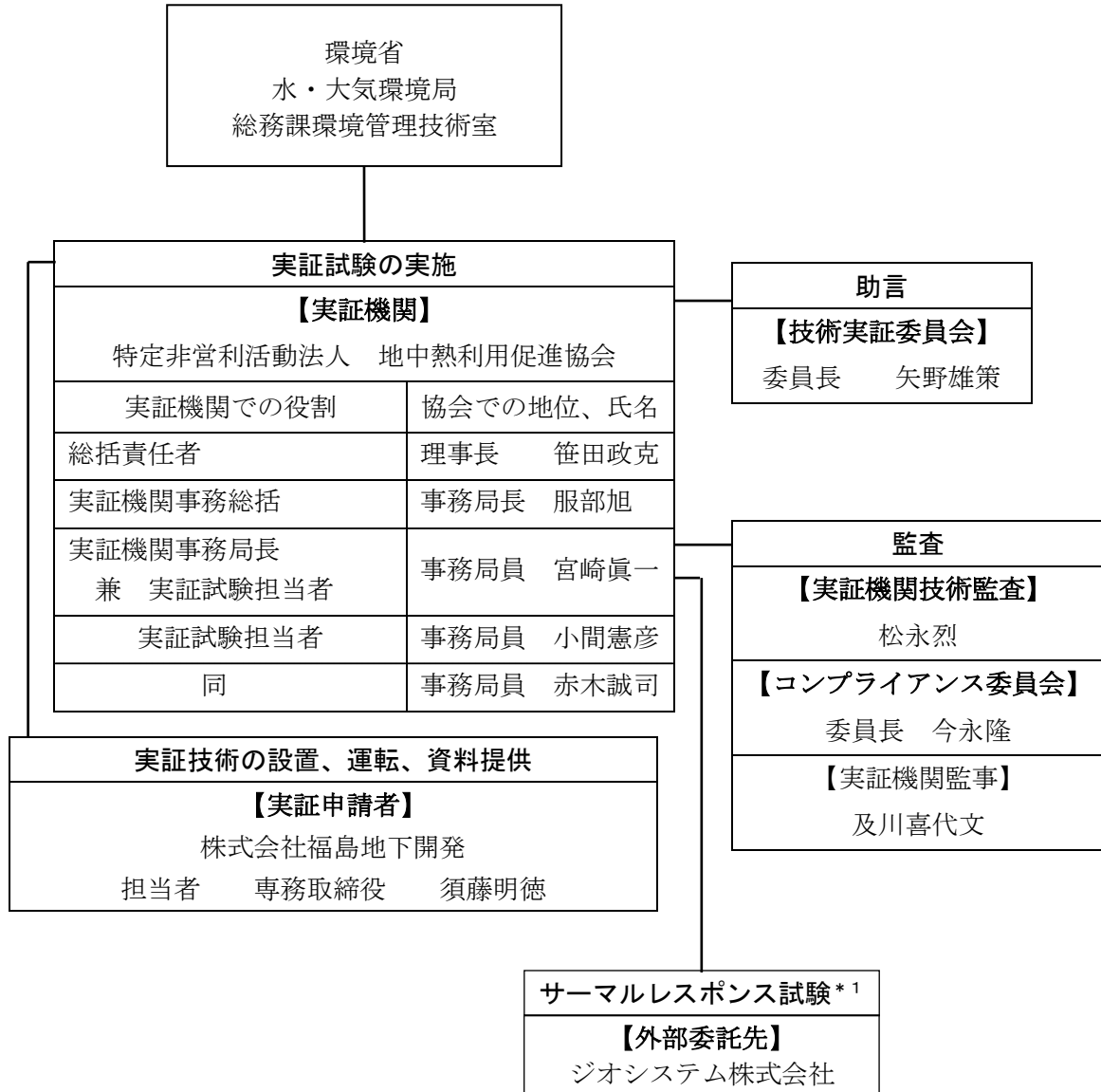


図 2-1 実証試験体制

*1：サーマルレスポンス試験は、外部委託した。詳細は、表 2-1（詳細版本編 14 ページ）の
*2 を参照。

表 2-1 実証試験参加機関、責任分掌

区分	実証試験参加機関	責任分掌	参加者
実証機関	特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会	実証試験の運営管理	笹田政克 服部旭 宮崎眞一 小間憲彦 赤木誠司
		実証対象技術の公募・審査	
		技術実証委員会の設置・運営	
		品質管理システムの構築	
		実証試験計画の策定	
		実証試験の実施・運営	
		実証試験データ・情報の管理	
		実証試験結果報告書の作成	
		その他実証試験要領で定められた業務	
		技術実証委員会の設置・運営補助	
		内部監査の総括	松永烈*1
		実証試験データの検証	
		外部委託業務の監査	服部旭
		適法性及び公平性の確認	コンプライアンス委員会
実証申請者	株式会社福島地下開発	実証機関への必要な情報提供と協力	須藤明德
		実証対象製品の準備と関連資料の提供	
		費用負担及び責任をもって 実証対象製品の運搬等を実施	
		既存の性能データの提供	
		実証試験報告書の作成における協力	
外部委託先	ジオシステム株式会社*2	サーマルレスポンス試験の実施及び試験装置	高杉真司

*1：独立行政法人産業技術総合研究所 つくばセンター次長

*2：所在地：東京都練馬区関町北3丁目39-17（会社概要：<http://www.geo-system.jp/gaiyo.htm>）
理学博士、技術士（応用理学）、工学博士からなり、一級管工事施工管理技師、IGSHPA 公認地中熱利用システムインストーラ*3の資格を有する。地中熱利用の総合的技術力があり、国内の実績が多い。また、サーマルレスポンス試験装置を所有し、高い精度の観測実績が豊富である。また、本実証試験の公平性・公正性を維持するために、外部委託先にはサーマルレスポンス試験以外に関わらせていない。

*3：国際地中熱ヒートポンプ協会（IGSHPA：International Ground Source Heat Pump Association）公認の地中熱交換部のための掘削、U 字管挿入、ヒートポンプシステムの配管等を含めたシステム構築に関する地中熱ヒートポンプの技術資格。

3. 実証対象技術の概要

3.1 実証試験の実施場所

実証試験実施場所の所在地及び名称は、表 3-1 のとおりである。また、その地図を図 3-1 に、本社事務所を含めた実証試験の実施場所外観写真を図 3-2（詳細版本編 16 ページ）に示す。

表 3-1 実証試験実施場所の所在地及び名称

実証試験実施場所	所在地	福島県郡山市田村町金屋字新家 110 番地
	名称	株式会社福島地下開発 本社事務所敷地

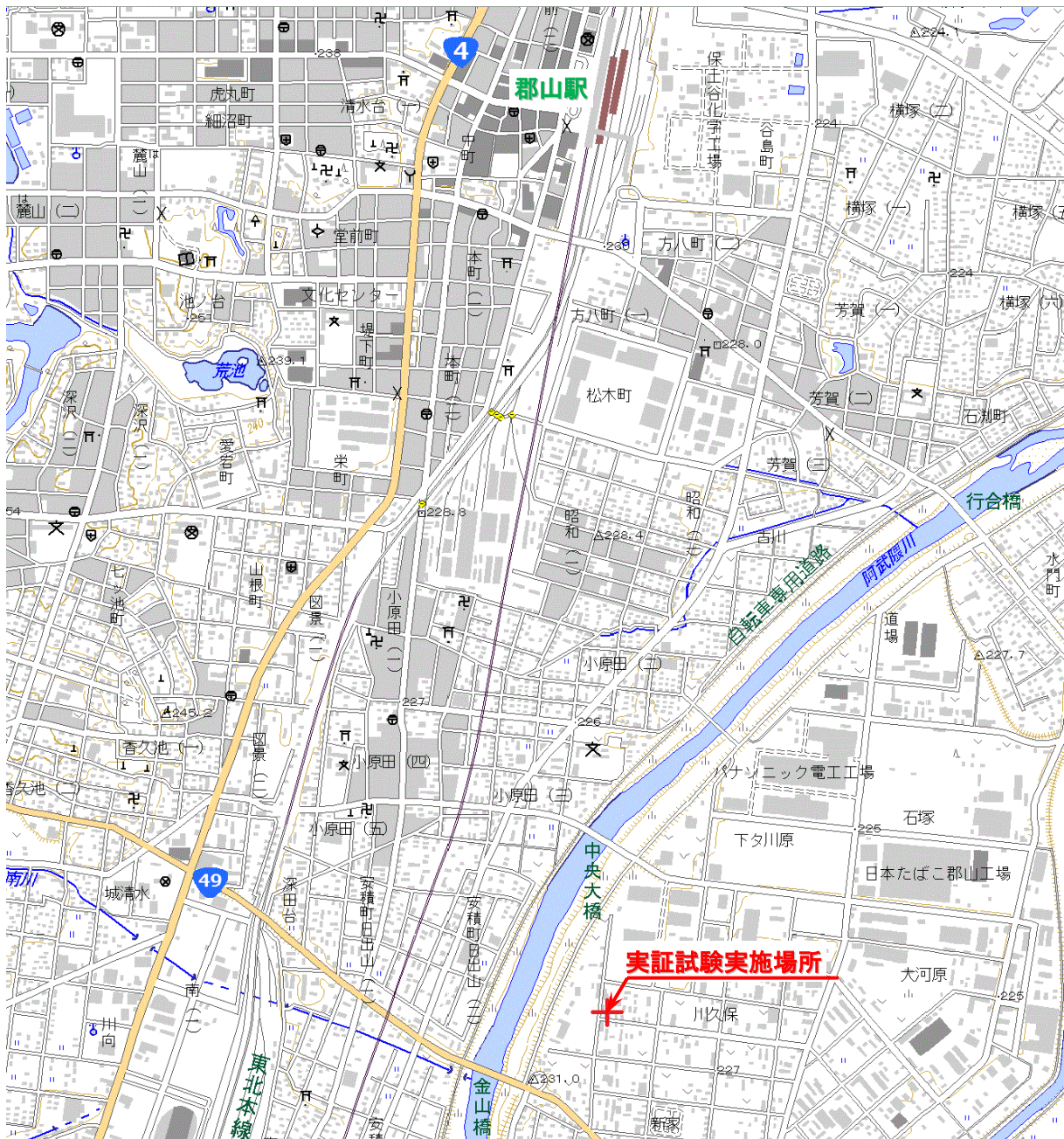


図 3-1 実証試験実施場所の位置図*1

*1：電子国土ポータル（<http://portal.cyberjapan.jp/>）から引用。



図 3-2 実証試験の実施場所外観写真

3.2 実証対象技術の仕様

(1) 地中熱交換部

実証対象技術の地中熱交換部は、地中熱交換井とその中に挿入したU字管、充填砂などからなるが、地中熱交換部周辺の地質名や孔のサイズ、掘削条件などを図 3-3 に示す。

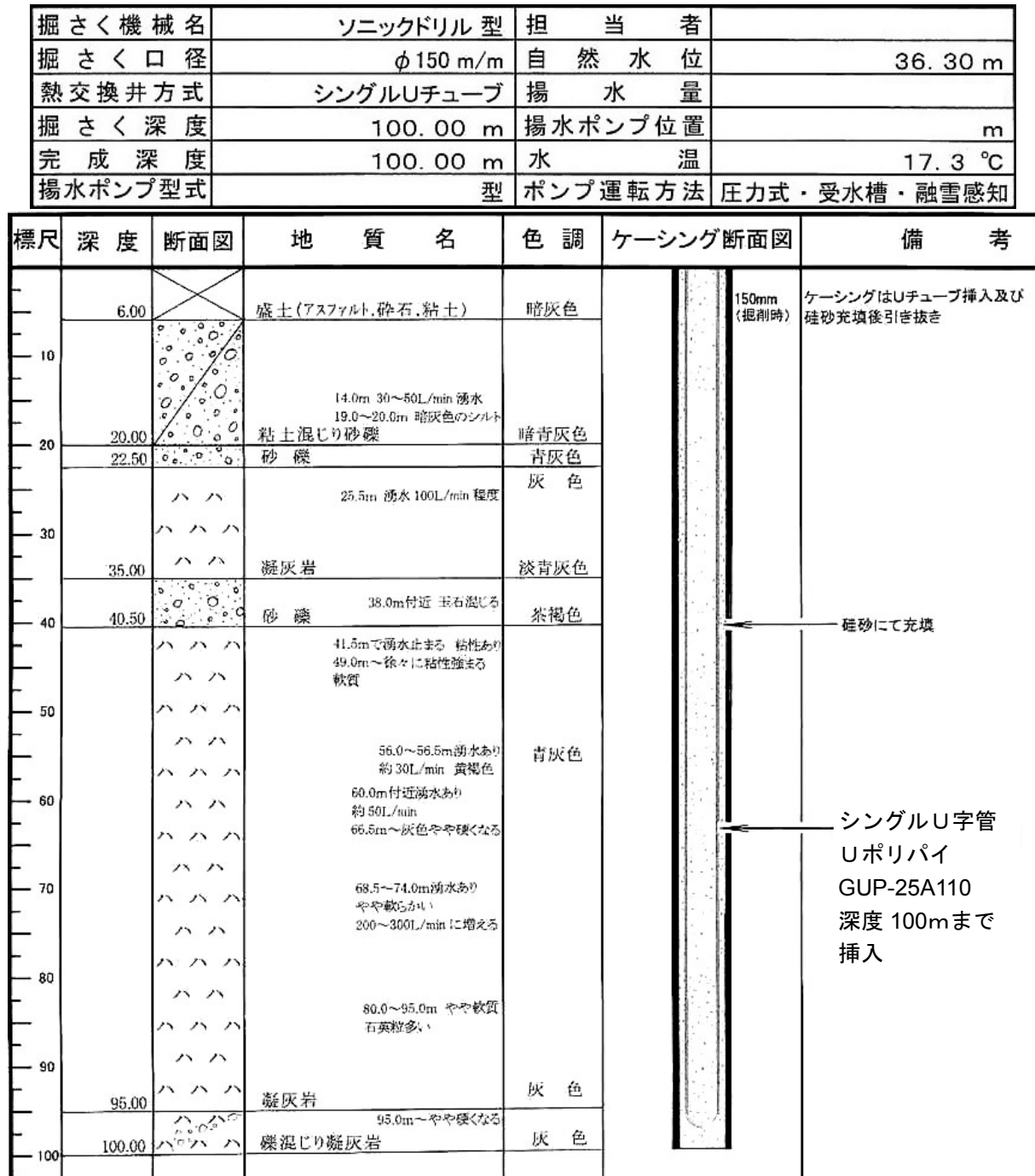


図 3-3 地中熱交換部

地中熱交換井内の充填砂は、阿武隈川で採取された砂である。産地は福島県郡山市西田町大網。粒度分布は、表 3-2 に示す。

表 3-2 充填砂の粒度分布

ふるいの呼び寸法（mm）	5.00	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
ふるい通過重量百分率（%）	100	95	79	61	18	3

(2) 熱媒循環部

熱媒循環部は、地中熱交換井の中に挿入した管で、その中に熱媒を循環させるものである。その仕様は表 3-3 に示す

表 3-3 熱媒循環部の仕様

製品名及び型式	地中熱交換システム用パイプ「Uーポリパイ」GPU-25A110
製造・販売事業者	株式会社イノアック住環境
材質	高密度ポリエチレン材料（PE-100）
寸法	パイプ外径 34.0mm±0.20mm、厚さ 3.5mm±0.30mm、近似内径 27mm
設置方式	シングルU字管
設置深度	100m まで挿入

熱媒循環部（U字管）及び熱媒循環部挿入状況を図 3-4 に示す。



図 3-4 熱媒循環部（U字管）及び熱媒循環部挿入状況

(3) 熱媒

熱媒は、U字管の内部を循環して地中からの熱を採取したり放熱したりする媒体で、その熱をヒートポンプに運ぶ役割をする流体である。熱媒の仕様を表 3-4 に示す。

表 3-4 熱媒の仕様

製品名	KYK ロングライフクーラント（不凍液）
主成分	エチレングリコール 90%
製造・販売事業者	古河薬品工業株式会社
熱媒として使用時の形態	エチレングリコール 30%希釈液

