

「再生可能エネルギー熱利用技術開発」

地下水を利活用した高効率地中熱利用システムの開発とその普及を目的としたポテンシャルマップの高度化

## 地中熱ポテンシャルマップ

### 取扱説明書

平成31年2月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合機構

(委託先) 国立研究開発法人産業技術総合研究所

# 目次

I. はじめに .....	1
II. ポテンシャルマップの概要 .....	2
1. 概要 .....	2
2. 技術的な特徴 .....	3
III. 利用方法 .....	8
1. マップの見方 .....	8
2. 利用上の留意点 .....	9

## I. はじめに

国立研究開発法人産業技術総合研究所は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合機構（NEDO）の委託研究の一環として、地中熱ポテンシャルマップの作成を実施しています。

日本は、海洋プレートの沈み込み帯に位置することから、安定大陸に位置する欧米諸国に比べて、地質構造が複雑で、特に第四系層（約 260 万年前から現代までにおける人類の出現や氷河におおわれた時代の地層）が厚く堆積している地域が多いことが特徴です。第四系層の地質は砂・礫・泥などで構成されており、その熱伝導率は岩盤の 4～5 割程度となっています。一方、第四系層の透水係数は高く、優良な帯水層を形成していることが多いため、地下水の流れが活発であれば、熱の移流効果によって見かけの熱伝導率が高くなり、地中熱利用に適してきます。このため、日本では、地下水流動を考慮することにより、効率の良い地中熱利用システムの設計が可能になります。本事業では、東北各県主要地域を対象に地下水流動の効果を考慮した地中熱ポテンシャルマップを作成しました。

本資料は、地中熱ポテンシャルマップの特徴や利用方法を概説したものです。

## II. ポテンシャルマップの概要

### 1. 概要

#### 1.1 作成したマップの種類

本事業では、3つのマップを作成しました。以下にそれぞれの概要を示します。

- ・ クローズドループのポテンシャルマップ
  - ボアホール型のクローズドループ地中熱利用システムを想定し、各地域の標準的な冷暖房負荷を想定した際に必要となるボアホール地中熱交換器の長さをコンターマップ（長さ分布図）によって表現したマップ
- ・ オープンループの適地マップ
  - 地域の地下水流動を考慮し、オープンループ地中熱利用システムの適地／不適地の分布を示したマップ
- ・ 帯水層蓄熱（ATES : Aquifer Thermal Energy Storage）の適地マップ
  - 地下水流動を考慮し、ATES の適地／不適地の分布を示したマップ

なお、ATES とは、2 本以上の坑井を用いて帯水層を蓄熱層として利用して、効率的なエネルギー利用を行うシステムです。夏期には夏期揚水井から地下水を揚水し冷熱源として利用し、冬季揚水井に注入し温熱を蓄熱します。冬季は冬季揚水井から温熱を蓄えた地下水を揚水して温熱源として利用し、夏期揚水井に注入し冷熱を蓄熱します。

#### 1.2 対象地域

東北地域の以下の平野・盆地についてポテンシャルマップを作成しました。

- ・ 青森県 津軽平野
- ・ 秋田県 秋田平野
- ・ 宮城県 仙台平野
- ・ 福島県 郡山盆地
- ・ 山形県 山形盆地

## 2. 技術的な特徴

### 2.1 熱物性調査

本マップのポテンシャルの評価には、3次元地下水流動・熱輸送モデルを使用しています。同モデルを用いた各地域の計算には、既存の水文地質資料を活用しているほか、独自に地質調査及び熱応答試験を行い、計算結果と実測結果を比較することで、モデルに用いるパラメータを調整し、精度を高めています。

地質調査では、深度 100m のオールコアボーリングを行い、コア試料を採取し、熱物性分布の分析を行いました。また、コア試料を採取した後、同孔で熱応答試験 (TRT: Thermal Response Test) を実施しています。この結果を 3次元地下水流動・熱輸送モデルに反映させています。

### 2.2 3次元地下水流動・熱輸送モデル

#### 2.2.1 概要

3次元地下水流動・熱輸送モデルは地下構造の熱伝導率、透水係数、間隙率をパラメータとして、地下水の流動と熱輸送を3次元でシミュレーションするものです。本解析では、解析コードとしてFEFLOW (ver.7.0以上)を使用しています。

解析手順としては、まず水理地質構造、水文データをもとに解析モデルの構築と境界条件の設定を行い、地下水流動解析を行います。この際、現地で測定された水位データと比較して、地下水涵養量や透水係数を調整し、地下水流動を再現します。

