

## 光ファイバ熱伝導率計の計測範囲の実験的評価

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) ○榊 利博, Berrak Firat-Lüthi, Tobias Vogt  
 大林組(株) 丹生屋純夫, 西村政展, 鶴山雅夫

### 1. はじめに

Nagra ではスイス北西部に位置するモンテリ地下研究所において Full Emplacement (FE) 試験を実施している。同試験は、スイスの高レベル放射性廃棄物および使用済燃料処分施設の母岩となるオパリナス粘土岩および人工バリアにおける熱-水-力学挙動の実規模での把握および施工技術等の実証を目的としている。試験坑道(直径 3 m, 長さ 50 m) に周辺をベントナイトで埋め戻した廃棄体を模擬した 3 体のヒーターを始動後 10 年以上の期間における挙動のモニタリングを予定しており、そのために数百もの様々な計測機器を設置している (Müller et al, 2017)。異なる種類の光ファイバを用いた温度やひずみなどの分布計測技術もこれに含まれる。なかでも坑道の頂盤に沿って設置した加熱型の光ファイバケーブルでは、周辺材料の熱伝導率の分布を坑道の全長に渡って計測することができるものである。本論では、加熱型光ファイバケーブルの計測データがケーブル周辺のどの範囲の特性を反映したのかを把握するために実施した基礎実験とその結果について述べる。

### 2. 試験概要

測定原理は熱伝導率計測の非定常法として広く用いられているヒートパルス法 (例えば Bristow et al., 1994) にもとづく。計測対象の材料中に設置した(従来法では 10 cm 程度の針状の) 線熱源を一定時間加熱し温度の経時変化から熱伝導率を算定する。本法はこの針部分を数 10 m から場合によっては km オーダーに渡る光ファイバと置き換えたものである。

測定範囲を把握するための実験はスイス南部のアルプス山中に位置するグリムゼル試験場において実施した。図 1 のように、4 m の木箱(深さ 12.2 cm, 内幅 12.8 cm) の中心線に沿って光ファイバケーブル(外径 4 mm, 光ファイバ, ステンレス管, 銅線などからなる)を設置し、上記 FE 試験で用いられたものと類似する粒状ベントナイトを充填した。木箱の 4 m の区間の両端 50 cm ずつは境界の影響を受けると予想されたため、これらを除いた 3 m の区間を 50 cm ずつ 6 等分し、それぞれの区間に図示したように発泡スチロールボードを設置し光ファイバ周辺のベントナイトの被り厚を調整した。事前の予備解析より今回の実験条件下ではケーブルから 6 cm 程度より外側の影響は無視できると推察されたため、光ファイバを覆うベントナ

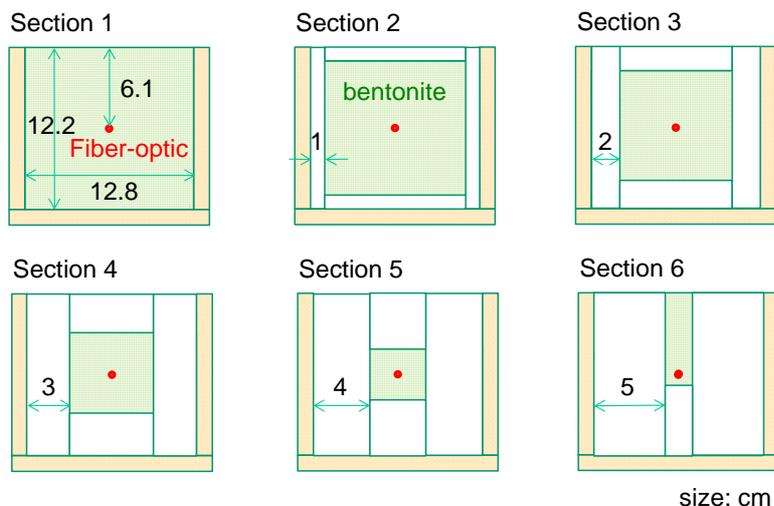


図 1 実験装置および手順。上) 奥側が 4 m の木箱, 下) 粒状ベントナイトの被り厚を変化させた断面

連絡先 Nagra 〒5430 Hardstrasse 73, P.O. Box 280, Wettingen, Switzerland, Phone: +41-56-437-1337

キーワード モンテリ岩盤研究所, グリムゼル試験場, ベントナイト, 光ファイバ, 熱伝導率計

イトは最大で約 6 cm とした。充填した粒状ベントナイトの平均乾燥密度は  $1.71 \text{ Mg/m}^3$  であったが、Section 6 は空間が小さく充填も容易でなかったため上部の発砲スチロールを使わずに充填を試みたが、最終的な充填乾燥密度は  $1.51 \text{ Mg/m}^3$  であった。光ファイバは温度分布計測装置 (Silixa Ltd., Ultima-S) に、銅線は電流発生装置に接続した。充填完了後は、ケーブル中の銅線に  $2 \text{ W/m}$  の電力によって 1 時間発熱させ光ファイバで計測される温度の経時変化を測定した。その温度変化より、各計測区間における熱伝導率を算定した。