3.2 実証対象技術の特徴・長所を含む参考情報

本ページに示された情報は、全て実証申請者が自らの責任において申請したものであり、環境省及び実証機関は、内容に関して一切の責任を負いません。

○実証対象技術の概要（参考情報）

項 目		実証申請者 記入欄
製品名		株式会社福島地下開発本社事務所における地中熱交換井
製造（販売）企業名		株式会社 福島地下開発
連絡先	TEL/FAX	024-943-2298 / 024-943-3453
	Web アドレス	http://www.ftk-44.jp
	E-mail	akinori@ftk-44.jp
設置条件		ある程度の地下水が確保できかつ地下水の流向・流速が活発な地形および地質賦存状況下にあるとより効率がよくなります。例（河川付近の河床および岩盤内に発達した亀裂を有し地下水をある程度確保できるボーリング孔であること）また、地下水がなくても地中熱の利用は可能です。
メンテナンスの必要性・コスト・耐候性・製品寿命等		・メンテナンス：ヒートポンプ・ファンコイルユニット点検および配管の漏水・破損点検、不凍液の補充等。 ・耐候性・製品寿命等：現在、追跡調査中だが、概ね稼動状況に、環境要因も含めて無理が生じない運転使用状況なら、50 年程度は持続して稼動が可能と思われる。（定期的な点検必須）
施工性		熱交換器設置の為にボーリング工事を実施する為、ボーリングマシンが設置できる作業スペースが必要不可欠。
技術上の特徴		当社は、地中熱の利用に適した最新鋭の掘削機（ソニックドリル）、特殊振動工法から極硬岩用掘削機（ダウンザホールハンマー工法）を多数所有しており、熱交換井掘削を実施する箇所の地質状況に応じた機械の選定・掘削・施工管理・コストパフォーマンス等の熱交換井を1社でまかなうことができます。
コスト概算		掘削のコストは、熱交換器（シングル U チューブ・WUチューブ等）に応じて掘削の口径・仕上げ深度・施工条件・施工本数・地質条件・掘削工法等と幅広い諸事情がありますが、今回の実証試験の地中熱交換井のコストは下記のとおりとなります。 100m の地中熱交換井一本の掘削費 概ね 1.0m あたり@12,000 円×深度（L）100m=1,200,000 円 U字管設置費 1 孔あたり 115,000 円（材料費別途） よってセットにして約 1,315,000 円程度のコストとなります。 （仮設費・旅費滞在費別途）

○その他実証申請者からの情報（参考情報）

当社は地中熱交換井の掘削においては、大手ゼネコンおよび地元建設会社・同業者の下請工事等で受注していますが、稼動エリアは主に北は青森県、南は岐阜県・静岡県くらいまで実績があります。

4. 地中熱交換部全体の実証項目の試験内容

地中熱交換部全体の実証項目（表 1-1、詳細版本編 11 ページ参照。）はサーマルレスポンス試験によって評価するものである。サーマルレスポンス試験は TRT（Thermal Response Test）とも呼ばれている。

4.1 サーマルレスポンス試験（TRT）の方法

地中熱交換部全体の実証項目の実証方法は、実証試験要領（第2版）に規定されている。以下に実証試験要領（第2版）を引用して示す。

(1) 考え方

a) 土壌部分の熱伝導率（一般的には「有効熱伝導率」と言われている。）

土壌部分の熱伝導率は、システムが施工された土壌部分のみの熱伝導率であるため、システムによらない。本実証試験ではサーマルレスポンス試験によって算出する。

b) 地中熱交換井の熱抵抗

熱交換井の熱抵抗は、一次側熱媒から土壌までに達する熱流路における抵抗の合計を表す。本実証試験ではサーマルレスポンス試験にて算出する。

(2) 測定方法

サーマルレスポンス試験は、原則的に、以下に示す既存論文に準拠すると実証機関が認める方法で行い、実証項目を算出する。本要領では、当該論文の内容を抜粋して示す。

【論文】 講座「地中熱利用ヒートポンプシステム」温度応答試験の実施と解析；九州大学大学院工学研究院 藤井光、日本地熱学会誌 第28巻 第2号（2006）

図 4-1 に示すように、アルファベットに記した測定点をそれぞれ測定する。

なお、 $T_1 \sim T_n$ は、試験開始前における熱交換井まわりの温度平均値を算出することを目的とし、2m 以内の間隔で測定するものとする。測定方法は、システムの設置環境を勘案し、妥当な測定結果を得られると実証機関が認める方法でなければならない。

$T_1 \sim T_n$: 熱交換井内の熱媒温度 [K]（最大 2m 間隔）

V : 熱媒流量 [cm³/s]

W : 電気ヒーターの消費電力 [W]

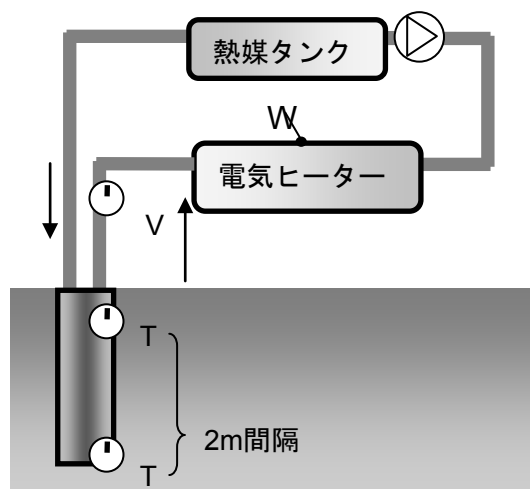


図 4-1 地中熱交換部の実証における測定点

(3) 測定周期と測定期間

上記論文に準拠する。

(4) 実証項目の算定

a) 土壌部分の熱伝導率

土壌部分の熱伝導率の値は、以下の通りに算定する。

◇ $T - T_i$ （熱交換器入口温度と出口温度の熱媒の平均温度）を被説明変数、 t （加

熱時間）の自然対数 $\ln(t)$ を説明変数とした、単回帰分析を行い、単回帰式（i）

の傾き m を導出する。 b は単回帰式の切片である。

◇ 熱交換井における単位長さ当たりの熱交換量の測定値と、導出した m の値を、式（ii）に代入して熱伝導率 λ を算定する。

$$T - T_i = m \cdot \ln(t) + b \quad (\text{i})$$

$$\lambda = 0.183 \times \frac{q}{m} \quad (\text{ii})$$

T : 熱交換器入口温度と出口温度の熱媒の平均温度 [K]

T_i : 熱交換器入口温度と出口温度の熱媒の平均温度（初期値）[K]

m : 上記単回帰分析における回帰式の傾き

t : 時間 [s]

q : 単位長さ当たりの熱交換量 [W/m]

b) 地中熱交換井の熱抵抗

地中熱交換井の熱抵抗の値は、以下の通りに算定する。

◇ a. で得られた熱伝導率 λ を式（iii）に代入し、熱抵抗 R を算出する。

$$T - T_i = \frac{q}{2\pi\lambda} \left(-\ln \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} - 0.2519 \right) + q \cdot R \quad (\text{iii})$$

r : 地中熱交換井中心からの半径 [m]

α : 地層温度伝導率（熱拡散率）[m²/s]

ここまでの実証試験要領（第2版）の引用である。

4.2 本実証対象技術でのサーマルレスポンス試験（TRT）の方針

本実証対象技術でのサーマルレスポンス試験の方法は基本的には実証試験要領の規定に従っている。しかし、本実証対象技術のある場所は地下水の流速が早いとの情報があり、TRT に際して地下水流動による地下の温度変化に対する影響が大きいだろうとの予想がなされたため、通常の試験方法に加えて、以下のように2点について対応をする方針とした。なお、この試験の方針は平成22年7月21日開催の技術実証委員会で承認された。

【多段階の加熱について】

本実証対象技術においては申請の時点から、「地中熱交換井が掘削された地層は比較的透水性が良く地下水流動速度が速いだろうと推測されている」との情報が実証申請者からあった。このため地層の熱交換性能がかなり高く、TRT において加熱した熱媒を循環した際に比較的短時間に地中との熱交換が定常に達するとともに、一般的な TRT において印加している 50W/m 以下での加熱では十分な温度上昇が得られず良好な試験結果が得られない可能性があった。

そこで、今回の TRT では、加熱出力が一段階である一般的な手法による熱伝導率の測定に加え、有効熱伝導率が高すぎて加熱量が不足し測定できないような状況が生じた場合には、加熱出力を多段階に増加させて、熱伝導率と熱抵抗を測定する計画とした。

【光ファイバー温度計による温度測定について】

本実証試験に際して、光ファイバー温度計による地下の温度測定を実施することにした。これは、加熱後の温度回復状況を光ファイバー温度測定器により深度 1 m 毎に測定することによって、地下水流動によって生じているであろう見かけ熱伝導率の深度分布を把握するためである。この測定は、TRT の外部委託であるジオシステム株式会社から提案されたものである。この提案は、実証単位（C）における実証試験の範囲外であるが、実証機関は次の 2 点の理由から了承した。

- ・ 地下の熱的性質をより一層詳しく知ることができるため。
- ・ この測定は九州大学の協力を得て、ジオシステム株式会社の負担で実施するため。

そして、測定結果を本実証試験報告書の巻末に【参考】として、別添【参考】（詳細版別添 63～67 ページ）に記載することにした。

4.3 実証試験要領（第 2 版）に規定するサーマルレスポンス試験の測定方法の確認

本サーマルレスポンス試験は、実証試験要領（第 2 版）*1 28 ページに規定の【測定方法】*2 に従い実施した。その確認として、測定方法の主な項目（初期温度測定の間隔、測定周期及、平均流量及び測定期間等）を表 4-1 に示す。例えば、平均流量は、熱媒循環部の適正流量範囲*3 であり、実証試験要領（第 2 版）28 ページに規定の【測定方法】に従っている。

表 4-1 本サーマルレスポンス試験の初期温度測定間隔、測定周期、平均流量及び測定期間等

初期温度 測定間隔*4	測定周期*5	平均流量*6	測定期間*7		その他 備考
1 m 間隔	1 分毎	20.0 L/min	8 日間	9 月 3 日午前 9 時 40 分～ 9 月 10 日午前 8 時 40 分	—

*1：環境省 水・大気環境局 平成 22 年 5 月 18 日『環境技術実証事業 ヒートアイランド対策技術分野（地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム）実証試験要領（第 2 版）』http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=17387&hou_id=12495.

*2：講座「地中熱利用ヒートポンプシステム」温度応答試験の実施と解析；九州大学大学院工学研究院 藤井光、日本地熱学会誌 第 28 巻 第 2 号（2006）準拠。

*3：表 6-2（詳細版本編 38 ページ）の c. 流量範囲を参照。本平均流量は、*2 で設定された乱流域（レイノルズ数 2,300 以上）にあることが判る。

*4：表 5-1（詳細版本編 31 ページ）より

*5：詳細版本編 4. 4.4(7)（詳細版本編 27 ページ）の記載より。

*6：図 5-2（詳細版本編 33 ページ）より。

*7：表 4-7（詳細版本編 30 ページ）より。

4.4 サーマルレスポンス試験（TRT）の測定方法

（1）具体的な測定計画

TRT の方針に従い、具体的な測定計画は次のとおりとした。図 4-2 参照。

- ①光ファイバーをU字管（熱媒が地下から地上に戻る側）に挿入し、加熱時と温度回復時の深度毎の温度変化を測定できるようにする。
- ②加熱出力約 5kW（50W/m）での加熱を 72 時間程度行う。
- ③5kW で 72 時間の加熱で熱交換が定常に達しなければ、加熱量が足りていたことになるので、加熱開始 72 時間後に加熱・循環を停止し、温度回復を測定する。
- ④5kW の加熱で温度変化がなくなり熱交換が定常に達するようであれば、加熱量が不足していたことになるので、5kW による加熱を一定時間継続した後に、加熱出力約 7 kW（70W/m）での加熱に切り替える。
- ⑤7kW の加熱で定常に達しなかった場合は、加熱開始 72 時間後に加熱・循環を停止し温度回復データを 72 時間程度取得したのちに、測定終了とする。
- ⑥7kW の加熱で定常に達した場合には、温度回復データを 72 時間程度取得したのちに、加熱出力約 3kW（30W/m）での加熱を行い、定常に達するまでデータを取得し、測定終了とする。