地下水流動を再現した後、熱輸送解析を行います。熱輸送解析では、現地で測定された地中温度の深度プロファイルを再現できるように透水係数、熱伝導率、熱容量を変化させます。

このように実測結果を再現するようにパラメータを試行錯誤的に調整することで、精度を向上させています。

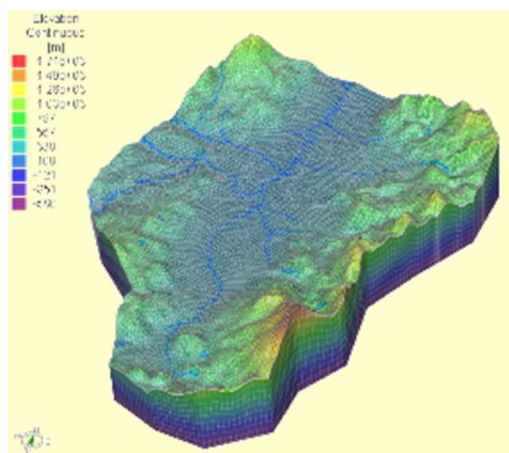


図 1 3次元地下水流動・熱輸送モデルの構築例 (山形盆地)

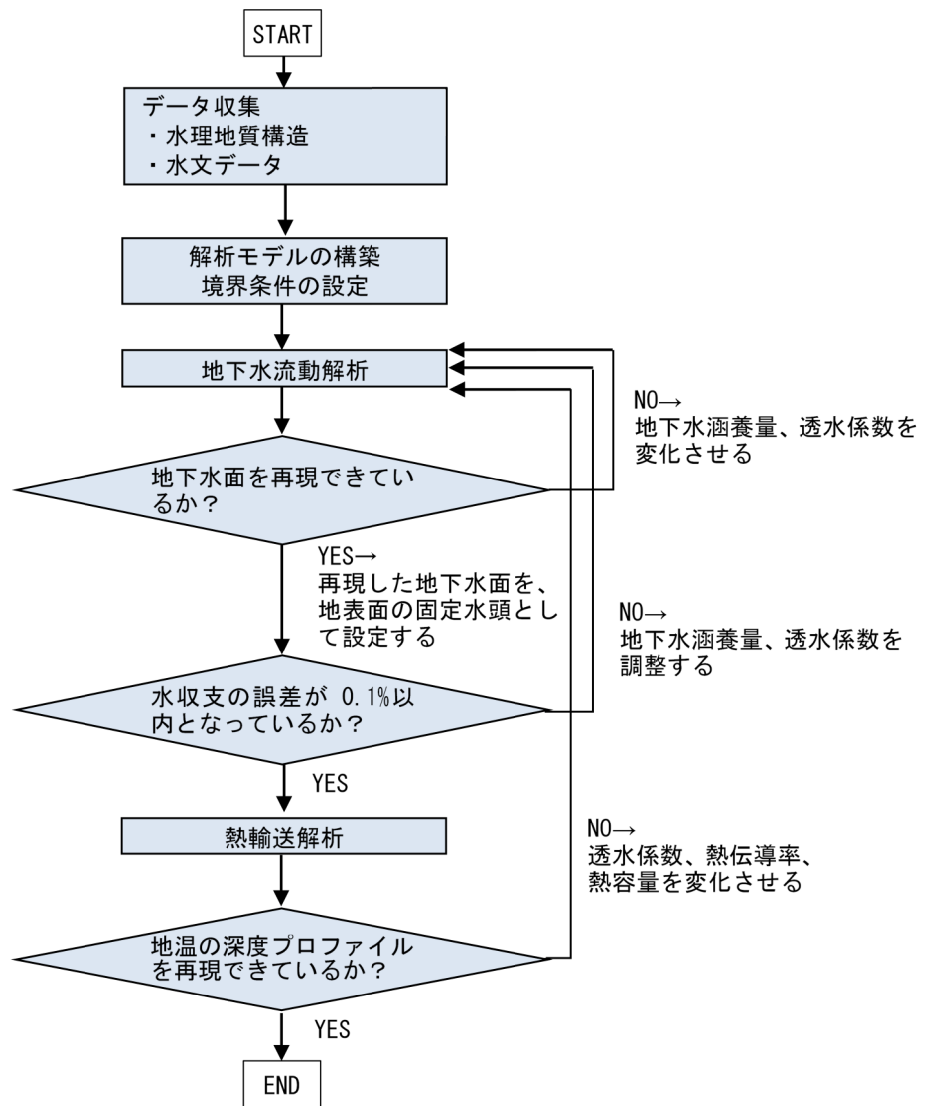


図 2 解析手順のフロー図

### 2.2.2 境界条件の設定

地下水流動解析では、表 1 のように境界条件を設定しています。上面（陸域）は、地下水涵養 0.001 mm/d を与え、地下水面が標高より高くなる場合は排水する設定としています。上面（河川）は過去 10 年間の平均河川水を固定水頭として与え、観測地点間は内挿補完により固定水頭を設定しています。上面（海域）は、海水面に相当する固定水頭 0m を与えています。側面（陸域）の山地部分は地表面標高を $\sqrt{\quad}$ で除した値、側面（陸域）の平地部分は地表面標高を固定水頭として設定しています。側面（海域）及び下面は、不透水境界としています。

表 1 地下水流動解析における境界条件

境界位置	設定
上面（陸域）	地下水涵養=0.001 mm/d を与え、地下水面が地表面標高より高くなる場合は排水
上面（河川）	固定水頭：過去 10 年間の平均河川水位
上面（海域）	固定水頭：海水面 (=EL.0m)
側面（陸域）	固定水頭：山地部=地表面標高/ $\sqrt{2}$ 平地部=地表面標高
側面（海域）	不透水
下面	

また、熱輸送解析における境界条件は表 2 のように設定しています。上面境界は、地下水流動解析で求めた地下水面標高を地表面に固定水頭として設定しています。上面（陸域）及び上面（河川）の固定温度は、研究対象地域の気象庁観測地点を抜粋し、その地点の過去 10 年間の平均気温を基準温度とし、高度遞減率-0.65 °C/100m として算出した温度で固定しています。

臨海平野の場合、海域（上面）の固定温度については、国土交通省の港湾水質定点自動観測データ配信システムにより観測されている中で、モデル範囲近傍の観測地点から取得した温度で固定しています。また、モデルの側面及び下面の固定温度については、地下温度プロファイルの結果から深度 100m 以下まで測定している地点を抜粋し、それらの地点の平均深度温度勾配の値を用いて算出した温度で固定しています。

表 2 熱輸送解析における境界条件

境界位置	設定
