

IEA ECES (蓄熱実施協定) ANNEX21(TRT)準拠

ボアホール型地中熱交換器に対する
加熱法による熱応答試験の標準試験方法
Ver.2.0

*Standard Procedure
of
Standard TRT
(Thermal Response Test)
*Ver.2.0**

2011.8.29

(財)ヒートポンプ・蓄熱センター
「地下熱利用とヒートポンプシステム研究会」編

作成：主査 長野克則(北海道大学 教授)

Prepared by Katsunori Nagano Prof. of Hokkaido University

1. 標準熱応答試験 (TRT) の目的

地中に埋設されたボアホール型地中熱交換器 (BHEX) を利用する地中熱利用システムにおいて、地中熱交換器周囲の地盤 (地中) の

- ・ 平均有効熱伝導率 (λ)
- ・ 地中熱交換器 (GHEX) の熱抵抗 (R_b)

を現場に設置された地中熱交換器を用いて熱的試験方法により推定することである。

同時に、基礎データとして、

- ・ 温度分布、および平均温度、不易層温度

を現場に設置された地中熱交換器を用いて実測する。

2. ボアホール型地中熱交換器に対する加熱法による熱応答試験 (TRT) の概要

地中に埋設されたボアホール型地中熱交換器 (BHEX) に実使用時と同等程度の一定の熱負荷を与えて、実使用時と同等程度の一定流量を保ちながら熱媒体を循環させる。

このときの、BHEX の出入口における熱媒体の平均温度の時間変化から、地中熱交換器周囲の地盤 (地中) の平均有効熱伝導率 (λ_s) および、BHEX の熱抵抗 (R_b) を推定するものである。

3. 測定装置

熱応答試験(TRT)の測定装置は以下の性能や精度を持つ部材で構成される。

- (1) 電気ヒーター:
実使用時と同等程度の一定の熱負荷を掛けられる発熱量を有していること。
たとえば、GHEX がボアホールタイプで長さ 1m あたりの熱負荷を 40W とすると、100m 長さでは 4kW となる。できれば、ヒーターの熱出力が可変できるものが望ましい。また、ヒーターには、2つ以上の安全装置を設ける。一つは、最高温度以上になった場合に電流を切り切るサーモスタット、二つ目はある温度以上になったときに、それ自体が溶融して電流を遮断する温度ヒューズを設ける。
- (2) 循環ポンプ:
実使用時と同等程度の流量を循環できるだけの揚程を有していること。また、効率がよく消費電力が小さく、流量安定性の高いものを使用すること。
流量調整できるバルブかインバーターを有していること。
- (3) 測定装置:
 - 1) 流量計:
高精度な流量計。具体的には、測定精度 $\pm 0.5\%$ 以下の流量計。
一般的には、工業用の電磁流量計を用いる。
 - 2) 温度センサー:
出入口温度測定用には A 級白金測温抵抗体(Pt100)を用いる。2 本の Pt100 センサーは、関わる温度範囲において相互の温度指示値が $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以下に校正を行ったものを用いる。同時に、バックデータとして、外気温を測定しておく。
 - 3) データロガー:
電氣的に高い耐ノイズ性をもっているもの。測定サンプリング時間である 1 分において十分な精度を保てるもの。Pt100 が測定できるもの。流量計からパルス信号が測定できるものとする。
 - 4) 電力計:
バックデータとして、ヒーターの消費電力を測定しておいた方が望ましい。また、ポンプの消費量も、一度は測定して記録しておいた方がよい。

(4) 配管具材:

1) 断熱配管:

外界からの熱影響を受けないように十分に断熱された可とう管を用いて配管する。経路は出来るだけ短くするように心掛ける。断熱材は透水性のない発泡樹脂系のものを用いて、できれば筒状のものを被せて使用するのがよい。厚さは 40 mm 以上とし、屋外部には日射を反射するような保護被服をつける。

2) 膨張タンク:

密閉配管とするため、地中熱交換器、配管、試験機内の保水量と温度変化幅に対して、適正な大きさをもつもの。

3) 空気抜き弁

配管頂部に空気抜き弁を設ける。

4) 空気分離器

地中熱交換器管内の微細な泡状の空気を分離するために、配管経路中に空気分離器を設けるのが望ましい。

5) 圧力計

密閉配管とするため、加圧状態を把握するのに圧力計を設ける。

6) ストレーナー

ポンプの吸い込み側の配管には、ストレーナーを設置する

7) 流量調節弁

実使用時と同等程度の流量に調節するためのバルブを配管経路に設ける

(5) 配線具材:

1) 配線:

ヒーター、ポンプへの配線は、使用時の電流に対して十分なものを用いる。このとき、ヒーターへの供給電力は通常単相 200V であるが、ポンプへの供給電力は、単相 200V や単相 100V とケースバイケースであるので、注意が必要である。

2) ブレーカー:

ヒーター、ポンプへの配線のもとには、必ずブレーカーを設ける。

3) ヒーターの過熱防止

ヒーターの過熱防止のために、過熱防止装置、温度ヒューズなどの安全装置を設ける。

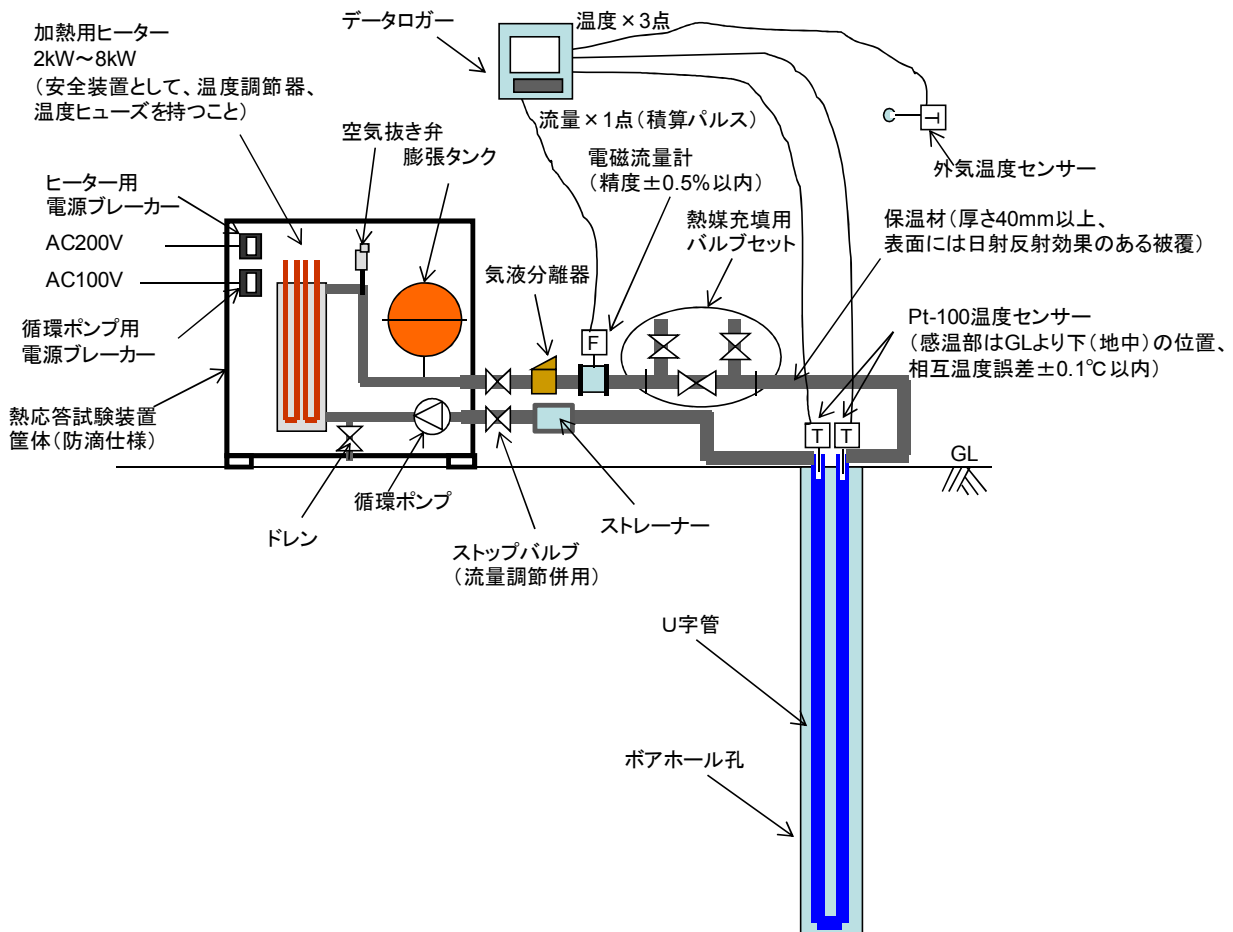


図1 ボアホール型地中熱交換器に対する加熱法による熱応答試験

※TRT装置の熱媒(水)循環系は、密閉型で説明しているが、密閉型、開放型、どちらでも構わない。(図は密閉型の一例である。)
 ただし、開放型においては受液タンクに十分な断熱がされており、タンクから熱損失を抑えると共に、外部から熱影響をできるだけ少なくすることが条件である。

