

光ファイバ温度測定による高透水個所の推定と透水量評価手法の提案

(財) 電力中央研究所 末永 弘
Martin Schreck
海江田 秀志

1. はじめに

高温岩体発電とは、高温の岩盤に水を注入し、人工的に蒸気を得て発電する地熱発電に類似した発電方式である。この高温岩体発電を実用化するためには、岩盤内に自然に存在する割れ目、あるいは人工的に破碎された割れ目によって構成される貯留層の透水性を評価することが重要である。

ボーリング孔を用いた従来の透水試験法では、地中が高温であるため孔内をパッカーで仕切ることが難しく、高透水個所の特定が困難であった。光ファイバは、その物理的特性から連続的な温度分布を測定できるため、光ファイバケーブルをボーリング孔内に挿入後、種々の条件下における孔内温度を測定すると、岩盤内の高透水個所を推定することが可能となる(末永ほか, 2000)。そこで高温岩体発電実験サイトである雄勝実験場(秋田県)に掘削されたボーリング孔において、光ファイバによる温度測定を実施し、高透水個所の推定と当該個所における透流量の算出を試みた。

2. 実験手順およびデータ分析方法

(1) 実験の概要

実験の概念図を(図1)に示す。

光ファイバケーブルを挿入したボーリング孔 OGC-3 井に地表水を注入し、孔内水温を一時的に低下させる(右図中点線の温度プロファイル)。注水を止めた後、孔内水温が回復する過程をモニタリングすると、高透水個所においては他より先行して温度が回復すると考えられる(右図中太線の温度プロファイル)。この、他より温度回復が先行する個所を高透水個所として検出する。

実験の手順を以下に示す。

a. OGC-3 井に光ファイバケーブルを挿入する。

b. OGC-3 井における初期温度プロファイルを測定する。

c. OGC-3 井に地表水を注入し、孔内水温を低下させる。

d. OGC-3 井への注水を止め、OGC-1 井へ地表水を注入する。これは、OGC-3 井の導通個所において、温度回復を促進させることと、導通性が高い場合に地下水を湧出させることを目的としている。このとき、OGC-3 井における温度プロファイル

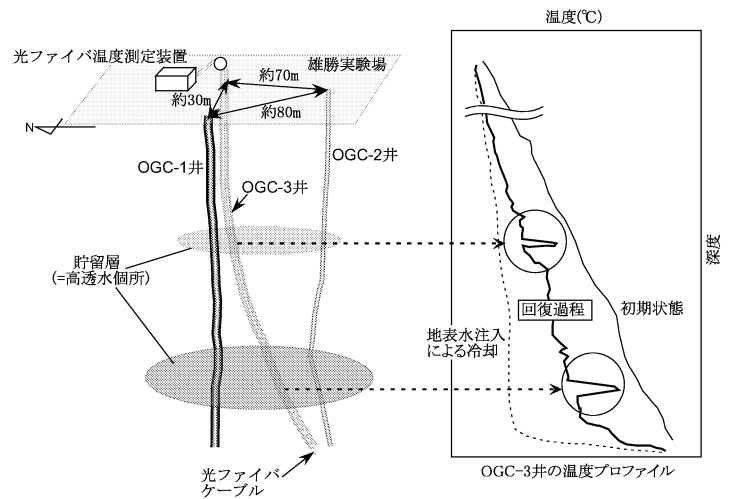


図1 ボーリング孔内温度測定概念図

(2) 高透水個所の検出方法

孔内水温度プロファイルから、高透水個所を検出する方法を述べる(図2)。

ボーリング孔内のある区間において、ボーリング深度 $D(m)$ と温度 $T(^{\circ}C)$ の関係が直線で近似できるものと仮定する。ある深度 $D_i(m)$ における温度の実測値を $T_i(^{\circ}C)$ とすると、実測値と近似直線との温度差分 ΔT_i は、

$$\Delta T_i = \frac{T_i - a \cdot D_i - b}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (1)$$

となる。この計算を各時刻における温度プロファイルデータに対して行い、各深度における ΔT_i を求める。

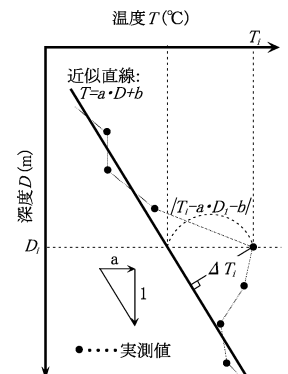


図2 温度データ分析概念

Key Words: 光ファイバ, 温度測定, 高温岩体, 高透水個所, 透水量評価

〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646, TEL.0471-82-1181, FAX 0471-83-8700, E-mail : suenaga@criepi.denken.or.jp

次に各時刻における ΔT_i の標準偏差 σ を算出し、 ΔT_i が σ よりも大きい点を、近似直線より大きく離れて高温側にある点、すなわち他よりも先行して温度回復している点とする。

(3) 透水流量算出手法

ここでは、得られた温度プロファイルより各深度における透水流量を算出する方法について述べる (末永ほか, 2001)。高温岩体発電サイトにおける地下の温度・圧力条件では、水は単相の圧縮水として存在すると考えられる。そこで、ボーリング孔内水の鉛直 1 次元方向に関する質量・エネルギー保存則を考え、以下の仮定を用いて支配方程式を導出する。