上面（陸域）	気象庁観測地点の 10 年間の平均温度を高度遞減率 -0.65°C /100m 調整
上面（河川）	
上面（海域）	固定温度：港湾水質定点自動観測データ配信システムで観測されているものの内、モデル範囲近傍観測地点から取得した温度
側面	固定温度：地下温度プロファイルから深度 100m 以下まで測定している地点を抜粋し、それらの地点の平均深度温度勾配の値を用いて算出した温度
下面	

## 2.3 各マップの作成方法

### 2.3.1 クローズドループのポテンシャルマップ

クローズドループのポテンシャルマップは、各地域の標準的な冷暖房負荷を想定した際に必要となるボアホール地中熱交換の長さを表しています。各地域の標準的な冷暖房負荷は、10年間の年平均気温データより、最も平均的な年の時間ごとの気温データから、以下の式により建物の冷暖房負荷を計算しています。

$$\text{暖房負荷 } Q_h[\text{W/m}^2] = \frac{U \times A_e (T_i - T_o)}{A_f} - \frac{I \times \eta}{A_f}$$

$$\text{冷房負荷 } Q_h[\text{W/m}^2] = \frac{U \times A_e (T_o - T_i)}{A_f} + \frac{I \times \eta}{A_f}$$

$U$  : 外皮平均熱貫流率 $[\text{W/m}^2/\text{K}]$ 、 $A_e$  : 外皮面積 $[\text{m}^2]$ 、 $A_f$  : 延床面積 $[\text{m}^2]$ 、  
 $T_i$  : 室内設定温度 $[\text{°C}]$ 、 $T_o$  : 外気温度 $[\text{°C}]$ 、 $I$  : 日射量 $[\text{Wm}^2]$ 、  
 $\eta$  : 平均日射熱取得率 $[\text{W}/(\text{W/m}^2)]$  (0に設定)

なお、外皮平均熱貫流率は平成25年省エネルギー基準に基づき設定しています。建物サイズについては、国土交通省の省エネ基準改定計算に用いられた一般的な住宅を想定し、延床面積 $120.08\text{m}^2$ 、外皮面積 $312.08\text{m}^2$ を設定しています。また、室内設定温度を暖房運転 $22\text{°C}$ 、冷房運転 $26\text{°C}$ とし、外気温度が $14\text{°C}$ を下まわった時刻に暖房運転、外気温度が $26\text{°C}$ を上回った時刻に冷房運転するように運転開始条件を設定しています。ヒートポンプの効率は、暖房時COP3.5、冷房時COP5.5を想定しています。