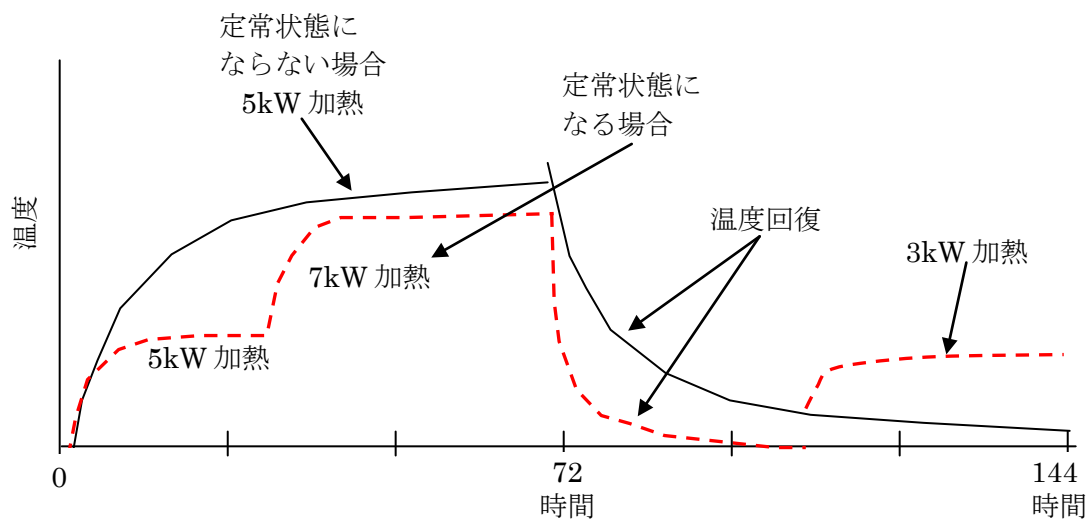


図 4-2 温度上昇状況に応じた試験方法の模式図

(2) TRT の測定設備

本実証試験における TRT 装置の全体システムを図 4-3 に示す。

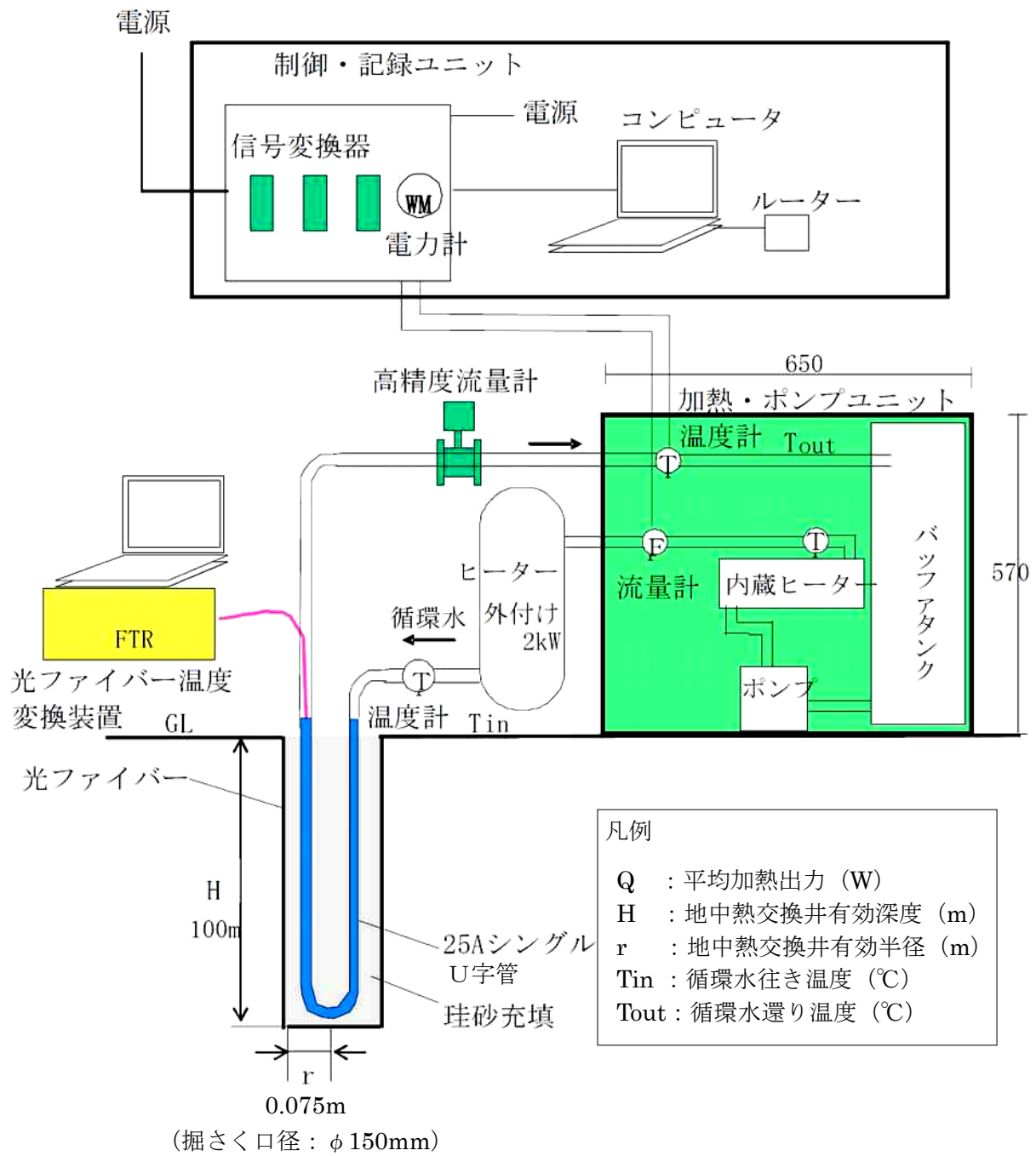


図 4-3 TRT 装置の全体システム

(3) TRT 装置

TRT の測定装置の写真を図 4-4、TRT 装置の諸元を表 4-2 に示す。

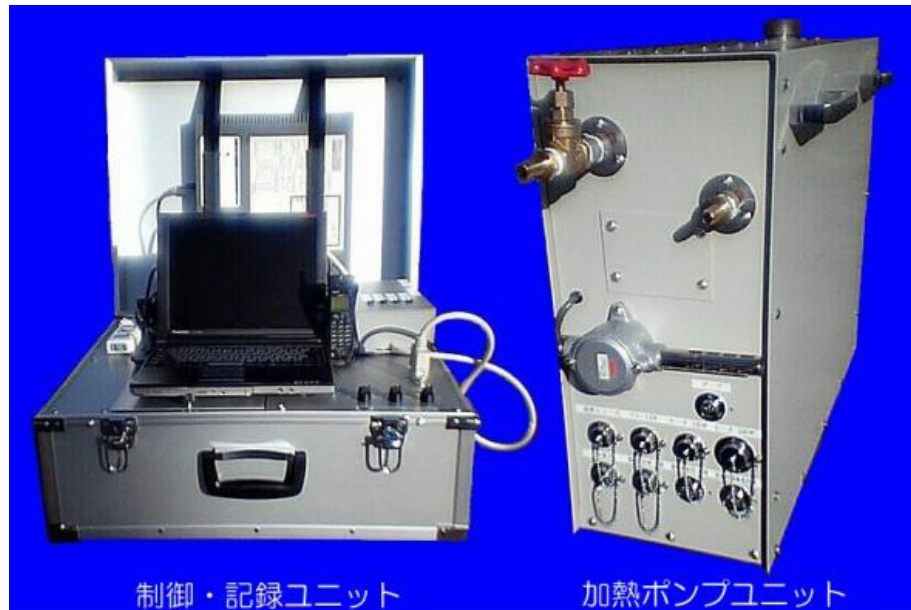


図 4-4 TRT 装置の制御・記録ユニット、加熱・ポンプユニットの写真

表 4-2 TRT 装置の諸元

① TRT 制御・記録ユニット（寸法 W600×D460×H280、重量 20kg）		
品名	仕様	数量
電力計	単相 200V、測定レンジ 5kW	1
温度計	白金抵抗体 Pt100、測定範囲 - 50～+250℃	2
流量計	電磁流量計(内蔵)、測定範囲 2.5～50L/min	1
	電磁流量計(外付)、測定範囲 2～40L/min	1
A/D 変換装置	白金抵抗体用、8ch	1
	電圧測定用、8ch	1
② 加熱・ポンプユニット（寸法 W310×D650×H570、重量 20kg）		
品名	仕様	数量
加熱用電気ヒーター	シーザーヒーター 1kW（ユニット内蔵）	1
	シーザーヒーター 2kW（ユニット内蔵）	1
	シーザーヒーター 2kW（ユニット内蔵）	1
	シーザーヒーター 2kW（外付け）	1
循環水ポンプ	単相 100V、30L/min、水頭 7m	1
バッファタンク	ステンレス製 実容量 12L	1

(4) TRT 装置の測定器と精度

TRT 装置の測定器の諸元と精度を表 4-3 に示す。

表 4-3 TRT 装置の測定器と精度

①電力計	
製造事業者	オムロン株式会社
型式	K3FL-WT3
精度	±25W（±0.5% F.S.）
検定等	検定は、メーカーによる検定を 2009 年 2 月に実施済み。
②温度計	
製造事業者	オムロン株式会社
型式	E52-P6D
精度	B 級 ±0.5℃
検定等	社外校正を 2010 年 8 月に実施し、トレーサビリティが確認されている標準温度計と差が最大でも 0.1℃であることを確認済みである。
③流量計	
製造事業者	株式会社キーエンス
型式	FD-UH15G
精度	0.2L/min（±0.5% F.S.）
検定等	メーカーによる校正を 2010 年 5 月に実施済みであり規定の精度確認を済みである。

(5) 測定器の精度規定の確認

表 4-2 に示す測定器は、実証試験要領に定める測定機器の精度規定を満たしている。

(6) 光ファイバー温度計【参考】

光ファイバー温度計を使用した測定は、実証単位（C）における実証試験の範囲外であるが、参考として測定するため、光ファイバー温度計についても、参考として表 4-4 に示す。

表 4-4 光ファイバー温度計の諸元

光ファイバー温度計（参考測定）	
製造事業者	日立電線株式会社
型式	FTR070
精度	温度分解能：0.1℃、精度±1℃
その他	最小サンプリング間隔：1 分

(7) 測定データの記録方法

電力計の瞬時電力、温度計、循環水の流量計の信号は、TRT 装置内の A/D 変換器によってデジタルデータに変換される。このデータをコンピュータ上のデータ収録ソフトで、1 分毎のサンプリング周期で収録する。使用したデータロガーの諸元を表 4-5 に示す。

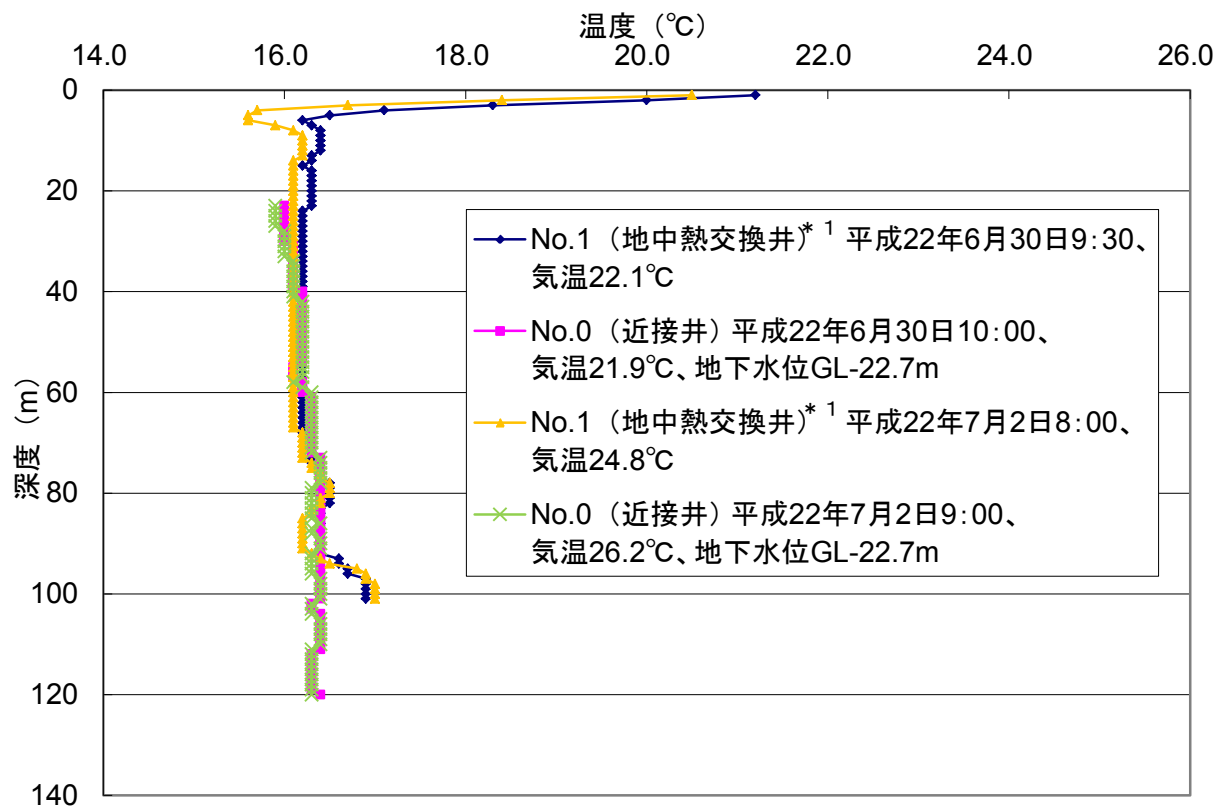
表 4-5 データロガーの諸元

TRT 用データロガー	
製造事業者	株式会社エム・システム技研
型式	温度計用：R1M-J3T、電力計、流量計用：R1MS-GH3T
精度	±0.05%（±電力 2.5W、流量±0.05L/min）

4.5 サーマルレスポンス試験（TRT）の実施前の地下温度の状況と対応

本実証対象技術は、平成 21 年（2009 年）10 月～12 月にシステムが設置され、平成 22 年 1 月から 4 月まで 4 ヶ月間既に地中熱ヒートポンプ利用の暖房を行っていた。一方、TRT は、地中の熱的状态が定常な状況において試験をしなければ適切な結果が得られない。このため、地中の熱的状态が定常な状況に戻るための期間として 4 ヶ月間は地中熱の利用を休止することとし、サーマルレスポンス試験の前に地中熱交換井の地中温度を測定して、地中の熱的状态が定常に戻っていることを確認した上で TRT をすることとした。

TRT 実施前における地中熱交換井の地中温度測定は、平成 22 年の 6 月 30 日と 7 月 2 日に行われたが、その結果を図 4-5 に示す。この結果から、地中の熱的状态は定常に戻っていると判断されたので、表 4-6（詳細版本編 28 ページ）の日程に従い、TRT を実施した。



*1：TRT を実施し、実証項目を算出した坑で、表 4-7（詳細版本編 30 ページ）に示す地中熱交換井の坑名と同じ。

図 4-5 サーマルレスポンス試験（TRT）の前の地中の温度測定

4.6 サーマルレスポンス試験（TRT）の実施

(1) 現地試験の日程

TRT の現地試験は、平成 22 年 8 月 30 日～9 月 11 日に実施した。TRT の試験実施日程の内訳を表 4-6 に示す。

表 4-6 TRT の試験実施日程

作業項目	日数	8 月		9 月										
		30		1 日		3		5		7		9		11
装置設置・準備	1 日	—												
加熱循環*1	0.2 日		—											
温度回復*2	3 日			—	—	—								
加熱循環	3 日					—	—	—						
温度回復	4 日								—	—	—	—		
撤収	0.5 日													—

*1：停電のため、加熱中断。詳細については、詳細版本編 4. 4.6 (3)（詳細版本編 30 ページ）に記載。

*2：8 月 31 日から 9 月 3 日の温度回復については、詳細版本編 4. 4.6 (3)（詳細版本編 30 ページ）に記載。

(2) 機器の設置

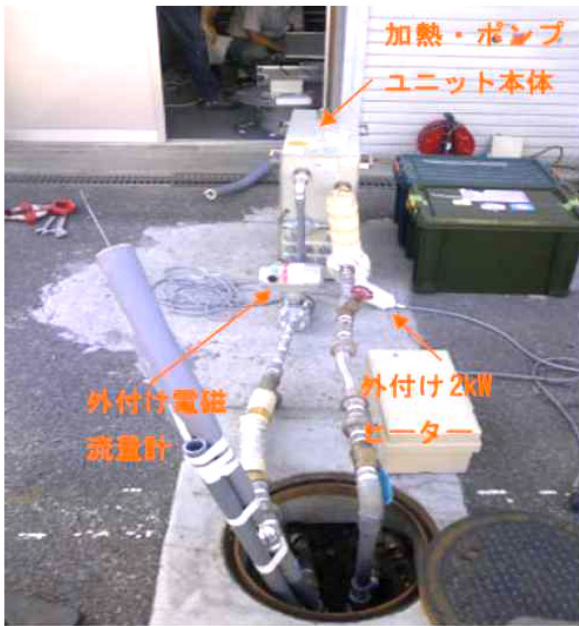
地中熱交換井の近傍に電気ヒーター内蔵の加熱・ポンプユニットを設置し、U字管に循環水用の配管を接続した。温度計、流量計の信号線を制御・記録ユニットに接続し、循環・加熱制御を行うと共にデータ収録をした。制御・記録ユニット、加熱・ポンプユニットはブルーシートで覆い風雨の影響を受けないようにした。また、加熱・ポンプユニットからU字管までの配管には断熱材を巻くとともに、日射の影響をさけるためにアルミ蒸着シートで覆った。機器の設置状況の写真を図 4-6（詳細版本編 29 ページ）に、測定時の状況の写真を図 4-7（詳細版本編 29 ページ）に示す。



制御・記録ユニットの写真



加熱・ポンプユニットの写真



加熱・ポンプユニットと地中熱交換井の写真



地中熱交換井と光ファイバーの写真

図 4-6 TRT 装置の測定機器の設置状況の写真



図 4-7 測定時の状況の写真

(3) TRT の加熱時間

TRT は 8 月 31 日朝から加熱を開始したが、加熱のための電力消費が電力供給施設の能力を超えたため、約 5 時間後に停電が発生した。このためポータブル発電機を準備するとともに、一旦温水の循環で温められた地中熱交換井の熱的状态を定常状態に戻すために、9 月 3 日まで作業を停止した。9 月 3 日に光ファイバー温度計による坑内温度測定により定常状態に戻ったことが確認されたため、9 月 3 日の朝から再び TRT の加熱循環を開始した。その後の経過の実績時間は表 4-7 のとおりである。

表 4-7 TRT の加熱時間

地中熱 交換井 坑名	測定日時	イベント	加熱 時間 [h]	温度回復 時間 [h]	平均加熱 出力* ¹ [W]	単位長さ当たり の熱交換量* ² [W/m]
No.1	9月3日9:40	加熱循環 開始	72.0		4,346	43.5
	9月6日9:40	加熱循環 停止		95.0		
	9月10日8:40	測定終了				

* 1 : 図 5-2（詳細版本編 33 ページ）参照。

* 2 : 詳細版本編 4. 4.1(4)（詳細版 21 ページ）に記載の（ii）式の q を参照。

5. 地中熱交換部全体の実証項目の試験における測定結果

5.1 温度検層結果

U字管への水循環の前に測定したU字管内の温度測定結果を表 5-1、図 5-1（詳細版本編 32 ページ）に示す。この温度測定は、サーマルレスポンス試験（TRT）の開始前における地中熱交換井周りの温度平均値を算出することを目的とするものである。

温度測定最深部（測定器ケーブル長）となる深度 98m では 14.8℃（表 5-1 の赤枠）であった。大きな傾向として、深度が深くなるほど温度が下がっている。深度 22m、深度 53m、深度 72m 付近に変曲点が見られる。

なお、この温度測定は、地中熱交換井の深度 98m までしか測定していないが、深度（有効深度）100m の TRT の温度測定は別に行っているので、TRT の計算結果に問題はない。

表 5-1 U字管内温度測定結果

標高(m)	深度(m)	温度(℃)	標高(m)	深度(m)	温度(℃)	標高(m)	深度(m)	温度(℃)
43.0	0.0	22.7	10.0	33.0	16.3	-23.0	66.0	15.1
42.0	1.0	18.9	9.0	34.0	16.3	-24.0	67.0	15.0
41.0	2.0	17.2	8.0	35.0	16.2	-25.0	68.0	15.0
40.0	3.0	17.2	7.0	36.0	16.2	-26.0	69.0	15.0
39.0	4.0	17.7	6.0	37.0	16.1	-27.0	70.0	14.9
38.0	5.0	17.6	5.0	38.0	16.1	-28.0	71.0	14.9
37.0	6.0	17.2	4.0	39.0	16.0	-29.0	72.0	15.0
36.0	7.0	17.2	3.0	40.0	16.0	-30.0	73.0	15.0
35.0	8.0	17.2	2.0	41.0	15.9	-31.0	74.0	15.2
34.0	9.0	17.2	1.0	42.0	15.9	-32.0	75.0	15.3
33.0	10.0	17.1	0.0	43.0	15.9	-33.0	76.0	15.3
32.0	11.0	16.9	-1.0	44.0	15.8	-34.0	77.0	15.4
31.0	12.0	16.8	-2.0	45.0	15.8	-35.0	78.0	15.3
30.0	13.0	16.7	-3.0	46.0	15.8	-36.0	79.0	15.2
29.0	14.0	16.6	-4.0	47.0	15.7	-37.0	80.0	15.1
28.0	15.0	16.6	-5.0	48.0	15.7	-38.0	81.0	15.1
27.0	16.0	16.5	-6.0	49.0	15.7	-39.0	82.0	15.0
26.0	17.0	16.5	-7.0	50.0	15.6	-40.0	83.0	14.9
25.0	18.0	16.3	-8.0	51.0	15.6	-41.0	84.0	14.9
24.0	19.0	16.3	-9.0	52.0	15.5	-42.0	85.0	14.9
23.0	20.0	16.2	-10.0	53.0	15.5	-43.0	86.0	14.9
22.0	21.0	16.2	-11.0	54.0	15.7	-44.0	87.0	14.9
21.0	22.0	16.1	-12.0	55.0	15.6	-45.0	88.0	14.9
20.0	23.0	16.3	-13.0	56.0	15.5	-46.0	89.0	15.0
19.0	24.0	16.3	-14.0	57.0	15.4	-47.0	90.0	15.0
18.0	25.0	16.3	-15.0	58.0	15.4	-48.0	91.0	15.0
17.0	26.0	16.4	-16.0	59.0	15.3	-49.0	92.0	15.0
16.0	27.0	16.3	-17.0	60.0	15.2	-50.0	93.0	15.1
15.0	28.0	16.3	-18.0	61.0	15.2	-51.0	94.0	15.2
14.0	29.0	16.3	-19.0	62.0	15.2	-52.0	95.0	15.1
13.0	30.0	16.3	-20.0	63.0	15.2	-53.0	96.0	15.1
12.0	31.0	16.2	-21.0	64.0	15.2	-54.0	97.0	14.9
11.0	32.0	16.3	-22.0	65.0	15.2	-55.0	98.0	14.8