- ・ボーリング孔内水の密度は一定、すなわち孔内は静水圧状態
- ・ボーリング孔の外部との熱交換は、孔内へ流入する地下水と孔壁における岩盤からの熱伝達によってなされる
- ・孔内へ流入する地下水温度および孔壁の岩盤温度は、孔内における初期状態の温度とする

$$\text{支配方程式: } \rho_w \frac{\partial(C_w T_w v_w)}{\partial z} + \rho_w \frac{\partial(C_w T_w)}{\partial t} - \rho_w C'_w T'_w \frac{\partial v_w}{\partial z} + 8\lambda_w \frac{T_w - T'_w}{D^2} - \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

ここで、添字の w は水を表し、各変数の定義と単位は以下のとおりである。

ρ_w : 密度 (kg/m^3)	T_w : 温度 (K)	C_w : 比熱 ($W/m/K$)
v_w : 孔内流速 (m/sec)	T'_w : 初期温度 (K)	C'_w : 初期温度に対応する比熱 ($W/m/K$)
λ_w : 熱伝導率 ($W/m/K$)	D : ボーリング孔径 (m)	

この支配方程式のうち、 C_w と λ_w は温度・圧力の関数であり、ボーリング孔内は静水圧状態であるため温度プロファイルにより一意に定まる。したがって、未知数は v_w のみとなり、ボーリング孔の地下水面が変動しないと仮定すると、孔内流速分布が決定される。この孔内流速分布と質量保存則から、孔内において外部より流入する地下水の透水流量分布を算出する。

3. 測定結果およびデータ分析結果

測定された温度プロファイルを図 3 に示す。また、この温度プロファイルより 2.(3) によって算出された透水流量分布を図 4 に示す。

図 3 の凡例に計測された時刻を示した。深度-温度プロファイルは、16:20:05 から翌日の 8:30:23 にわたり約 15 分間隔で測定されたが、図中には全データの内 6 プロファイルデータを掲載した。また、図中の矢印は、この方向にプロファイルが変化したことを示している。図中点線の矢印で示したところは、各時刻における温度勾配に対して温度変化が見られる個所である。矢印で 3 箇所示した深度のうち、上部の 2 箇所は他よりも先行して温度回復している個所であり、2.(2) による分析の結果、深度 770, 778m 付近および、947, 967m 付近が高透水個所として検出された。これらの個所については、OGC-1 井の注水の影響から、他に先行して温度回復したと考えられるため、OGC-1 井・OGC-3 井間における導通過所と判断される。残る 1 箇所は深度 1138m 付近であり、この箇所は他よりも温度回復が遅い。これは、ボーリング孔掘削時に当該箇所において大量に逸水し、長時間冷却された影響が残っているものと考えられ、上部 2 箇所同様高透水個所と推定される。また、これら 3 箇所について算出された透水流量は、単位長さあたり $10^{-6} m^3/sec$ 程度であった。これは、OGC-1 井への単位長さあたりの注水量 $10^{-4} m^3/sec$ 程度と比較すると 100 分の 1 程度であり、注水の影響は小さいものと考えられる。

参考文献

- [1] 末永弘, Martin Schreck, 宮川公雄, 中川加明一郎 (2000): 光ファイバ温度検層による水みち推定への適用性検討, 電力中央研究所研究報告, U99068.
- [2] 末永弘, Martin Schreck, 海江田秀志 (2001): 高温岩体発電のための貯留層評価技術の開発 - 光ファイバ温度測定による導通個所の特定と透水量評価手法の提案 -, 電力中央研究所研究報告, U00052.

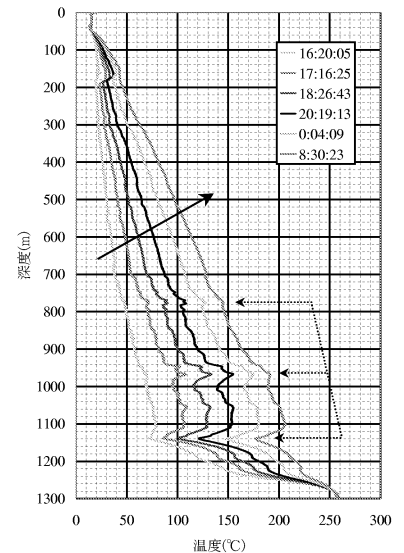


図3 孔内温度測定結果

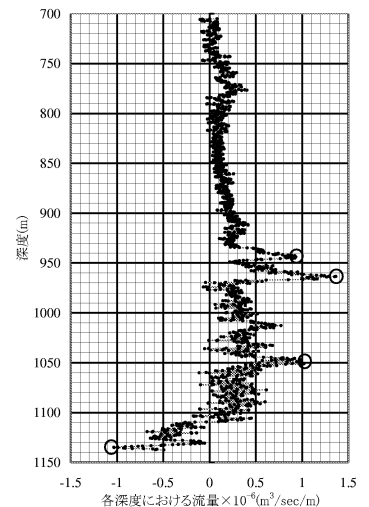


図4 透水流量算出結果