上記で求めた冷暖房負荷のもとに、解析地点における熱交換井周辺の単一熱交換井モデルにより、3年間の稼働シミュレーションを行い、熱交換器の入口・出口温度の平均が指定温度を下まわらない最短の熱交換井の長さを求めています。

### 2.3.2 オープンループの適地評価

地下水還元型のオープンループの地中熱利用システムを実現するためには、以下の2つの条件が必要です。

- ・ 十分な厚さの帯水層がある
- ・ 地下水の湧出域ではない（地下水の上向き流れが卓越しておらず、地下水を地下に戻すことが可能である）

このため、オープンループの適地マップでは、第四紀層を帯水層と考え、まず第四紀層の厚さが20m以上の地域を抽出し、そこから3次元地下水流動・熱輸送モデルによって上向きの流速が一定以上と予想される地域（地下水流動系の湧出域）を除くことで適地を特定しています。



### 2.3.3 ATES システムの適地評価

ATES の適地マップでは、オープンループの適地条件に加えて、夏期（冬季）に形成された温熱（冷熱）塊が冬季（夏期）に採熱できることが必要となります。このため、3次元地下水流動モデルの横方向の地下水流速を考慮して、蓄熱の可否により適地／不適地の判断を行っています。

### III. 利用方法

#### 1. マップの見方

クローズドループのポテンシャルマップは、各地域の標準的な冷暖房負荷を想定した際に必要となるボアホール地中熱交換器の長さを表しています。熱交換器の長さが短い地域はポテンシャルの高い地域となります。

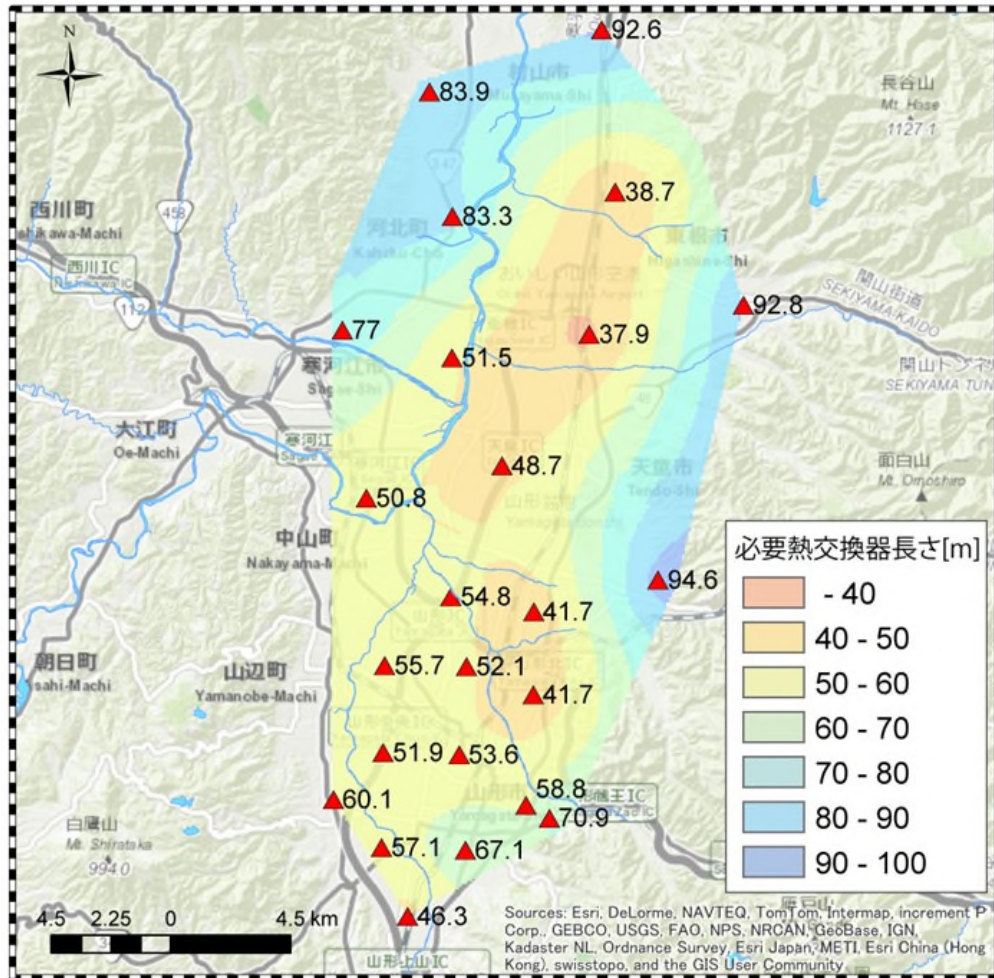


図 3 クローズドループのポテンシャルマップの例

また、オープンループ及びATESの適地マップは、それらの適地を示しています。オープンループについては、十分な帯水層があり、かつ湧出域ではない地域が適地として表示されます。また、ATESについては蓄熱が可能な地域が表示されます。