4. 試験の実施方法

(1) 試験開始の条件

- 1) 地中熱交換器設置工事後(ボーリング工事を含む)、試験の実施まで少なくとも 3 日間は放置させる。これは、ボーリングの際の摩擦熱やベントナイトセメントの固化時の発熱の熱影響が試験結果に影響を与えないために必要な時間である。
- 2) 半径 6m 以内で、別な地中熱交換器設置工事が行われていないことを確認する。
- 3) 付近で地下水のくみ上げが行われていないことを確認する。

(2) 試験装置の設置

1) 試験装置の接続

試験装置からの断熱パイプを地中熱交換器に接続する。接続パイプはできるだけ短くなるように、そして配管経路全てにわたりしっかりと断熱されるように留意する。このとき、地中熱交換器の出入口温度測定点は外乱の影響無く地中に対して純粋に放熱した熱量を測定できるように GL 以下となるようにする。

2) 熱媒の充填

試験装置および地中熱交換器に熱媒充填用のバルブを利用して熱媒を充填する。本来は、実際に使用する予定の熱媒体を用いるのが望ましい。また、実際の利用時の温度範囲において試験をすることが望ましい。これは、地中熱交換器の熱抵抗を算出する際に熱媒体と地中熱交換器パイプ内壁との熱伝達抵抗を把握するためである。ただし、熱媒と地中熱交換器パイプ内壁との熱伝達抵抗を計算で補正できる場合は、清水で試験を行うことも可とする。

(3) 自然地中温度分布の測定

熱媒を充填して数時間放置すれば、地中熱交換器内の熱媒温度は周囲の地中温度と同じ値を示すようになる。このとき、ボアホール型の地中熱交換器であれば、地中熱交換器内に1本の温度センサー(±0.1℃精度をもつもの)を静かに底部まで落とし込み、順次、上方へ引き上げる、任意の深さ毎に温度を読みとることにより、自然の垂直地中温度分布を測定することができる。

(4) 平均地中温度の測定

熱媒を充填してから数時間放置した後、試験装置の循環ポンプにより数分間から十分間にわたり熱媒を循環させる。出入口温度がそれぞれ同じ値を示すようになったら、その温度を読みとる。これが、簡易的に測定された平均地中温度である。

(5) 試験時の加熱負荷

実使用時を想定した加熱負荷をかけるのが望ましい。

ここで、加熱負荷が小さい場合には、実測された温度上昇が熱的外乱の影響を受けやすいということを考えなければいけない。逆に、加熱負荷が大きい場合には、地中熱交換器の外周に起こる得ると考えられる自然対流の影響が大きく結果に表れてしまう可能性があることを考慮する。

また、この加熱負荷は、設定した循環流量に対して十分な温度差を確保できるものでなければいけない。

(6) 試験時の熱媒循環流量

実使用時を想定した循環量とするのが望ましい。管内流速を 0.5m/s を保つとすると、口径 20A のパイプでは約 10L/分、口径 25A のパイプでは約 15L/分とする。また、この循環流量は、設定した加熱負荷に対して十分な温度差を確保できるものでなければいけない。なぜなら、出入口温度差の測定誤差が $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ としているので、この温度差が 2°C であれば $\pm 5\%$ の誤差が生じるということである。したがって、温度差は 4°C 程度、測定誤差は $\pm 2.5\%$ を確保することが望ましい。このとき、加熱量は口径 20A のパイプでは約 10L/分の場合、約 2.8kW、口径 25A のパイプでは約 4.2 kW となる。