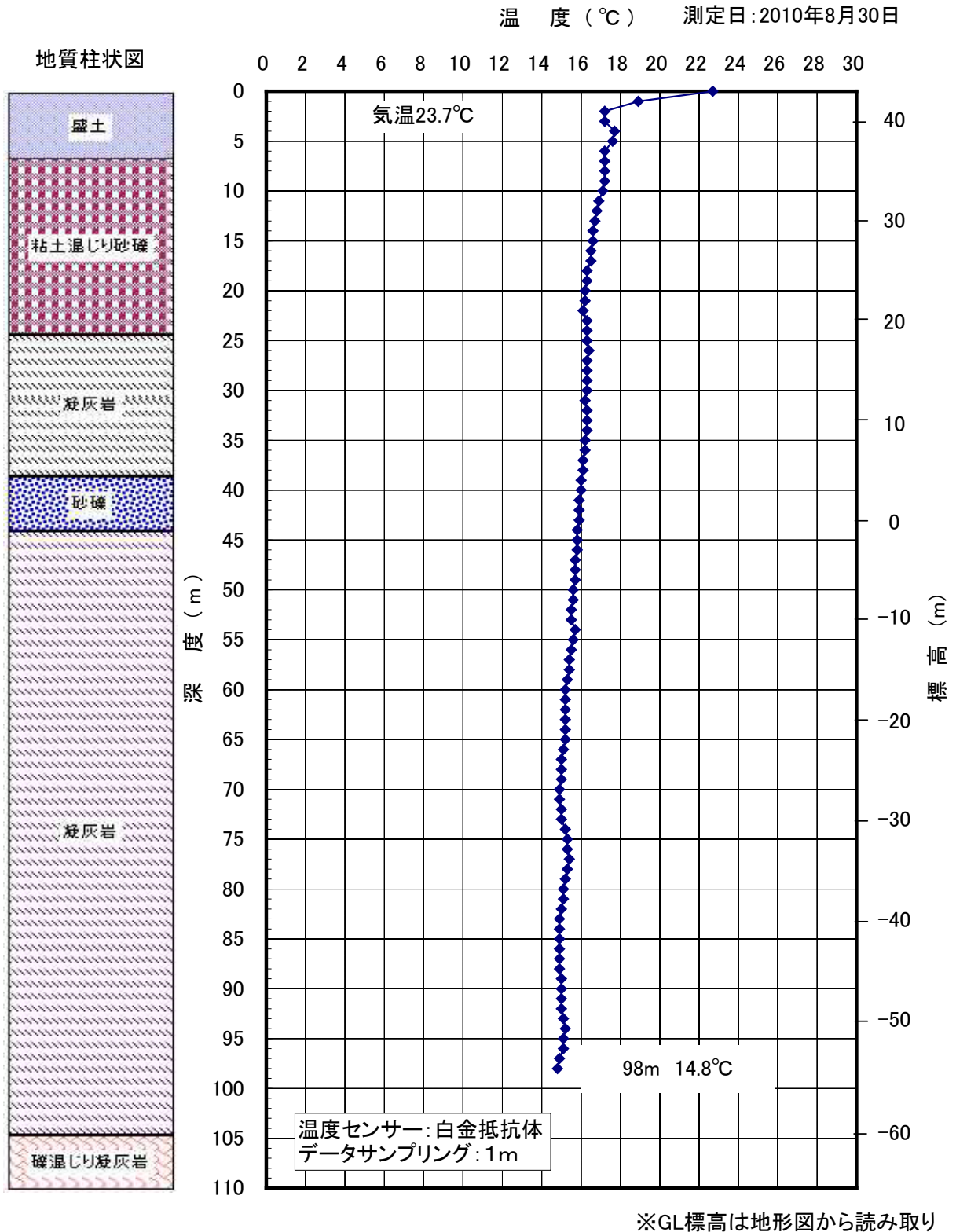


図 5-1 U字管内温度測定結果

5.2 サーマルレスポンス試験（TRT）測定結果

約 5kW での加熱循環を表 4-7（詳細版本編 30 ページ）の時間スケジュールで行い、循環水の温度変化を測定した結果を図 5-2 に示す。図 5-2 には、U字管を通して循環する循環水の往復の温度、外気温、流量、加熱電力、循環水の往復温度差と流量から求め加熱量の時間変化を示している。循環流体は 30wt%のエチレングリコールである。

加熱中の循環水は図に見られるとおり全体として安定して温度上昇しており、温度が定常状態にはなっていない。このことは、試験のための加熱量は約 5kW で足りたことを意味している。そのため、計画段階（詳細版本編 21 ページ参照）では多段階の加熱を計画したが、約 7kW での加熱試験はする必要がないと判断されたため行わないことにした。

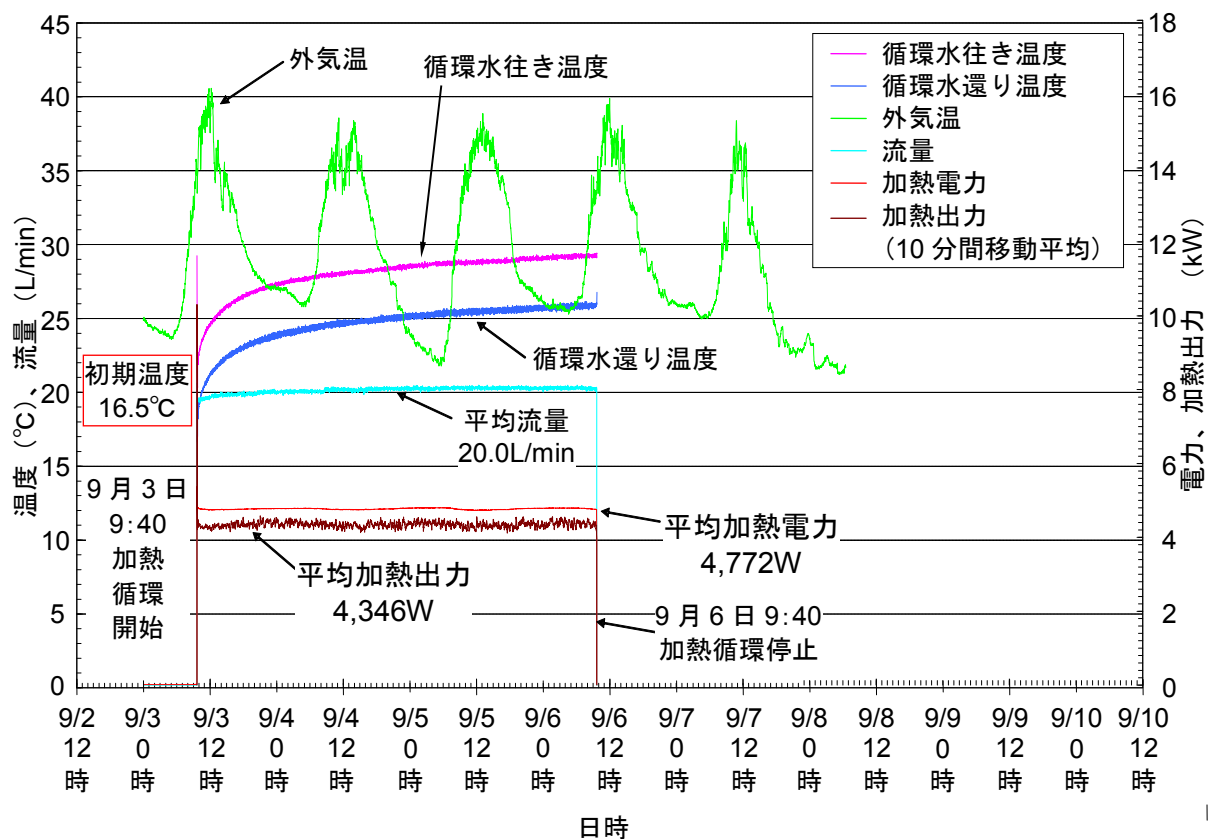


図 5-2 サーマルレスポンス試験状況

5.3 有効熱伝導率と熱抵抗の解析結果

地中熱交換部に関する土壌部分の熱伝導率と熱交換井の熱抵抗を、加熱時の温度上昇データを用いて、作図法によって解析した。ここで求められるのは、地中熱交換部全体に対する見かけの熱伝導率であり、本実証試験では「土壌部分の熱伝導率」（表 1-1、詳細版本編 11 ページ参照。）というが、一般的には「有効熱伝導率」と言われている。以下、実証項目の「土壌部分の熱伝導率」を「有効熱伝導率」と記載する場合がある。

(1) 解析方法

加熱開始から十分に時間経過した後の T_{ave} （循環水の熱交換井入口温度と出口温度の平均温度）は、 t （加熱時間）の自然対数 $\ln(t)$ によって①式のように近似できる。 m は実測データから求められる単回帰式の傾き、 b は単回帰式の切片である。

熱交換井における単位長さ当たりの熱交換量の測定値と、導出した m の値を（②式）に代入して有効熱伝導率 λ を算出する。

$$T_{ave} - T_i = m \cdot \ln(t) + b \quad (①式)$$

$$\lambda = \frac{q}{4\pi \cdot m} \quad (②式)$$

T_{ave}	: 循環水の熱交換井入口温度と出口温度の平均温度 (K)
T_i	: 非加熱循環時の初期温度 (K)
m	: 上記単回帰分析における回帰式の傾き
t	: 時間 (s)
q	: 単位長さ当たりの熱交換量 (W/m)

一方、地中熱交換部の熱抵抗 R の値は、以下のように熱伝導率 λ を③式に代入し、算出する。

$$T_{ave} - T_i = \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r^2} - 0.5772 \right) + qR \quad (③式)$$

r	: 地中熱交換井中心から地中熱交換部表面までの半径 (m)
α	: 地盤の温度伝導率（熱拡散率）(m ² /s)

(2) 解析結果

前述の線源理論に基づきデータを解析し、土壌部分の有効熱伝導率、地中熱交換井の熱抵抗を求めた。

解析に使用したパラメータは表 5-2（詳細版本編 35 ページ）の下に記載した通りである。なお、地中熱交換部はポリエチレン製 U 字管と掘削坑の充填材の珪砂によって構成されている。ここでは掘さく口径までを熱交換部とみなし、それよりも外側を土壌部分とした場合の有効熱伝導率と熱抵抗の計算を行った。土壌部分の密度及び比熱は、図 3-3（詳細版本編 17 ページ）に示すように、地中熱交換部周辺の地質である砂、砂礫、凝灰岩に最も近いと考えられる砂＋粘土の値を使用した。その値は表 5-2 に示す太字の数字である。

表 5-2 土壌部分の熱物性の例*¹

種類	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/(kgK)]	熱伝導率 [W/(mK)]	熱拡散率 [m ² /s]	備考 (含水率)
有機質土	1,340	1,700	0.7	0.30×10^{-6}	41.5%
ローム	1,230	2,800	0.9	0.26×10^{-6}	36.6%
粘土	1,700	1,800	1.2	0.39×10^{-6}	27.7%
砂	1,510	1,100	1.1	0.68×10^{-6}	7.9%
砂+粘土	1,960	1,200	2.1	0.93×10^{-6}	21.6%
粘土質土	1,860	1,680	1.5	0.48×10^{-6}	

Q : 平均加熱出力*² 4,346 (W) (測定値から求めた加熱出力の平均)
H : 地中熱交換井有効深度*³ 100 (m) (測定値)
r : 地中熱交換井有効半径*³ 0.075 (m) (掘さく口径 φ 150mm)
ρ : 土壌部分の代表密度 1,960 (kg/m³) (推定値)
C : 土壌部分の代表比熱 1,200 [J/(kg・K)] (推定値)
T_i : 地中熱交換井の初期温度*² 16.5 (°C) (測定値)

*¹ : 空気調和・衛生工学便覧第 13 版 (編集・発行 : 社団法人空気調和・衛生工学会) より。
*² : 表 4-7 (詳細版本編 30 ページ) 及び図 5-2 (詳細版本編 33 ページ) より。
*³ : 図 3-3 (詳細版本編 17 ページ) 及び図 4-3 (詳細版本編 24 ページ) より。

TRT で得られたデータについて、横軸を加熱経過時間の自然対数、縦軸を循環水温度とした解析グラフを図 5-3 に示す。

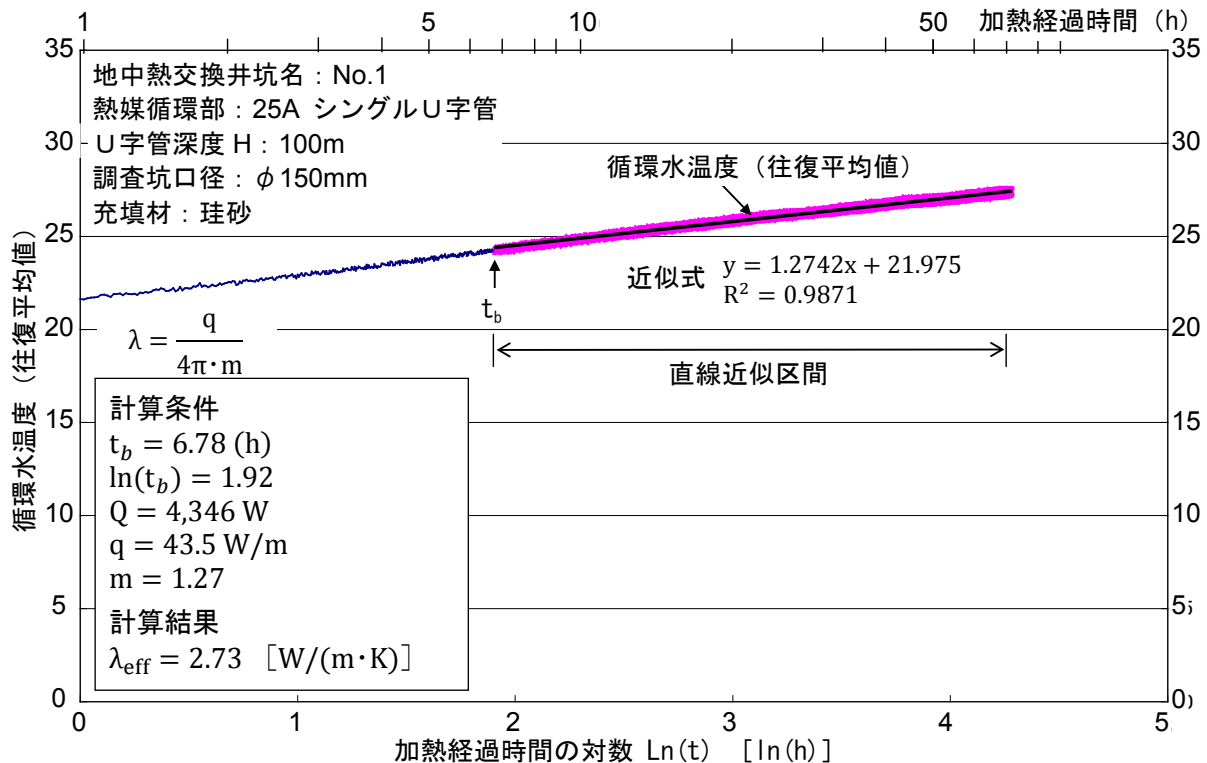


図 5-3 有効熱伝導率の解析グラフ (加熱時データ)

図 5-3 (詳細版本編 35 ページ) の通り、温度上昇データは片対数グラフ上でほぼ直線で近似される。

なお、レスポンスカーブの直線近似を行う場合、レスポンスカーブのどの領域で近似を行うかによって傾き m の値が変化する。線形理論の近似式の直線近似可能な領域の最小加熱循環時間は次式で表される。

$$t_b = \frac{5r^2}{\alpha} \quad (④式)$$

t_b : 最小加熱循環時間 (S)

ここで、熱拡散率 α は、

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (⑤式)$$

で定義される。

そこで、ある仮定した t_b 以降のデータの直線近似から有効熱伝導率 λ を求め、その λ から④式を使って計算される t_b が一致するように収束計算を実施し、 t_b と λ を同時に求めた。

この解析の結果、土壌部分の熱伝導率 (有効熱伝導率) λ を求め、詳細版本編 5. 5.3(1)の③式 (詳細版本編 34 ページ) により熱抵抗 R を求め、表 5-3 に示した。

表 5-3 地中熱交換部全体の实証項目の解析結果 (実証試験結果)

地中熱交換部全体の实証項目	解析結果 (実証試験結果)
a. 熱交換井の熱抵抗 R	0.112 [K/(W/m)]
b. 土壌部分の熱伝導率*1 λ	2.73 [W/(m・K)]

*1 : 実証項目の「土壌部分の熱伝導率」は、一般的には「有効熱伝導率」と言われている。

今回得られた有効熱伝導率は一般的な土壌部分よりも非常に高く、地下水流動による移流の効果により熱交換能力が高くなったと考えられる。熱抵抗は、シングルU字管としては一般的な値といえる。

解析結果によって得られた土壌部分の熱パラメータを用いて、理論計算値と実測値の比較を行い、パラメータの信頼性のマッチング確認を行った。この結果を図 5-4 (詳細版本編 37 ページ) に示す。なお、この図における計算値は循環水の往復温度の平均に相当する。この図の通り、加熱時の実測値と計算値は全域で良く合致している。