本成果によるオープンループおよびATESの適地マップの「事前調査推奨(還元能力調査)」とは、採排熱後の地下水を同一帯水層へ還元することが可能かどうかに関する事前調査の実

施を推奨する地域です。調査によりオープンループシステムのための揚水・還元が十分に可能であると判断された場合、「通常オープンループ最適地」に含まれる地域であれば通常のオープンループシステムを、「ATES 最適地」に含まれている地域であれば ATES システムの導入適地となります。

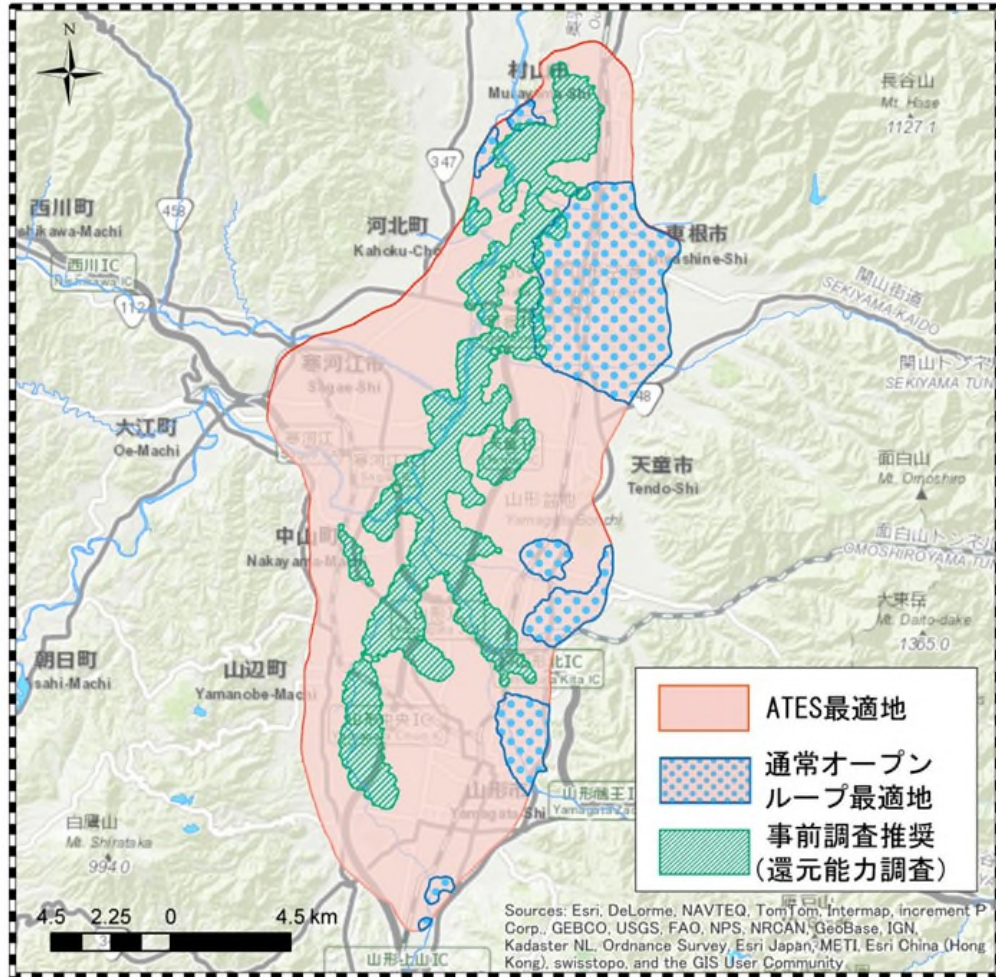


図 4 オープンループのポテンシャルマップの例

## 2. 利用上の留意点

本導入適地マップは、対象地の導入適性の確認に利用するものです。実際の導入検討やシステム設計の際には、改めて熱源側の採熱量を調査する必要があります。またマップに示される熱交換井の長さは平成 25 年省エネルギー基準のモデル住宅を想定して計算していますので、施設側の熱需要についても合わせて検討する必要があります。