(7) 試験の開始

まず、循環ポンプにより数時間程度熱媒を循環させて十分にエアーを抜いておく。その後、数時間放置してから試験を開始するのが望ましい。

試験開始前には、予め数分間にわたり熱媒を循環させて、出入口温度がほぼ同じになったのを確認してから、電気ヒーターのスイッチを ON にして、加熱を開始する。

(8) 試験期間

加熱時間は、**標準で 60 時間、最短でも 48 時間以上**行う。

精密に行いたい場合には 100 時間程度行うのが望ましい。

より長期間行えば、地下水流れの影響を調べることができる。場合によって異なるが、一般的には試験期間は1週間以上は必要となる。

(9) 試験の終了

試験に用いた熱交換器は通常、実システムにも用いられるものである。試験終了後には、泥や異物が混入しないように熱交換器のパイプにキャップをしておく。

また、もし試験において清水を用いた場合で、実システムでは不凍液が用いられる場合には、不凍液への入れ替えが必要となる。

5. 試験データの解析方法

(1) 適用する解析理論

線熱源理論を応用して、加熱時の対数時間に対する各位置の温度の上昇勾配から、各位置における周囲地盤の平均有効熱伝導率を計算する。一方、加熱停止後の温度回復時の温度応答からも地盤の平均有効熱伝導率を計算する。

今、右図の様に無限固体中に非常に細い無限長さの線状熱源(無限線源)が存在し、単位長さ当たり q [W/m] 発熱している。このとき、熱線から半径方向距離 r [m] だけ離れた地点の初期温度 T_0 [K] からの温度上昇 ΔT [K] は以下の式で表すことができる。

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} E(r^2 / 4at) \quad (1)$$

ただし、 λ [W/(m·K)] は固体の熱伝導率、 a [m²/s] は固体の温度拡散係数である。また、 $E(x)$ は指数積分関数で次式で与えられる。

$$E(r^2 / 4at) = \int_{r/2\sqrt{at}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (2)$$

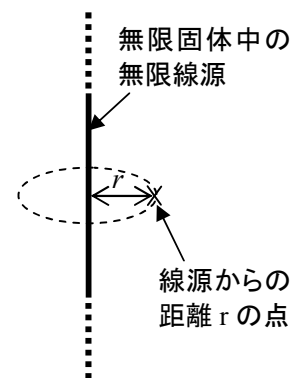


図2 無限固体中の無限線源

ここで、 $4at/r^2$ が十分に大きい (一般には 20 以上で誤差が 2.5% 以下となる) ときには、次の近似式で表すことができる。(例えば、 $a=0.002$ m²/h, $r=0.06$ m のとき $t > 10$ h)

$$\Delta T \cong \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln \frac{4at}{r^2} - 0.5772 \right) \quad (3)$$

いま、右図にある2つの時点、 t_1 と t_2 における温度 T_1 と T_2 考えると、

$$t = t_1 \text{ のとき, } T_1 = \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln \frac{4at_1}{r^2} - 0.5772 \right)$$

$$t = t_2 \text{ のとき, } T_2 = \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln \frac{4at_2}{r^2} - 0.5772 \right)$$

となる。ここで(4)式から(3)式を差し引くと

$$T_2 - T_1 = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (5)$$

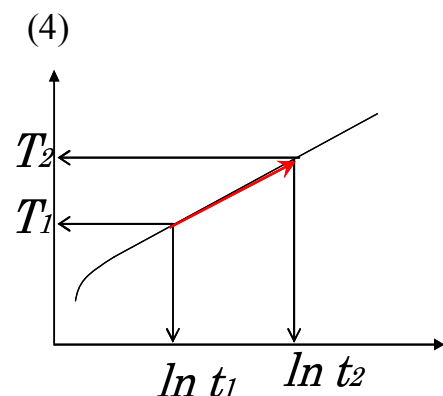


図3 線源周囲固体温度の上昇の様子

となる。この式を整理すると λ は次式で計算できる

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{1}{\frac{T_2 - T_1}{\ln t_2 - \ln t_1}} \quad (6)$$

(2) 実測における地盤の平均有効熱伝導率 λ_s の求め方

上の(6)式において、 $\frac{T_2 - T_1}{\ln t_2 - \ln t_1}$ は対数時間における温度上昇の傾きであるので、基本的には、始点(t_1)と終点(t_2)のデータのみが得られていれば傾きは求められる。ただし、実測においては1分毎に温度上昇に関する計測データがあり、それぞれについて計測器の誤差や外乱の影響を含んでいるので、実際のデータ解析においては、始点と終点の値だけを使うことはせず、始点から終点までの全ての計測データを用いて表計算ソフトウェアにより t_1 から t_2 までの近似直線の傾き k を求める。その傾き k を用いて、地盤の平均的な有効熱伝導率 λ_s [W/(m·K)] を算出する。

$$\lambda_s = \frac{q}{4\pi k} \quad (7)$$

(3) ボアホールの熱抵抗 R_b

次に、ボアホールの半径を r_b とすると、ボアホール内壁における温度上昇 ΔT_b は次式となる。

$$\Delta T_b \cong \frac{q}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \frac{4a_s t}{r_b^2} - 0.5772 \right) \quad (8)$$