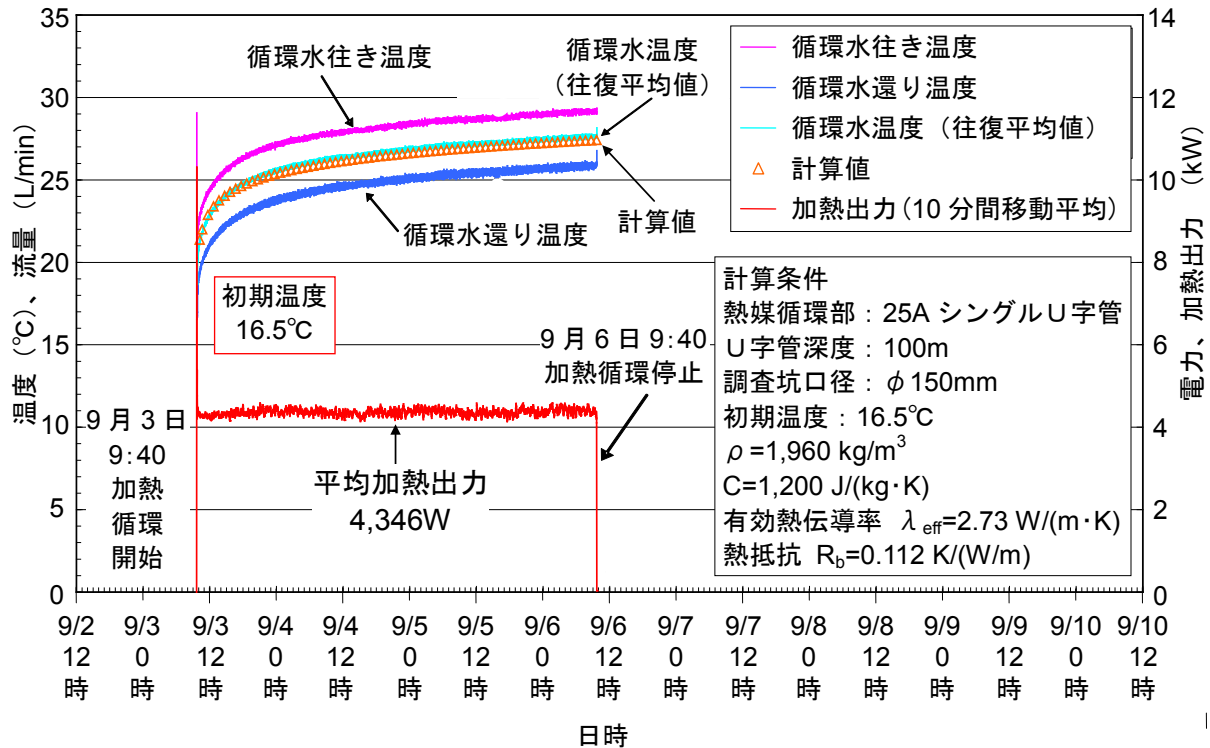


図 5-4 解析結果によるマッチング確認

(3) 光ファイバー温度計による測定で得られた解析結果【参考】

詳細版本編 4. 4.2 (詳細版本編 22 ページ) の方針で記載したように、別途行った光ファイバー温度計による測定については、別添【参考】「株式会社福島地下開発におけるサーマルレスポンス試験報告書 (温度回復時)」(本編詳細版 63～67 ページ) を参照。

別添【参考】に示す報告書では、温度回復時の温度測定の結果は図 1 (詳細版別添 64 ページ) に記載されている。この温度測定結果から解析された有効熱伝導率の層毎の推定値の平均は、別添【参考】に示す報告書の第 12 図 (詳細版別添 67 ページ) によると、 $3.43 \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$ である。

なお、光ファイバー温度計による有効熱伝導率の平均値は、計測解析した各深度の平均値である。本実証試験の TRT で測定される有効熱伝導率は、測定原理上、各深度の平均値ではなく全深度を総合した有効熱伝導率が、一つの値として求められるものである。

また光ファイバー温度計での測定は、深度 1 m 毎に測定されているが、温度計の測定精度は $\pm 1^\circ\text{C}$ である。これに対して本実証試験の TRT の温度測定精度は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ である。これらのことから、光ファイバー温度計により計測解析された有効熱伝導率は、本実証試験の TRT の結果と直接数値や精度等を比較できるものではない。

6. 熱媒循環部（U字管）の実証項目（性能を証明する書類の写しからの転用）

6.1 熱媒循環部の概要

本実証対象技術の熱媒循環部（U字管）の仕様を表 6-1 に示す。

表 6-1 熱媒循環部（U字管）の仕様

製品名及び型式	地中熱交換システム用パイプ「U-ポリパイ」GPU-25A110
製造・販売事業者	株式会社イノアック住環境
材質	高密度ポリエチレン材料（PE-100）
寸法	パイプ外径 34.0mm±0.20mm、厚さ 3.5mm±0.30mm、近似内径 27mm
設置方式	シングルU字管
設置深度	100m まで挿入

6.2 熱媒循環部の実証内容

本実証項目は、性能を証明する書類を確認することで実証を代用する項目である。各実証項目の実証内容は性能を証明する書類の写しとして、熱媒循環部の製造・販売事業者の株式会社イノアック住環境 による地中熱交換システム用パイプ U-ポリパイのカタログ等の関係資料から引用し、表 6-2～表 6-5（詳細版本編 41 ページ）に示す。それらの性能を証明する書類の写しは、詳細版付録（詳細版本編 50～58 ページ）を参照。

なお、実証内容の性能を証明する担保として、確認した内容も記載した。

表 6-2 熱媒循環部の実証項目（その 1）

実証項目	結 果
c. 流量範囲	実証対象技術では呼び径 25A を使用しており、不凍液（エチレングリコール 30%希釈液）を流した場合の適正流量は、下限は 10L/min、上限は 68L/min である。 【適正流量の下限値の考え方】 U 字管内で乱流が確保される流量である。乱流となる条件は、レイノルズ数（Re）>2300 である。レイノルズ数は流速、管の直径、流体の粘度、流体の密度から算出されるので、Re>2300 となる流速から適正流量が求められる。 【適正流量の上限値の考え方】 省エネ性と騒音防止を考慮して決められる。この基準として U-ポリパイの製造事業者から示された流速 2.0m/sec に相当する流量とした。

表 6-3 熱媒循環部の実証項目 (その2)

実証項目	結 果																								
c. 流量範囲 (続き)	また、参考としてU-ポリパイの流量線図を下記に示す。 流量 (L/min) 摩擦損失 (mmAq/m) 呼び径30A 呼び径25A 呼び径20A 0.25m/s, 0.5m/s, 0.75m/s, 1m/s, 1.5m/s, 2m/s, 2.5m/s, 3m/s, 4m/s, 5m/s																								
d. 熱伝導性	熱伝導率： 0.38W/(m・K)																								
e. 耐熱性	『U-ポリパイ』の温度別最大使用圧力は下表の通りである。 <table><tr><th>呼び径 25A</th><th colspan="5">連続安全使用温度範囲</th><th colspan="2">年間 1,500 時間以内</th></tr><tr><th>使用温度</th><th>20℃</th><th>25℃</th><th>30℃</th><th>35℃</th><th>40℃</th><th>45℃</th><th>50℃</th></tr><tr><td>最大使用圧力 (MPa)</td><td>1.51</td><td>1.41</td><td>1.32</td><td>1.21</td><td>1.12</td><td>1.01</td><td>0.92</td></tr></table> ※この製品の連続安全使用温度範囲は-20～40℃である。ただし、50℃迄の温度での運転が上記圧力以下で、且つ年間 1,500 時間以内であれば、50℃迄の使用が可能である。	呼び径 25A	連続安全使用温度範囲					年間 1,500 時間以内		使用温度	20℃	25℃	30℃	35℃	40℃	45℃	50℃	最大使用圧力 (MPa)	1.51	1.41	1.32	1.21	1.12	1.01	0.92
呼び径 25A	連続安全使用温度範囲					年間 1,500 時間以内																			
使用温度	20℃	25℃	30℃	35℃	40℃	45℃	50℃																		
最大使用圧力 (MPa)	1.51	1.41	1.32	1.21	1.12	1.01	0.92																		
f. 脆化温度	脆化温度： < -70℃																								

表 6-4～表 6-5（詳細版本編 41 ページ）に記載の内容は、株式会社イノアック住環境による地中熱交換システム用パイプ U-ポリパイの関係資料であるが、配水用ポリエチレンパイプシステム協会（POLITEC）*¹による「水道配水用ポリエチレン管及び管継手 ご紹介」（平成 12 年 4 月）から引用したものである。その理由としては、国内の水道配水用ポリエチレンパイプは、高密度ポリエチレン材料（PE100）を使用した管であり、U-ポリパイと同材料を使用しているため、この物性値及び性能グラフを使用した。表 6-4～表 6-5 に記載の性能を証明する書類の写しは、詳細版付録 55～58 ページ参照。

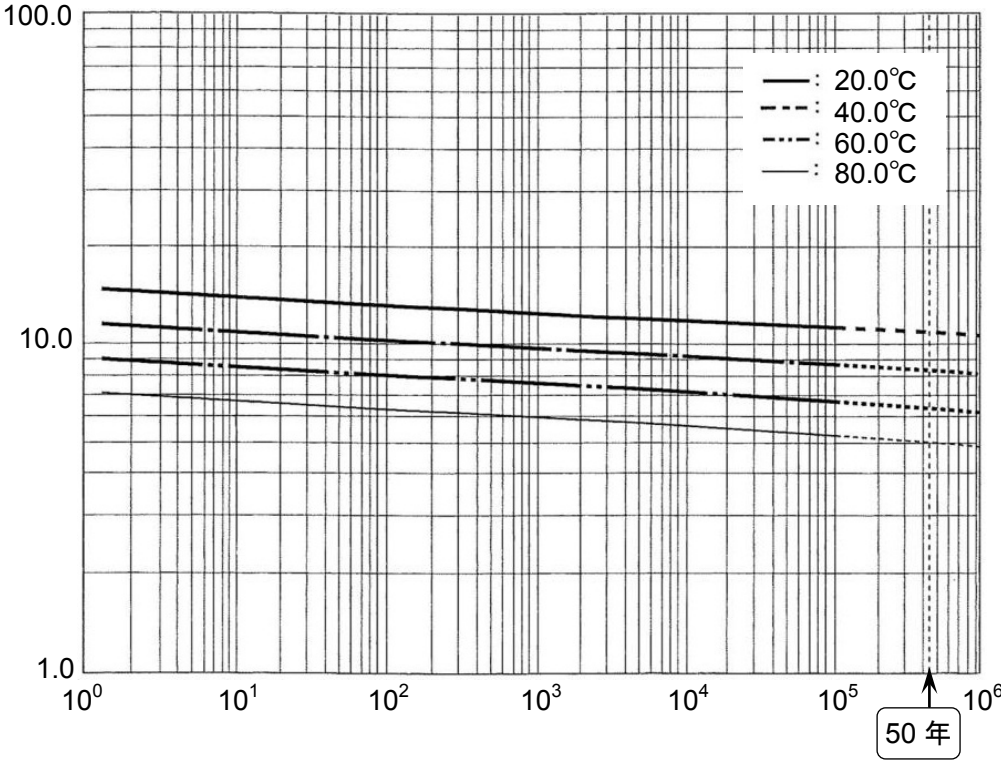
表 6-4 熱媒循環部の実証項目（その 3）

実証項目	結 果					
g. 耐腐食性 (耐薬品性)	耐薬品性の一例（温度 20℃）					
	酸		アルカリ		ガス	
	塩酸 35%	◎	アンモニア水溶液	◎	亜硫酸ガス	◎
	硫酸 65%	◎	苛性ソーダ	◎	炭酸ガス	◎
	硝酸 25%	◎	水酸化カルシウム	◎	一酸化炭素	◎
	塩類					
	重クロム酸カリウム 10%	◎	過マンガン酸カリウム	◎	硫安	◎
	塩化第二鉄 60%	◎	塩化バリウム	◎		
	過酸化水素 30% 90%	◎	炭酸カリウム	◎		
	備考：1. この表は ISO/TR10358* ² に基づいたものである。 2. ◎印は耐薬品性があることを示している。					

* 1：「配水用ポリエチレンパイプシステム協会」（POLITEC）は、「水道用ポリエチレンパイプシステム研究会」と「配水用ポリエチレン管協会」の団体が平成 18 年 4 月に統合した。

* 2：Plastics pipes and fittings-Combined chemical-resistance classification table.

表 6-5 熱媒循環部の実証項目 (その4)

実証項目	結 果
h. 寿命	ISO 9080 に規定される、材料の長期耐久性の試験方法により、管が 20℃で 50 年間の使用に耐えうる周方向応力（フープストレス：管の断面にかかる円周方向の応力）が 10MPa 以上である材料である。  第三世代高密度ポリエチレンのクリープ曲線

なお、表 6-2（詳細版本編 38 ページ）～表 6-5 に示した実証内容の性能の証明の担保として、その製品の製造・販売事業者の品質管理システムを確認した。熱媒循環部の製造企業である株式会社イノアック住環境は、ISO9001:2008 及び ISO140001:2004 を取得していることを確認した。

7. 熱媒の実証項目（性能を証明する書類の写しからの転用）

7.1 熱媒の概要

本実証対象技術に使用した熱媒の概要は表 7-1 のとおりである

表 7-1 熱媒の概要

製品名	KYK ロングライフクーラント（不凍液）
主成分	エチレングリコール 90%
製造・販売事業者	古河薬品工業株式会社
使用の形態	エチレングリコール 30%希釈液

7.2 熱媒の実証内容

本実証項目は、熱媒の性能を証明する書類を確認することで実証を代用する項目である。それら実証項目のうち、腐食性、粘性、比熱の実証項目を示す資料がない。そこで粘性及び比熱については、主成分であるエチレングリコールの製造・販売事業者（丸善石油化学株式会社）作成の技術資料を確認し、その引用を表 7-2～表 7-4（詳細版本編 44 ページ）に参考として示す。また、引火性、毒性、生分解性／残留性の実証項目については、製造・販売事業者の古河薬品工業株式会社による製品安全データシートを確認し、その引用を表 7-5（詳細版本編 45 ページ）に示す。

それらの性能を証明する書類の写しは、詳細版付録 59～62 ページ）を参照。なお、実証内容の性能を証明する担保として、確認した内容も記載した。

表 7-2 熱媒の実証項目（その 1）

実証項目	結 果
i. 腐食性	腐食性に関する資料はない。

表 7-3 熱媒の実証項目 (その2) 【参考】

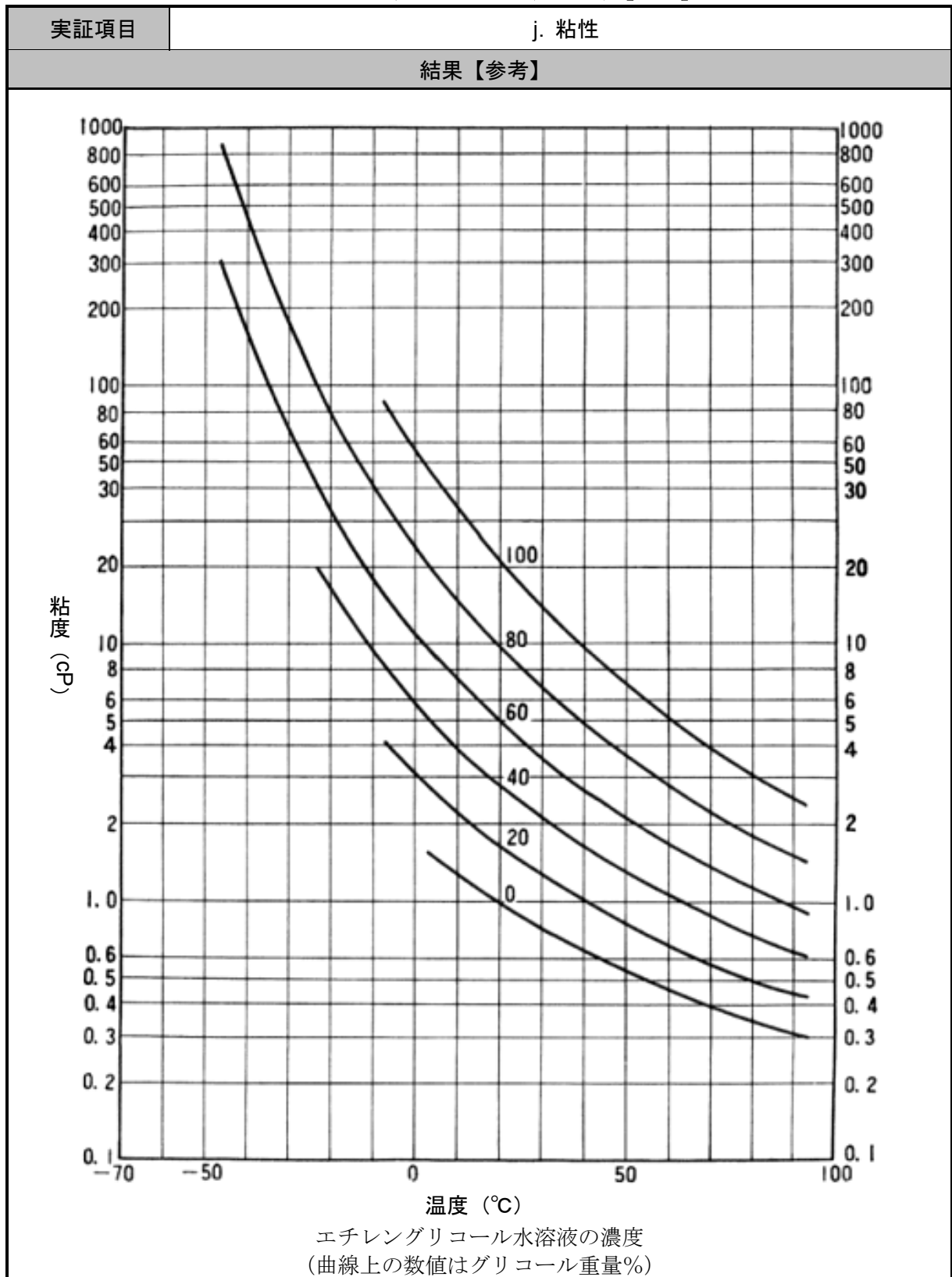


表 7-4 熱媒の実証項目 (その3) 【参考】

実証項目	k. 比熱
結果【参考】	
比熱 (Cal/g·°C) 温度 (°C) エチレングリコール水溶液の比熱 (曲線上の数値はグリコール重量%)	