### 3. 実験結果

図 2 に温度変化より算定した各計測区間の熱伝導率と粒状ベントナイトの被り厚の関係を示す。粒状ベントナイトの被り厚の減少とともに外側の発砲スチロールの影響を受けて熱伝導率が減少している。同一材料を乾燥密度  $1.71 \text{ Mg/m}^3$  で充填した場合の熱伝導率を別途計測した結果は図中に併せて示すとおり約  $0.47 \text{ W/mK}$  であった。

光ファイバ周辺に十分な量のベントナイトがある場合は、計測される温度の経時変化は主にベントナイトの熱伝導率 (上記の乾燥密度の場合は約  $0.47 \text{ W/mK}$ ) を反映する。ベントナイトの被り厚が 5-6 cm の場合は、光ファイバの温度変化から推定された熱伝導率は別途計測の結果と近い値が得られたのに対し、それより小さい被り厚では熱伝導率は過小評価された。発砲スチロールの代表的な熱伝導率は約  $0.04 \text{ W/mK}$  で、空気 ( $0.024 \text{ W/mK}$ ) と類似しベントナイトよりも 1 オーダー小さい。したがって、光ファイバからの温度の伝達が発砲スチロールの影響を受け始めると、みかけの熱伝導率は過小に評価されることになる。今回の実験結果は被り厚が 5 cm 程度より小さくなった時点から発砲スチロールの影響を受け始め、3 cm 程度以下ではその影響が顕著になることを示している。

### 4. まとめ

今回用いた実験条件下 (粒状ベントナイトの粒度分布, 含水比, 乾燥密度, 光ファイバケーブル特性, 加熱出力, 加熱時間など) では、加熱型光ファイバケーブルを熱伝導率計として用いる場合の計測範囲は光ファイバケーブル周辺の 5 cm 程度の範囲 (つまり、直径 10 cm 程度の範囲) であることが確認できた。この値は同様な計測を計画または実施する際の計測範囲に関する概略の指標となる。ただし、この計測範囲は実験条件が変わると変化する可能性もあるため、より精度の高い評価が必要な場合にはそれぞれの条件下にて確認する必要がある。

### 参考文献

- Bristow, K.L., R.D. White and G.J. Kluitenberg (1994), Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating, *Aust. J. Soil Res.*, 32, 447-464.
- Müller, H. R., B. Garitte, T. Vogt, S. Köhler, T. Sakaki, H. Weber, T. Spillmann, M. Hertrich, J. Becker, N. Giroud, V. Cloet, N. Diomidis and T. Vietor (2017), Implementation of the Full-scale Emplacement (FE) experiment at the Mont Terri underground research laboratory, *Swiss Journal of Geosciences*, DOI 10.1007/s00015-016-0251-2.

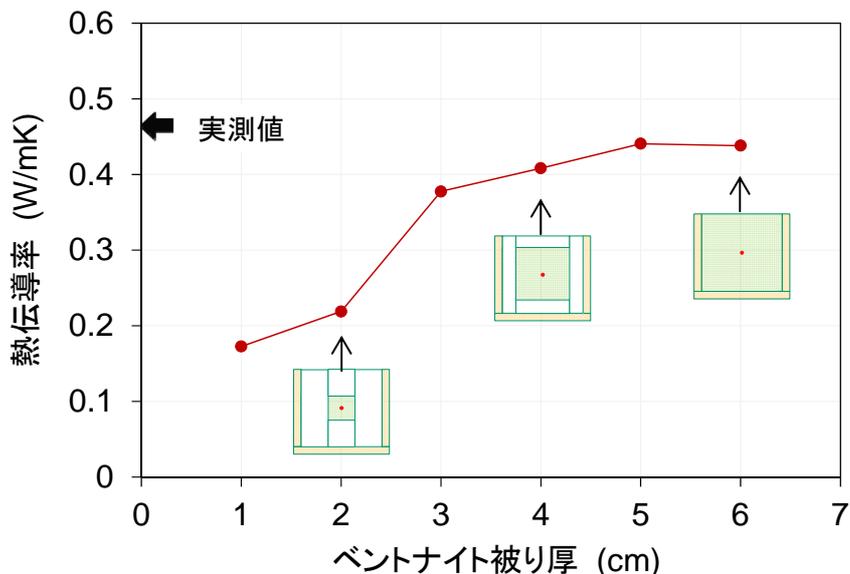


図 2 光ファイバの温度変化より算定した熱伝導率と粒状ベントナイト被り厚の関係。発砲スチロールの厚さは公称値のため、ベントナイト被り厚は水平方向の被りを有効数字 1 桁で表示。図中矢印は同一材料の同一乾燥密度で別途計測した熱伝導率。