

# 堆積軟岩の原位置加熱実験計画 (フェーズⅢ・Ⅳ)

高倉 望<sup>1\*</sup>・岡田 哲実<sup>2</sup>・池野谷 尚史<sup>1</sup>・澤田 昌孝<sup>2</sup>・平野 公平<sup>3</sup>・谷 和夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>東急建設株式会社 土木総本部 土木技術部 (〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14)

<sup>2</sup>財団法人電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>3</sup>株式会社セレス (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646 (財)電力中央研究所内)

<sup>4</sup>国立大学法人横浜国立大学 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 土木工学棟)

\*E-mail:takakura.nozomu@tokyu-cnst.co.jp

堆積軟岩中に放射性廃棄物を処分する場合、廃棄体の発熱による高温状態が地下水や岩盤の挙動に影響を与えることが予測される。そこで深度 50 m の地下空洞内に削孔した  $\phi 30$  cm、深さ 60 cm の円筒状の空洞を、2006 年 8 月から 2008 年 8 月にかけて、最大加熱温度 90°C までの温度変化や変形を計測してきた (フェーズⅠ・Ⅱ)。しかし、安全評価の課題として廃棄体が 100°C 以上になった場合を想定した軟岩の変形特性に関する実験データが得られていない。そこで、本報では加熱温度 100°C 以上の原位置加熱実験計画について報告する。

**Key Words :** radwaste disposal, thermal characteristics, in-situ test, sedimentally soft rock, mud stone,

## 1. はじめに

透水性の低い堆積軟岩を対象とした放射性廃棄物の地層処分の研究が進められている。堆積軟岩は、結晶質岩に比べて長期の変形特性 (クリープ特性) が顕著であり、また、熱や水など外部環境の変化に影響を受け易いことから、外部環境の変化を考慮した堆積軟岩空洞の長期安定性評価手法の確立が望まれている。そこで、筆者らは、高温下における計測技術の確立と原位置での実験データを基に熱-水-応力連成解析コード<sup>1)</sup>の検証を行うため、堆積軟岩中に構築した深度 50 m の地下空間実験場において、高レベル放射性廃棄物処分で想定されている縦置き方式<sup>2)</sup>の約 1/8 サイズの空洞を掘削し、最大加熱温度 90°C までの原位置加熱実験を実施した<sup>3) 4)</sup>。

本論では、安全評価の課題として廃棄体が 100°C 以上になった場合を想定した熱源周辺岩盤の挙動を評価するための原位置加熱実験計画について報告する。

## 2. 全体研究の概要

### (1) 実験サイト

本サイトは、深さ 50 m の立坑および延長 35 m の横坑からなる地下空間実験場である。実験場の概要を図-1 に示す。実験場所は、GL-50 m の位置 (図-1、丸で示した箇



図-1 地下空間実験場の全景

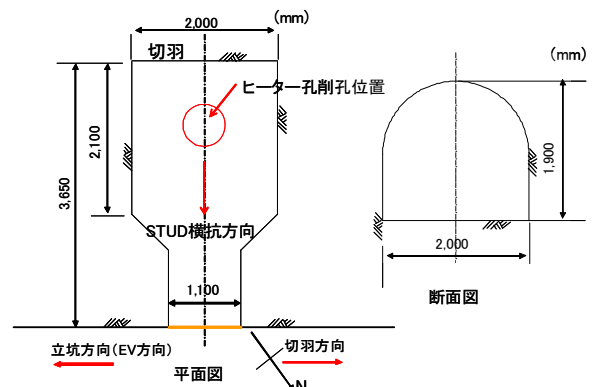


図-2 試験横坑の構造

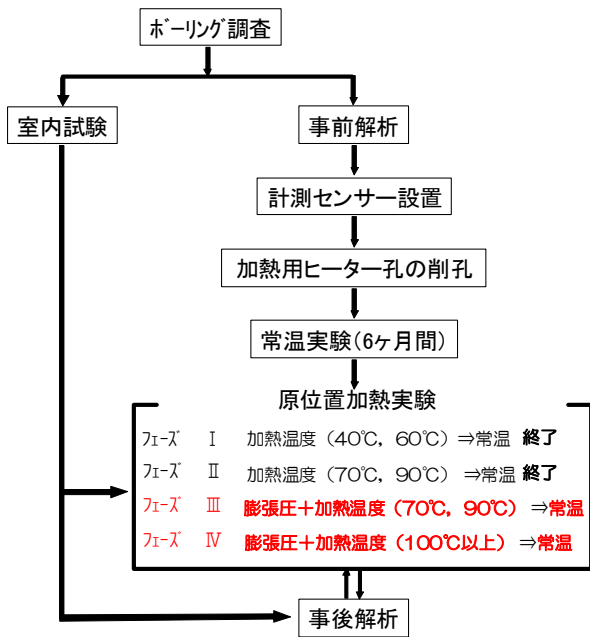


図-3 研究の流れ

所)にある幅1.1~2.0 m, 奥行き3.65 m, 高さ1.9 mの馬蹄形横坑内(以下, 試験横坑と呼ぶ)である(図-2参照)。対象とした地盤は, 新第三紀鮮新世後期から更新世前期の上総層群の泥岩である。概ね均質な泥岩を主体としているが, 未固結な砂層やスコリア層を幾層も介在している。また, 破碎帯がN79W/81SE方向に確認されている。既に得られている泥岩の力学特性は, 湿潤単位体積重量で約20.0 kN/m<sup>3</sup>, 一軸圧縮強さで約5.6 MPa, ヤング率( $E_{50}$ )は平均で約300 MPa, ひずみレベルが0.001%以下のヤング率( $E_{max}$ )で約3,200 MPaである。