表 7-5 熱媒の実証項目（その 4）

実証項目	結果																
l. 引火性	引火点：129℃																
m. 毒性	毒性については、GHS 分類^{*1}で示す。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>GHS 分類の危険有害性</th><th>区分</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>急性毒性^{*2}（経口） 経口：ラット LD₅₀^{*3}：4,000～10,200 mg/kg</td><td>区分 5</td></tr> <tr> <td>皮膚腐食性/刺激性</td><td>区分 3</td></tr> <tr> <td>眼に対する重篤な損傷/眼刺激性</td><td>区分 2B</td></tr> <tr> <td>生殖毒性</td><td>区分 1B</td></tr> <tr> <td>特定標的臓器・全身毒性（単回暴露）</td><td>区分 1</td></tr> <tr> <td>特定標的臓器・全身毒性（反復暴露）</td><td>区分 1</td></tr> <tr> <td>水生毒性（急性）</td><td>区分 3</td></tr> </tbody> </table>	GHS 分類の危険有害性	区分	急性毒性 ^{*2} （経口） 経口：ラット LD ₅₀ ^{*3} ：4,000～10,200 mg/kg	区分 5	皮膚腐食性/刺激性	区分 3	眼に対する重篤な損傷/眼刺激性	区分 2B	生殖毒性	区分 1B	特定標的臓器・全身毒性（単回暴露）	区分 1	特定標的臓器・全身毒性（反復暴露）	区分 1	水生毒性（急性）	区分 3
GHS 分類の危険有害性	区分																
急性毒性 ^{*2} （経口） 経口：ラット LD ₅₀ ^{*3} ：4,000～10,200 mg/kg	区分 5																
皮膚腐食性/刺激性	区分 3																
眼に対する重篤な損傷/眼刺激性	区分 2B																
生殖毒性	区分 1B																
特定標的臓器・全身毒性（単回暴露）	区分 1																
特定標的臓器・全身毒性（反復暴露）	区分 1																
水生毒性（急性）	区分 3																
n. 生分解性／残留性	水生環境では、急速分解性があり、かつ生物蓄積性が低いと推定される。（製品安全データシートには、環境影響情報の水生環境慢性有害性として記載。）																

*1：GHS 分類の詳細及び区分についての説明は、環境省ウェブサイト「化学品の分類および表示に関する世界調和システムについて」（<http://www.env.go.jp/chemi/ghs/pdf/all.pdf>）参照。

*2：急性毒性（経皮）については、ラット LD₅₀：10,600 mg/kg で、GHS 分類は区分外である。

*3：半数の動物が死ぬ体重 1kg 当たりの経口摂取量。

なお、表 7-3（詳細版本編 43 ページ）～表 7-5 に示した実証内容の性能の証明の担保として、その製品の製造事業者の品質管理システムを確認した。熱媒の製造・販売事業者である古河薬品工業株式会社は、ISO9001:2008 を取得していることを確認した。また、熱媒の主成分であるエチレングリコールの製造事業者（丸善石油化学株式会社）については、本社（機能化学品本部）、研究所、四日市工場及び千葉工場が、ISO9001:2008 を取得し、四日市工場及び千葉工場が、ISO14001:2004 を取得していることを確認した。

8. 考察

TRTを実施し、土壌部分の熱伝導率、地中熱交換井の熱抵抗を求めた。ここで求められた熱伝導率は、一般的な堆積物の地層としては非常に大きい。その理由としては、地下水流動による移流の効果が大きいと考えられる。

また、引用資料である光ファイバー温度計で測定したU字管内の温度データを用いて熱伝導率の深度分布を推定した結果によれば、深度 20～50m、深度 82m 付近に地下水流動によると思われる高熱伝導率部分があると推定された。このことから、本実証対象技術が設置された地域では、これらの地下水流動がある深度を地中熱交換に用いることが効率的であると考えられる。

9. 実証試験の品質管理・監査

9.1 品質管理システムのあらまし

実証機関（特定非営利活動法人地中熱利用促進協会）が、本実証試験で行った品質管理・監査について記す。

(1) 品質管理の方法

JIS Q 9001 および JIS Q 17025 の趣旨にしたがって品質管理を行った。

(2) 品質管理・監査体制

本実証試験における品質管理・監査体制は、表 9-1 のとおりである。なお、各担当の品質管理及び監査の内容については、表 9-3（詳細版本編 49 ページ）に示す。

表 9-1 実証機関（特定非営利活動法人地中熱利用促進協会）の品質管理・監査体制

品質管理・監査担当	実証機関での役職	氏名
総括責任者	総括責任者	笹田政克
品質管理責任者	実証機関事務局長	宮崎眞一
技術監査	実証機関技術監査	松永烈

9.2 試験とデータの品質管理

本実証対象技術でのサーマルレスポンス試験は、外部委託先（ジオシステム株式会社）に委託して実施したが、公平性・公正性を保ち実証試験を実施するための品質管理は、次のとおりに行った。

本実証試験を外部委託先に委託して実施した理由は、サーマルレスポンス試験を実施するためには、専門の測定設備とそれを扱うオペレーター技師が必要であるが、実証機関では測定設備及びオペレーター技師を準備していないからである。従って、第三者実証を担保する要件を以下のように設定した。

- 1) 外部委託先企業の試験能力や信頼性を確認する。
- 2) 試験にあたっては、実証試験計画書に沿って試験をしているかどうかを確認する。
- 3) 実証試験には実証機関担当者が実証試験実施場所に立ち会い、得られた測定データの確認をすることで、品質の確保をする。

サーマルレスポンス試験を外部委託先（ジオシステム株式会社）に委託しても適切にできると判断した理由は、次のとおりである。

- イ) 外部委託先（ジオシステム株式会社）は、永年地中熱利用システムの設計施工及びサーマルレスポンス試験を実施した実績を有し、サーマルレスポンス試験の測定設備も有している。このため十分な技術力と経験を有している。
- ロ) 外部委託先（ジオシステム株式会社）は、本実証試験において信頼できる地中熱利用技術の資格を有している。同社の概要は次のとおりである。

所在地: 東京都練馬区関町北 3 丁目 39-17 (会社概要: <http://www.geo-system.jp/gaiyo.htm>)

理学博士、技術士(応用理学)、工学博士からなり、一級管工事施工管理技師、IGSHPA 公認地中熱利用システムインストラ*1の資格を有する。地中熱利用の総合的技術力があり、国内の実績が多い。また、サーマルレスポンス試験 (TRT) の測定設備を所有し、TRT の実績が豊富である。

*1 : 国際地中熱ヒートポンプ協会 (IGSHPA : International Ground Source Heat Pump Association) 公認の地中熱交換部のための掘削、U 字管挿入、ヒートポンプシステムの配管等を含めたシステム構築に関する地中熱ヒートポンプの技術資格。

以上から、実証機関が立ち会い、第三者実証を担保する要件 1) ～ 3) 及びイ) ～ ロ) を満たすことにより、実証試験の公平性及び公正性を保つことができると判断した。また、このことについては、環境省及び技術実証委員会の了承を得た。

9.3 実証試験の立会い

実証試験の立会・確認は、平成 22 年 8 月 31 日に行った。実証試験での実証機関（特定非営利活動法人地中熱利用促進協会）の立会・確認者を表 9-2 に示す。

表 9-2 実証試験での実証機関（特定非営利活動法人地中熱利用促進協会）の立会・確認者

	品質管理担当	実証機関での役職	氏名
実証試験の 立会・確認者	品質管理責任者	実証機関事務局長	宮崎眞一
		実証試験担当者	小間憲彦

9.4 品質管理の内容

表 9-1（詳細版本編 47 ページ）に示した各担当による品質管理・監査の内容は表 9-3 にまとめて示した。

表 9-3 品質管理及び監査の内容

対象	品質管理		監査	
	責任者	対策実施内容	担当	監査内容
試験方法の妥当性	品質管理責任者	・実証試験は、実証試験要領の規定に従い計画し実施した。 ・上記のことは、総括責任者、品質管理責任者、実証機関の実証試験担当者などが書類で確認をした。 ・実証試験要領の規定と異なる試験方法を採用した場合は、技術実証委員会等の了承を得た。	実証機関総括責任者及び実証機関技術監査	・実証試験計画書作成時、及び計画と異なる試験を行う際に、監査を行った。
測定機器の精度、測定設備の妥当性	品質管理責任者	・測定設備の精度は実証試験要領に従い実施した。 ・測定設備の精度を実証機関の実証試験担当者が確認した。	実証機関総括責任者及び実証機関技術監査	・実証試験計画書作成時に監査を行った。
データの吸い上げ	品質管理責任者	・サーマルレスポンス試験は、専門技術が必要なため外部委託先の技師が行った。実証機関の実証試験担当者が実証試験実施場所で試験に立ち会い確認した。	実証機関総括責任者	・実証試験の終了に際して、監査を行った。
データの保管	品質管理責任者	・測定データの保管は、実証機関の品質管理責任者が行った。	実証機関総括責任者	・実証試験期間中に適宜、監査を行った。
測定のトレーサビリティ	品質管理責任者	・測定設備や測定方法は明瞭に記録しており、測定のトレーサビリティを確保した。	実証機関総括責任者及び実証機関技術監査	・実証試験計画書作成時に監査を行った。
データの検証	品質管理責任者	・測定データの整理・解析は外部委託先の技師が行い、その結果は実証機関の実証試験担当者が確認した。	実証機関総括責任者	・実証試験の終了に際して、監査を行った。
実証試験報告書の妥当性	品質管理責任者	・実証試験報告書は、実証機関の品質管理責任者、総括責任者、技術実証委員会が確認した。また技術実証委員会の了承を得た。	実証機関総括責任者及び実証機関技術監査	・技術実証委員会の資料及び報告書の原稿に対して、監査を行った。

○付録（性能を証明する書類の写し）

1. 熱媒循環部（U字管）

熱媒循環部の製造・販売事業者である株式会社イノアック住環境による地中熱交換システム用パイプ U-ポリパイのカタログ等の関係資料から該当部分を赤枠で囲い、以下に示す。（詳細版付録 50～58 ページ）

1.1 地中熱交換システム用パイプU - ポリパイのカタログ



◆耐薬品性能

U-ポリパイの耐薬品性の一例(20℃)

酸	アルカリ	ガス
塩酸 35%	○ アンモニア水溶液	○ 亜硫酸ガス
硫酸 60%	○ 苛性ソーダ	○ 炭酸ガス
硝酸 25%	○ 水酸化カルシウム	○ 一酸化炭素
塩 類		
重クロム酸カリウム 10%	○ 過マンガン酸カリウム	○ 炭酸カリウム
塩化第二鉄	○ 塩化バリウム	○ 硫安
過酸化水素 30%	○	

備考: 1. この表はISO/TR10358※1に基づいたものです。
2. ○印は耐薬品性があることを示しています。
※1 Plastics pipes and fitting-Combined chemical-resistance classification table.

U-ポリパイ(高密度ポリエチレン/PE100)の材料物性

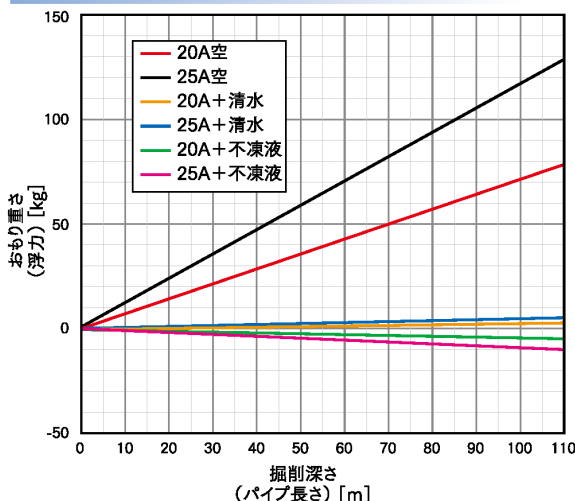
性質	試験方法	単位	値
密度(23℃)	JIS K 7112	kg/m ³	954
引張降伏強度	JIS K 7161	MPa	25
引張破断強度			38
引張破断伸び		%	600以上
引張弾性率(23℃)		MPa	1,300
熱伝導率	DIN 52612	W/m・K	0.38
線膨張係数	JIS K7197	K ⁻¹	1.3×10 ⁻⁴
比熱(23℃)	JIS K7123	kJ/kg・K	1.9

U-ポリパイ挿入時のおもりの選定について

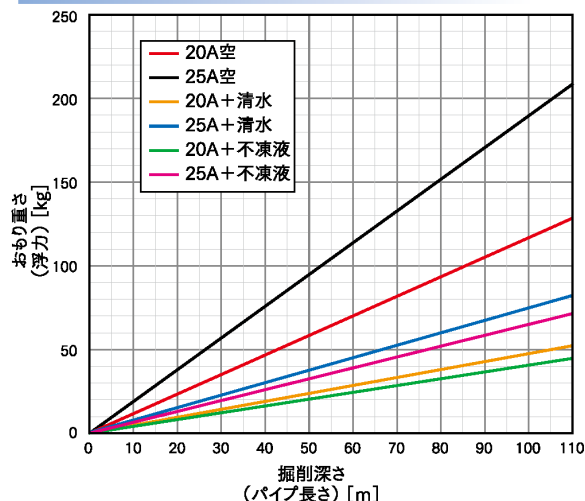
U-ポリパイを掘削坑へ挿入する際の浮力に対するおもりの目安です。
現場条件により異なりますので参考データとして下さい。

計算結果

掘削坑内が清水で満水の場合

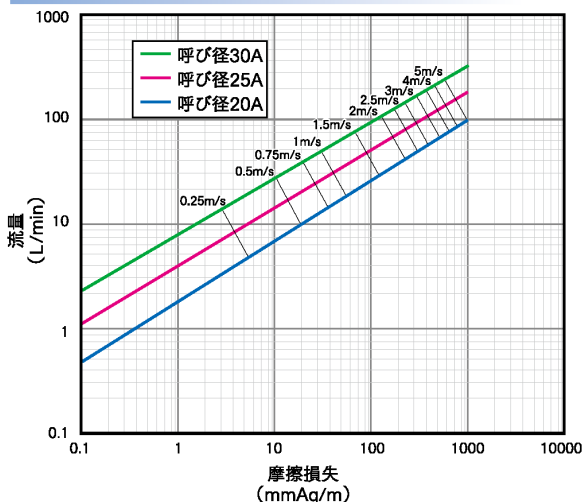


掘削坑内が泥水で満水の場合



計算条件 清水比重1、泥水比重1.4、不凍液比重1.25、パイプ比重0.96

U-ポリパイ(直管部)の流量線図



1.2 地中熱交換システム用パイプU - ポリパイの製品仕様書

1/12

改訂番号	△ 6
制定日	2005年8月
改訂日	2011年3月

JT-A-GUP-20A***-R6

製品仕様書

品 名 地中熱交換システム用パイプ
「U-ポリパイ」

承認	審査	作成
		

株式会社 イノアック住環境

※：本資料の個人名記載部分は、伏せてある。

4/12

1. 適用範囲

この製品仕様書は、地中熱交換システムに使用する管「U-ポリパイ」（以下、製品という。）について適用する。

本仕様書内では製品を構成する管と先端部U字状継手は以下、それぞれ管、継手という。

2. 仕様一覧

製品の仕様を表-1に示す。

△6

表-1 製品仕様

No.	商品記号	商品名	呼び径-長さ
1	GUP-20A***	U-ポリパイ20A-***m巻	20A-***m
2	GUP-20A***-HAN	U-ポリパイ20A-***m巻	20A-***m
3	GUP-25A***	U-ポリパイ25A-***m巻	25A-***m
4	GUP-25A***-HAN	U-ポリパイ25A-***m巻	25A-***m