一方、ボアホールに挿入されたチューブ内の熱媒体の代表温度を T_f (熱媒体の入口、出口平均温度)、チューブ内の熱媒体とボアホール内壁の平均熱抵抗を R_b [m·K/W] とすると、 q [W/m] は R_b を用いて、次式で表すことができる。

$$q = \frac{1}{R_b} (T_f - T_b) \quad (9)$$

ここで、

$$\Delta T_b \cong T_b - T_0 \quad (10)$$

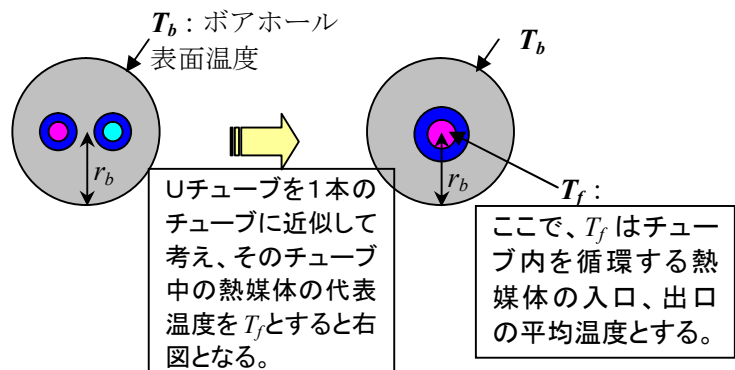


図4 ボアホール内部の近似化による取り扱いと T_f
9/13

したがって、(8)式から T_b を消去して、 T_f で表すと、

$$T_f = q \left\{ \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left(-0.5772 + \ln \frac{4a_s t_1}{r^2} \right) + R_b \right\} + T_0 \quad (11)$$

ここで、 λ_s は(7)式で得られた値を代入する。また、解析においては、片対数グラフにおいて対数時間における温度上昇の近似直線から得られた y 切片の値を T_i として用いる。すなわち、 $t_f=1.0$ [h] のときの T_f を T_i とすると、(12)式からチューブ内の熱媒体とボアホール内壁の平均熱抵抗 R_b [m·K/W] を求めることができる。

$$R_b = \frac{T_i - T_0}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda_s} \left\{ \ln \left(\frac{4a_{s0}}{r_b^2} \right) - 0.5772 \right\} \quad (12)$$

注) ここで、(12)式で用いる温度伝導率 a_{s0} は [m²/h] の値を用いること。
(a_s [m²/s] とはことなることに注意する)

なお、 $a_s = \lambda_s / c_{ps} \rho_s$ であり、 λ_s は TRT から得られた値を用いる。土のバルクの ρ_s は現場でサンプルを採取してきて、円筒状の容器に充填しなおして推定するのがのぞましい。この場合、土の体積含水率を測定すること。土のバルクの比熱 C_{ps} は、間隙率と飽和度が分かれば、土粒子の比熱が一般に無機物の平均的な比熱である 1.0 [kJ/(kg·K)] を用いることにより算定できる。

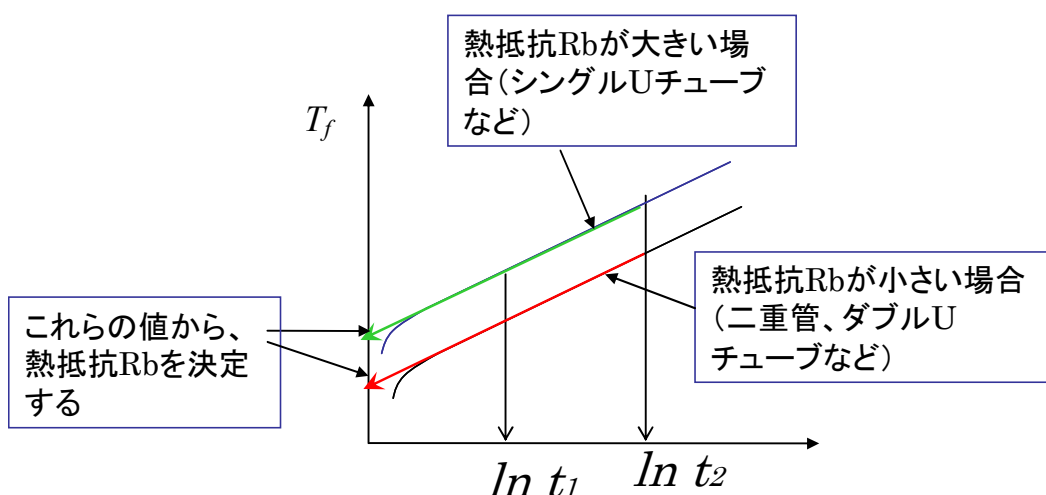


図 5 R_b による T_f の上昇の違いの例

(4) 解析に必要なデータ

- 1) 地中熱交換器の口径、長さ、充填材
- 2) Uチューブの口径、長さ
- 3) 使用した熱媒の比熱、比重
- 4) 加熱量の時間変化(加熱量=比熱×比重×循環流量×温度差)