注1) 上表のNo.2、4は、製品先端部分のU字継手の融着が反対方向になったものをいう。（下図参照）

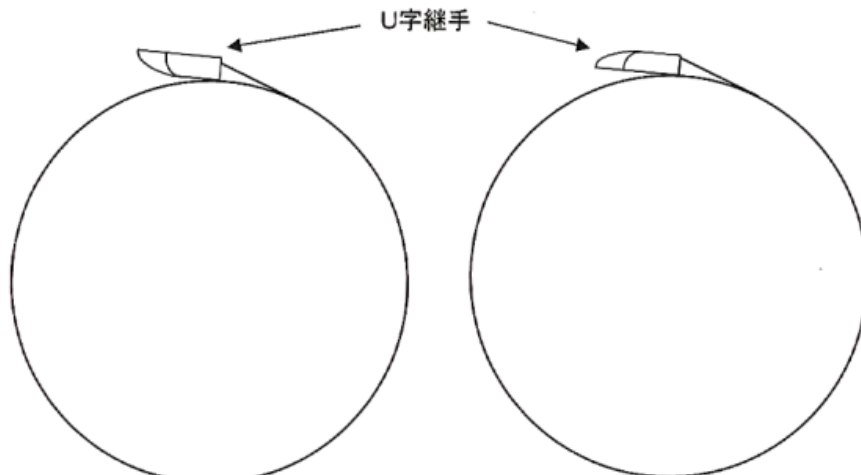


図-1 継手順方向品

図-2 継手反対方向品

3. 使用用途

この製品の連続安全使用温度範囲は-20～40℃です。ただし、50℃迄の温度での運転が、表-3の圧力以下で、かつ、年間1500時間以内であれば、50℃迄の使用が可能です。

△6

表-2 最大使用圧力

単位 MPa

使用温度 呼び径	20℃	25℃	30℃	35℃	40℃
20A	1.65	1.54	1.44	1.32	1.22
25A	1.51	1.41	1.32	1.21	1.12

表-3 最大使用圧力 単位 MPa

使用温度 呼び径	45℃	50℃
20A	1.11	1.01
25A	1.01	0.92

1.3 地中熱交換システム用パイプU - ポリパイの脆化温度

2011年1月
株式会社イノアック住環境



U-ポリパイの脆化温度について

U-ポリパイの脆化温度は下記のとおりです。

性 質	単 位	試験方法	物性値
脆化温度	℃	JIS K 7216	< -70

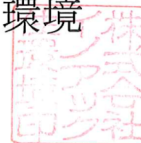
以上

1.4 地中熱交換システム用パイプU - ポリパイの性能についての品質表示

株式会社イノアック住環境による関係資料のうち、本資料（詳細版付録 55～58 ページ）は、配水用ポリエチレンパイプシステム協会（POLITEC）*1による「水道配水用ポリエチレン管及び管継手 ご紹介」（平成 12 年 4 月）から引用したものである。その理由としては、国内の水道配水用ポリエチレンパイプは、高密度ポリエチレン材料（PE100）を使用した管であり、U-ポリパイと同材料を使用しているため、この物性値及び性能グラフを使用した。

地中熱交換パイプ『U-ポリパイ』の性能 についての品質表示

株式会社イノアック住環境



*1：「配水用ポリエチレンパイプシステム協会」（POLITEC）は、「水道用ポリエチレンパイプシステム研究会」と「配水用ポリエチレン管協会」の団体が平成 18 年 4 月に統合した。

3

耐食性

- ①酸性土壌、腐食性土壌、塩害地域で優れた耐食性を維持します。
②電食の心配がありません。

耐薬品性の一例 (温度20℃)

酸	アルカリ	ガ ス
塩酸 35% ◎	アンモニア水溶液 ◎	亜硫酸ガス ◎
硫酸 60% ◎	苛性ソーダ ◎	炭酸ガス ◎
硝酸 25% ◎	水酸化カルシウム ◎	一酸化炭素 ◎
塩類		
重合クロム酸カリウム 10% ◎	過マンガン酸カリウム ◎	炭酸カリウム ◎
塩化第二鉄 ◎	塩化バリウム ◎	硫安 ◎
過酸化水素 30%、90% ◎		

備考1.この表はISO/TR10358*1に基づいたものです。
2.◎印は耐薬品性があることを示しています。

4

衛生性

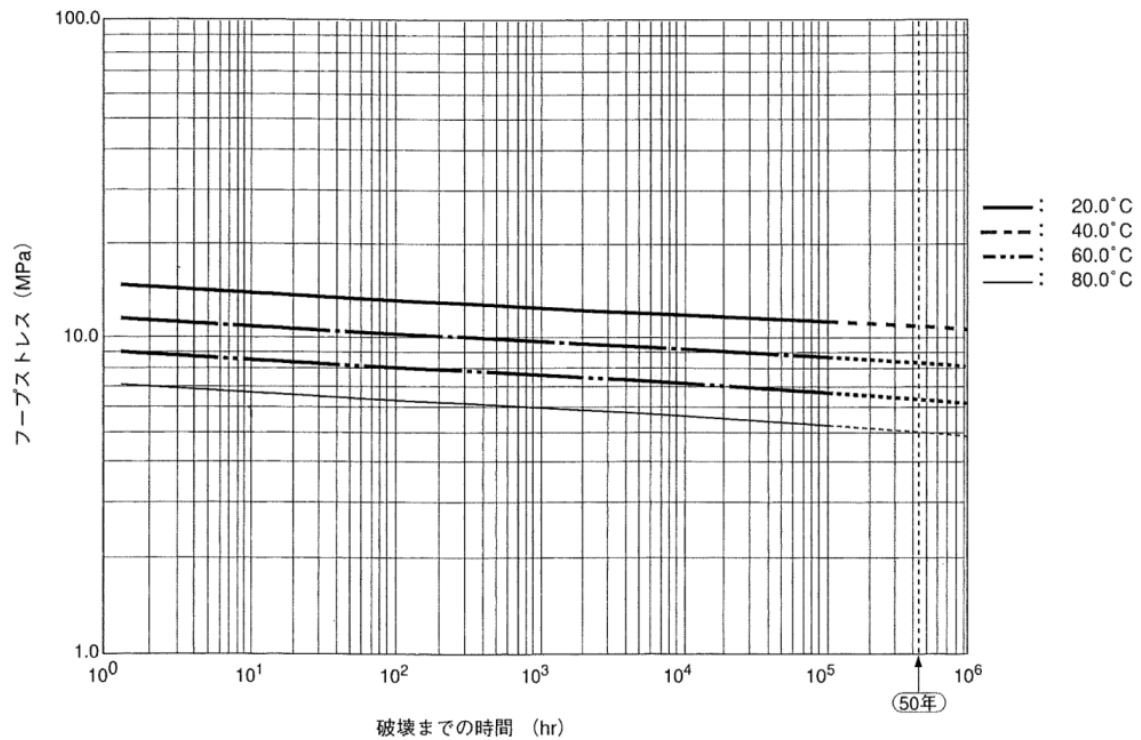
JWWA K 144(水道配水用ポリエチレン管)や厚生省令第15号*2及び厚生省告示第45号*3の浸出(溶出)試験などで、水道管として衛生的であることを確認しています。

検査項目の一例

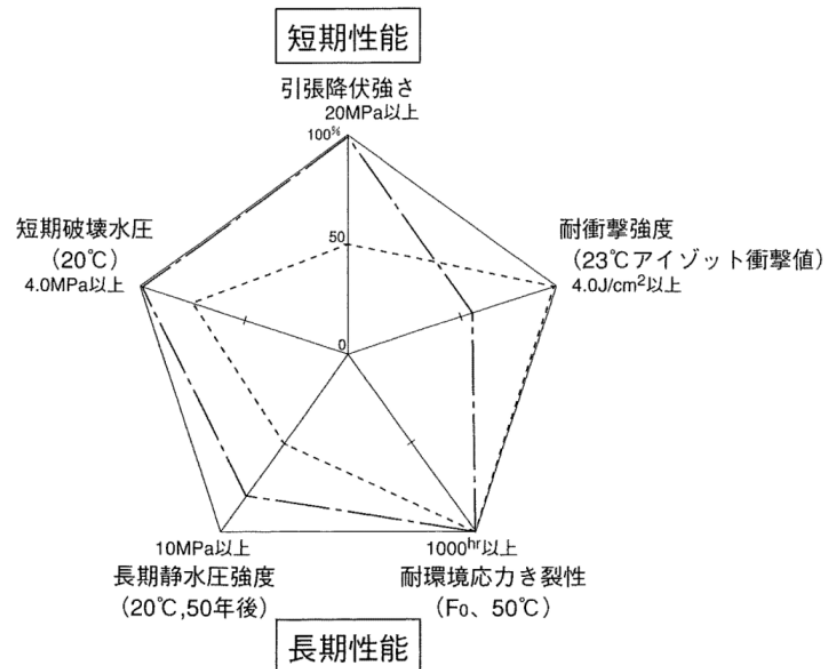
濁度	カドミウム
色度	鉛
過マンガン酸カリウム消費量	その他重金属
残留塩素の減量	
臭気	
味	

- *1 Plastics pipes and fittings-Combined chemical-resistance classification table.
*2 水道施設の技術的基準を定める省令
*3 資機材等の材質に関する試験

第三世代高密度ポリエチレンのクリープ曲線



水道用ポリエチレン管の主要性能の比較



水道配水用ポリエチレン管及び管継手
ご紹介

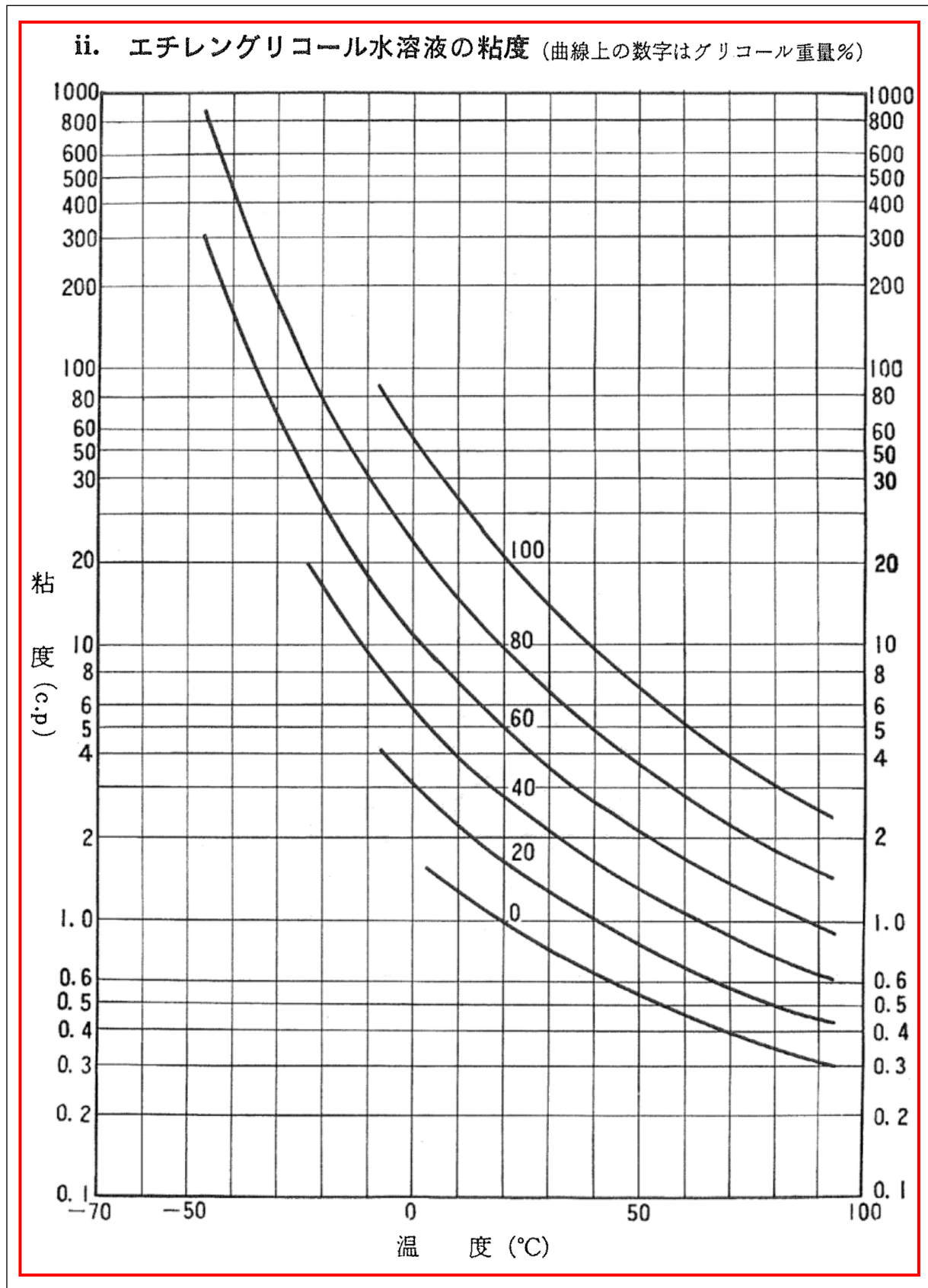
初版発行 平成 8年11月
改訂1版 平成 9年 6月
改訂2版 平成10年 2月
改訂3版 平成11年 9月
改訂4版 平成12年 4月
編集発行 水道用ポリエチレンパイプシステム研究会

発行所 水道用ポリエチレンパイプシステム研究会*1
〒104 東京都中央区京橋 3-7-1
(第一生命相互館7階)
電話 03 (3561) 5037 FAX 03 (3561) 5038
Home page <http://www.politec.gr.jp/>

*1：「配水用ポリエチレンパイプシステム協会」（POLITEC）は、「水道用ポリエチレンパイプシステム研究会」と「配水用ポリエチレン管協会」の団体が平成 18 年 4 月に統合した。

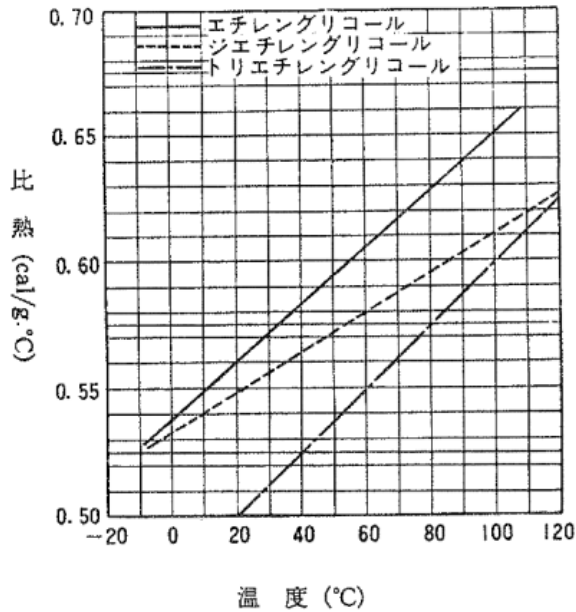
2. 熱媒（不凍液（ブライン））

熱媒の主成分であるエチレングリコールの製造事業者（丸善石油化学株式会社）作成の技術資料から該当部分を赤枠で囲い、以下に示す。（詳細版付録 59～60 ページ）



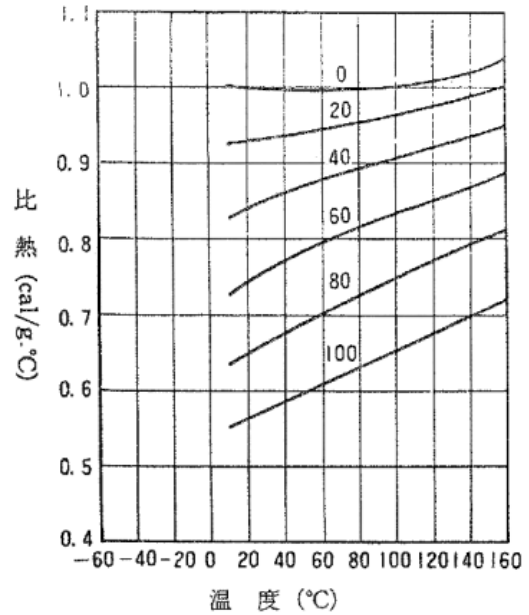
4. 1. 7. 比 熱

i. 無水グリコールの比熱



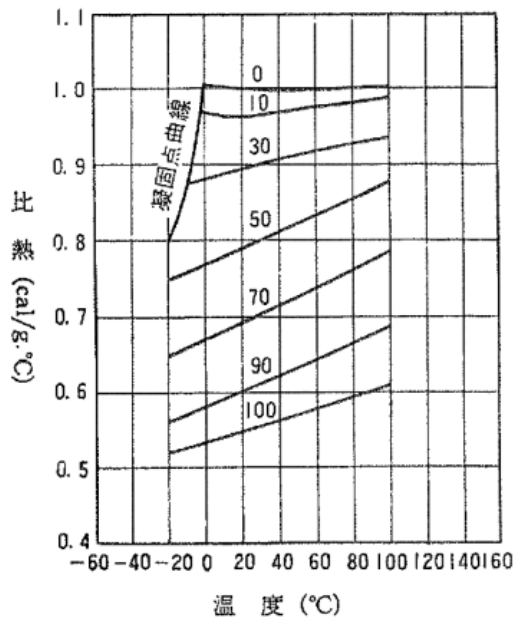
ii. エチレングリコール水溶液の比熱

(曲線上の数字はグリコール重量%)