同時に、試験地点の地質情報があると非常によい参考となる

- 1) 地質情報
- 2) 自然地下水位

(5) 解析の具体例

有効熱伝導率 λ_s [W/(m·K)]は(7)式で計算できる。

$$\lambda_s = \frac{q}{4\pi k} \quad (7) \text{再}$$

ここで、 λ_s : 地盤の平均有効熱伝導率 [W/(m·K)], q : 1m あたりの発熱量[W/m],

k : 対数時間に対する温度勾配

ここで、傾き k は、加熱開始後、12 時間から 60 時間(48 時間以上)までの温度勾配を適用する。

(6) 加熱法による熱応答試験の具体例

測定場所: 札幌市厚別区山本地区

地層: 主に、風化火山灰性シルト(地下水流れは、ほとんど無いと予想される)

地中熱交換器: 25A シングル U チューブ(深さ 42m)

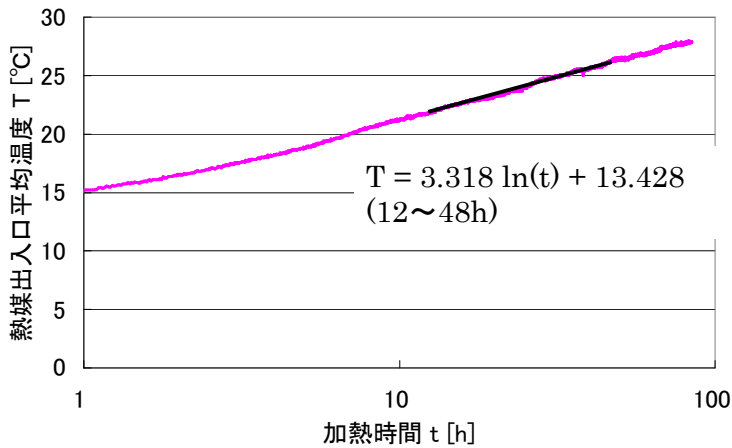
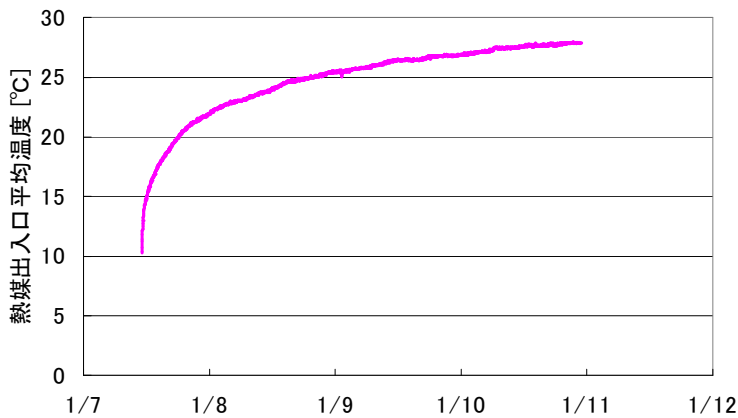
測定期間: 2010 年 1 月 7 日~1 月 10 日

加熱時間: 84 時間

平均放熱量: 平均 2,122 W (50.5 W/m)

初期地中温度: 10.6°C

使用熱媒体: 清水



$$\lambda = \frac{Q}{4\pi k L} \quad T = k \ln(t) + l$$

Q: 放熱量 2,122 [W]
L: ボアホール長さ 42 [m]

一定加熱水循環方式	
温度勾配 k [K]	3.32
有効熱伝導率 λ [W/(m·K)]	1.21

Ver.1.0 作成:平成 22 年 9 月 6 日
Ver.1.1 修正:平成 22 年 10 月 17 日
Ver.2.0 作成:平成 23 年 8 月 29 日
主査 長野克則
(北海道大学 教授)
*Prepared by Prof. Nagano,
Hokkaido University*