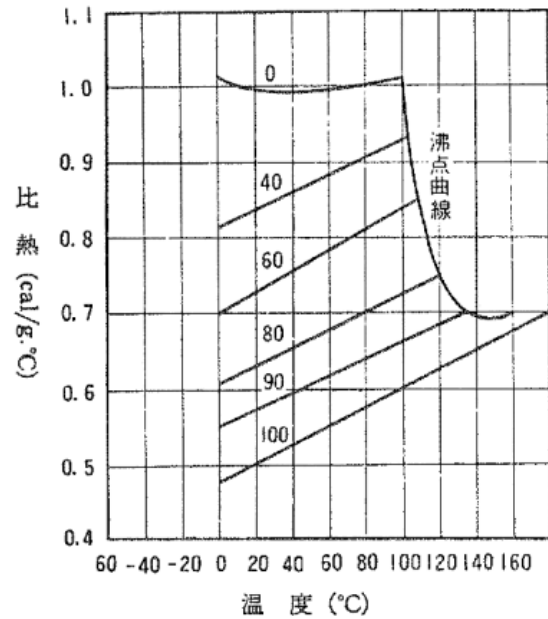
iii. ジエチレングリコール水溶液の比熱

(曲線上の数字はグリコール重量%)



iv. トリエチレングリコール水溶液の比熱

(曲線上の数字はグリコール重量%)



熱媒の製造・販売事業者（古河薬品工業株式会社）による製品安全データシートから該当部分を赤枠で囲い、以下に示す。（付録 61～62 ページ）

製品安全データシート		整理No.: SDS-52004-05	
製品名: KYK ロングライフクーラント(JIS)			
1. 製品等及び会社情報			
1.1 製品の特長			
・化学物質等の名称:	ロングライフクーラント		
・製品分類:	不凍液		
・主な用途:	液冷式内燃機関用冷却液		
1.2 会社情報			
・会社名:	古河薬品工業株式会社		
・住所:	〒349-1203 埼玉県加須市柏戸740		
・担当部署:	技術部		
・電話番号:	0280-62-1011		
・FAX番号:	0280-62-0650		
・作成日:	2010年4月1日		
9. 物理的及び化学的性質			
・形状:	液体	・色:	赤色又は緑色
・発火点:	700℃	・密度:	1.129 g/cm ³ (20℃)
・沸点:	165℃	・溶解度:	水に対する溶解性 易溶
・蒸気圧:	13 Pa(EG)	・爆発限界:	下限: 3.2vol% 上限: 15.3vol% (EG)
・pH値:	8.3	・引火点:	129℃
2. 危険有害性の要約			
2.1 GHS分類			
・急性毒性(経口):	区分5		
・皮膚腐食性/刺激性:	区分3		
・眼に対する重篤な損傷/眼刺激性:	区分2B		
・生殖毒性:	区分1B		
・特定標的臓器・全身毒性(単回暴露):	区分1		
・特定標的臓器・全身毒性(反復暴露):	区分1		
・水生毒性(急性):	区分3		
2.2 GHSラベル要素			
・シンボル:			
・注意喚起語:	危険		
・危険有害性情報:	飲み込むと有害のおそれ 軽度の皮膚刺激 眼刺激 生殖能又は胎児への悪影響のおそれ 中枢神経系・腎臓・心臓・呼吸器の障害 長期又は反復暴露による中枢神経系・呼吸器・心臓の障害 水生生物に有害		

11. 有害性情報(人についての症例、疫学的情報を含む)

<エチレングリコール> ※NITEの分類結果

・急性毒性:	経口:ラットLD ₅₀ : 4,000~10,200 mg/kg 区分5 経皮:ラットLD ₅₀ : 10,600 mg/kg 区分外
・皮膚腐食性/刺激性:	区分3
・眼に対する重篤な損傷性/眼刺激性:	ウサギを用いた眼刺激性試験結果の「エチレングリコール（液体又は蒸気）のウサギの眼への短時間ばく露は角膜の永久傷害を伴わない結膜への刺激をもたらす」37) から区分2Bとした。
・呼吸器感受性:	データなし
・皮膚感受性:	データ不足のため分類できない
・生殖細胞変異原性:	ラットの優性致死試験で陰性、生殖細胞 in vivo 変異原性試験なし、体細胞 in vivo 変異原性試験(染色体異常試験/小核試験)で陰性である 37) ことから区分外とした。
・発がん性:	ACGIHでA4 10) に分類されていることから、区分外とした。
・生殖毒性:	マウスの連続交配試験、ラットの催奇形性試験において、母毒性のない用量で児動物への影響(奇形、骨化遅延、未骨化)がみられている 37) ことから区分1Bとした。
・標的臓器/全身毒性(単回暴露):	ヒトについて、「誤飲後34日以降に意識障害、痙攣、昏迷状態がみられ、血液科学的検査では尿素窒素、クレアチニン及び尿酸が増加、尿検査で蛋白尿及び血尿がみられ、腎障害が認められている。腎生検で尿細管に組織学的変化がみられている。また、肺の軽度なうっ血がみられた」「急性影響は4段階に分けられる。まずばく露後30分から12時間後に起こる中枢神経系への作用、次にばく露12-36 時間後に起こる心肺系への影響、さらに第1 及び第2段階で死亡(エチレングリコール)を免れた者にみられる腎臓障害、そして中枢神経系の変性である。」22) との記載があることから、標的臓器は中枢神経系、腎臓、心臓、呼吸器と考えられた。以上より、分類は区分1(中枢神経系、腎臓、心臓、呼吸器)とした。
・標的臓器/全身毒性(反復暴露):	ヒトについて、「意識消失、眼球振とう」「軽い頭痛と腰痛、上気道の刺激」33) との記載があり、実験動物については「肺及び心臓に炎症性的変化」33) との記載があることから、標的臓器は中枢神経系、呼吸器、心臓と考えた。なお、実験動物に対する影響は区分1のガイダンス値の範囲でみられた。以上より、分類は区分1(中枢神経系、呼吸器、心臓)とした。
・吸引性呼吸器有害性:	データなし

12. 環境影響情報

<エチレングリコール> ※NITEの分類結果

・水生環境急性有害性:	魚類(ニジマス)の96時間LC50 =47000µg/L 33) から、区分3とした。
・水生環境慢性有害性:	急速分解性があり(BODによる分解度:90% 51))、かつ生物蓄積性が低いと推定される(log Pow = -1.36 55))ことから、区分外とした。

○別添【参考】

本報告書は、5. 5.3(3)に記載の光ファイバー温度計による測定についての報告書の一部抜粋（図2から図9までは省略）を詳細版別添63～67ページのページに示す。

株式会社福島地下開発における サーマルレスポンス試験報告書 (温度回復時)

平成22年9月

九州大学大学院工学研究院

藤井 光

駒庭 義人

TRT において得た地中温度および循環水温度の測定値を用いて、解析により地層の熱伝導率の分布を推定した。解析には、円筒熱源関数に基づく複数層解析解モデルを用いて、地中温度および循環水温度の測定値と解析値が一致するまで反復計算を行った。なお、複数層モデルでは、タイムステップを 30 分として、層厚 3m の 33 層モデルにおけるシミュレーションを行った。

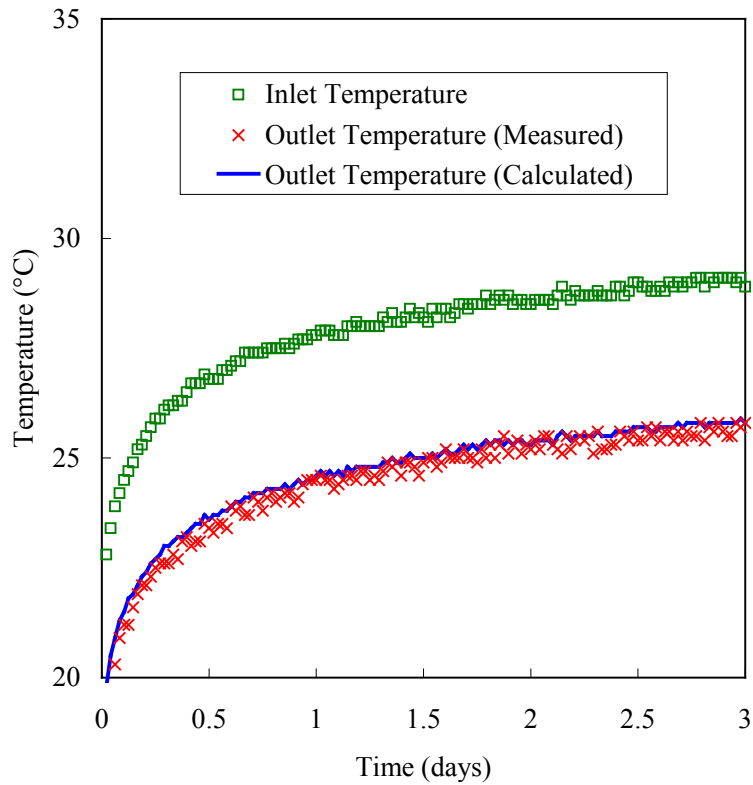
第 10 図に、TRT の加熱循環時の熱交換井出口水温のマッチング結果を示す。計算値は光ファイバーでの実測値よりも全体的に 0.5°C 程高い温度を示すが、温度変化の傾向には良好な一致が見られた。次に、第 11 図に循環停止 1 日後および 2 日後における地中温度分布の実測値と計算値を示す。計算値と光ファイバー温度計により測定された地中温度の深度方向の分布傾向は良く一致しており、その差はほぼ 1°C 以内である。ただし、深度 70m 付近では計算値の温度と実測値との差がやや大きい。

複数層モデルより得られた熱伝導率の深度分布を地質柱状図と共に第 12 図に示す。循環終了時に速やかな温度回復が見られた深度 25m および深度 82m 付近の熱伝導率は、 $5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ を超える高い値を示し、一般的な堆積物の地層では考えられないほど大きい熱伝導率であった。このことは、熱交換が地下水による移流の効果が大きいためと考えられる。一方で、温度回復が相対的に緩やかであった深度 70m 付近の熱伝導率は、相対的に小さな値を示した。第 12 図に示した熱伝導率分布の推定結果は、循環停止後の温度回復の傾向から予測される地層ごとの熱特性の違いをと整合的である。

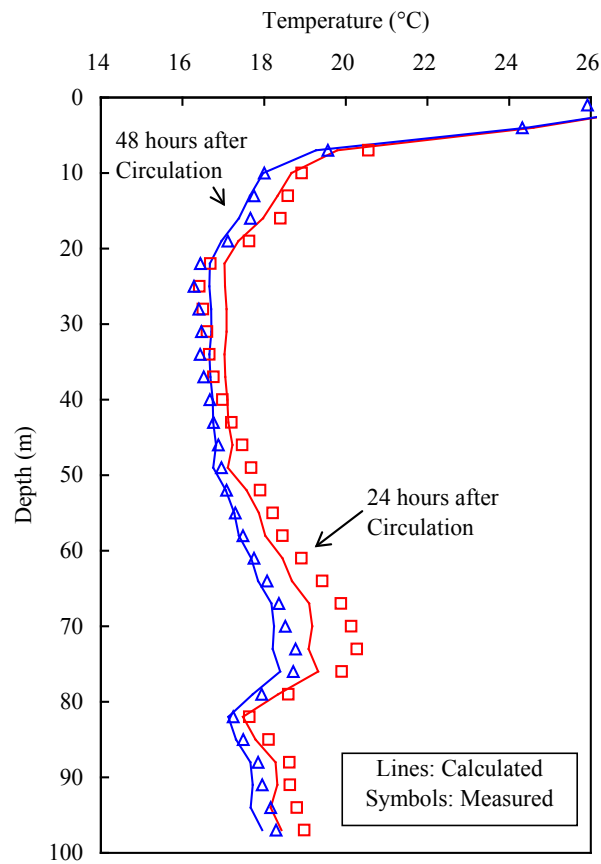
第 13 図に解析で求めた層ごとの熱交換量を示す。循環終了時の温度回復が顕著であった深度 25m および深度 82m 付近の熱交換量は $60\text{ W}/\text{m}$ 程度あり、これらの深度域が高い熱交換能力を有していること示唆している。また、解析から得られた熱交換量は、測定された温度回復の速さおよび推定された熱伝導率の高低の傾向とも調和的である。

先に第 12 図で示した深度ごとの熱伝導率の平均値は、 $3.43\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ となり、加熱循環時の循環水温から作図法により算出した有効熱伝導率 $2.73\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ より約 25% 大きい。これは光ファイバー温度計の精度 ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) に起因すると考えられる。さらに、使用したモデルでは、地層中の熱移動は熱伝導のみを考慮している。そのため、地下水流れが速く熱伝導よりも移流による熱移動が優位な領域と熱伝導が支配的な領域が積層している本地域のような地質条件を完全には捉えられてはいないことも熱伝導率に差が生じた原因と考えられる。なお、上述のモデルの性質は、第 10 図に示した熱交換井出口水温および第 11 図に示した地中温度分布の実測値と計算値の差の要因でもあると考えられる。

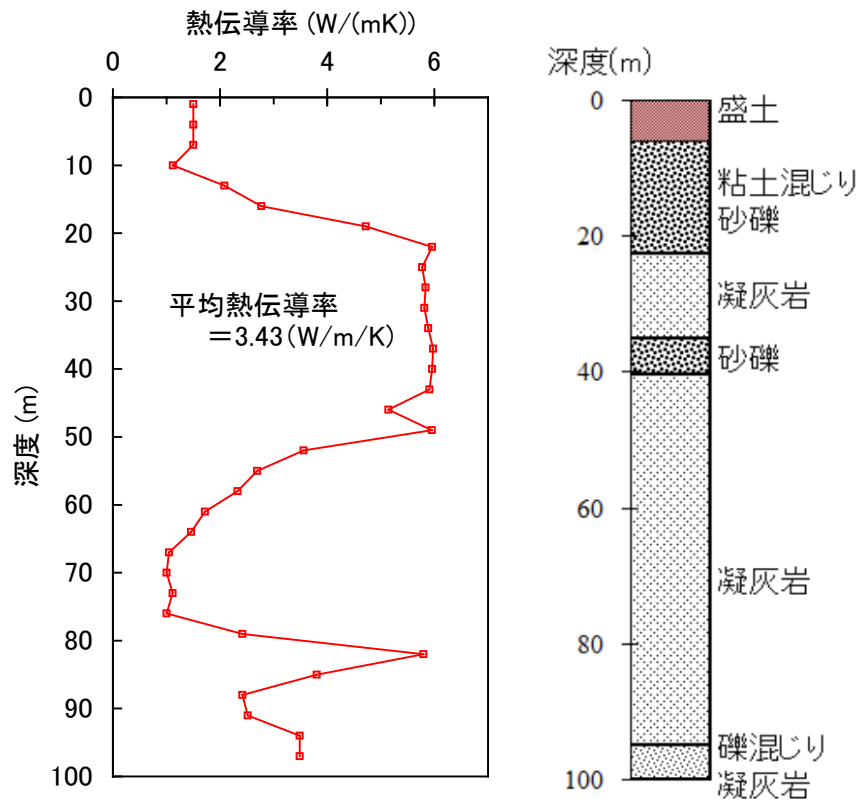
以上より、本地域では、深度 25m および深度 82m 付近の熱交換能力が優れていることが明らかであり、深度 50m 程度の地中熱交換井とすれば、コストパフォーマンスの優れた地中熱利用システムとすることができると考えられる。



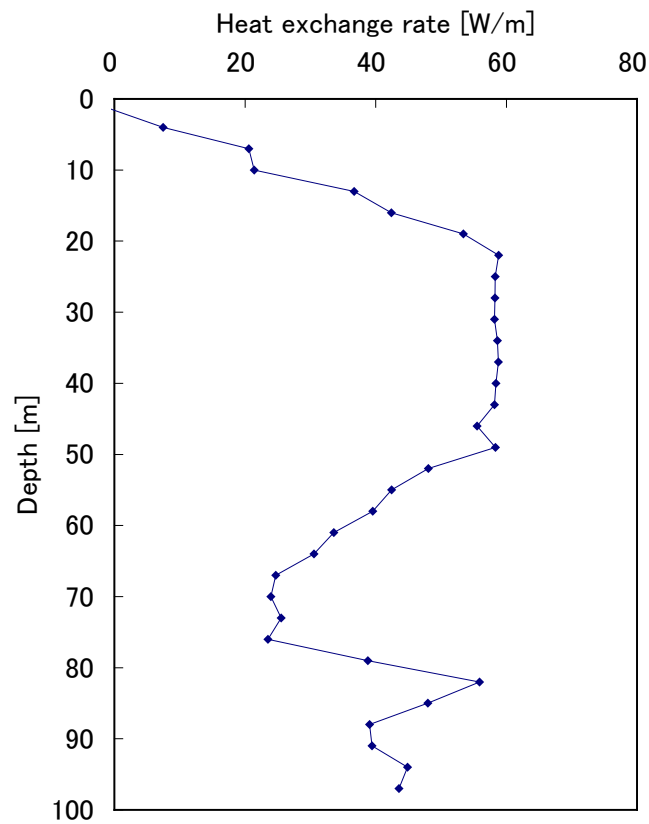
第 10 図 加熱循環中の熱交換井出口水温の測定値と計算値のマッチング結果



第 11 図 加熱停止後の熱交換井内温度の測定値と計算値のマッチング結果



第 12 図 T R T解析において得られた地層の熱伝導率分布と地質柱状図



第 13 図 T R T解析において得られた地層ごとの熱交換量