### (3) 研究の流れ

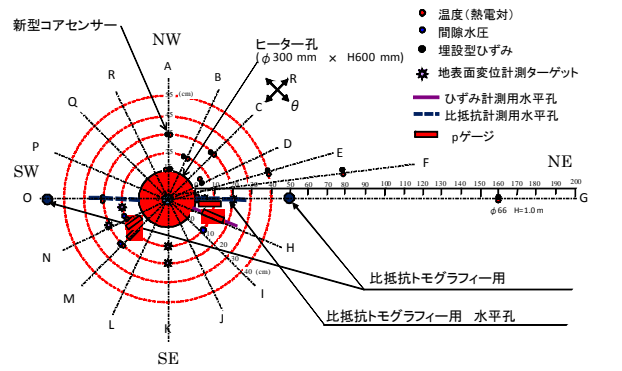
図-3に本研究全体の流れを示す。まず, 試験領域周辺のボーリング調査を実施して, 調査から得られた試験範囲の地層構造やサンプリングしたコアの室試試験の結果を基に事前解析を実施し, 計測センサーおよびヒーター孔( $\phi 300 \times H 600$  mmの円筒空洞)の位置を決定した(図-4参照)。図-4の側面図に示すように, ボーリング調査の結果, ヒーター孔と交差するように厚さ10~15 cm程度の砂層が介在していることが確認されている。

計測センサーを配置した後, ヒーター孔を掘削し, 常温状態で, 6ヵ月間ヒーター孔内およびその周辺岩盤の挙動を計測した後, 原位置加熱実験を実施する。

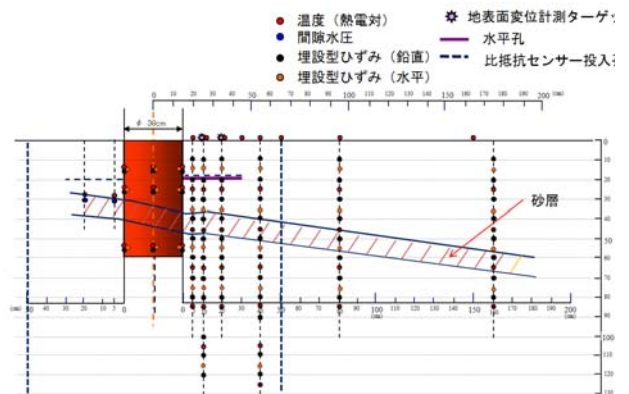
また, 最終目的である熱-水-応力連成解析コードの検証を行うため, 当該サイトの泥岩の高温域の変形特性と水理特性を調べる室内試験, および原位置で泥岩の熱伝導率試験を並行して実施する。

### (4) 計測項目と計測位置

廃棄体ピットを模擬して, GL-50 mの試験横坑の底盤(横坑底盤と略す)に $\phi 300 \times H 600$  mmの空洞を掘削した。これは高レベル放射性廃棄物処分で想定されている



平面図



側面図

図-4 計測項目と計測位置

表-1 研究フェーズの概要

	フェーズI	フェーズII	フェーズIII	フェーズIV
最大加熱温度	60℃	90℃	90℃	150℃
ヒーター構造				
孔壁周辺の水理特性	飽和状態	飽和状態	飽和状態	不飽和状態
孔壁周辺に作用する圧力	静水圧	静水圧	膨張圧(0.05MPa)	膨張圧(0.05MPa)
目標	余裕深度・TRU想定域内での温度の現象把握	高レベル放射性廃棄物想定域内での温度の現象把握	高レベル放射性廃棄物想定域内での温度の現象把握	高レベル放射性廃棄物想定域を超えた温度の現象把握

縦置き方式の約1/8サイズである。

計測項目は, 岩盤中のひずみ, 間隙水圧, 比抵抗, 温度, 試験横坑の底盤の変位と温度である。図-4に事前解析で決定した計測センサーの設置位置を示す。なお, 埋設型センサーは互いが干渉しないように平面上で千鳥状に配置した。

## 3. フェーズIII・IVの原位置加熱実験計画

### (1) 実験の特徴

表-1に本研究全体の実験フェーズの概要を示す。今回計画するフェーズIII・IVでは, 100℃以上の加熱を可能

とし、かつ加熱の途中で孔壁に圧力を負荷できるヒーターを開発した（以下、PM-Heaterと呼ぶ）。このPM-Heaterについては次節で報告する。

処分空洞の施工プロセスを考える上で、孔壁周辺が不飽和領域になることが想定される。そこで、フェーズIVでは、ヒーター孔内に溜まる地下水を常に排水してヒーター孔周辺に不飽和領域を生成する。不飽和領域の生成方法については次節で報告する。

フェーズI・IIでは横坑底盤の境界条件を断熱境界とするため、横坑底盤に断熱材として発泡スチロールを敷き詰めた<sup>3)</sup>。しかし、フェーズIII・IVでは、加熱による横坑底盤の変化を観察するため露頭の状態とする。なお、解析に用いる横坑底盤の境界条件は、温度の計測結果を用いる。

## (2) 新たに実験で用いた装置および計測システム

### a) PM-Heater

PM-Heaterとは、ヒーター孔壁に100°C以上の加熱温度と膨張圧を同時に負荷できるヒーターのことである。図-5にイメージ図を、写真-1にPM-heaterの構成部品を示す。高さ64 cm、外径29.5 cm、厚さ9 mmの鋼管の側面と底面の外側にラバーヒーターを貼り付け、側面のラバーヒーターの外側にシリコンチューブを巻く。膨張圧は、ラバーヒーターとシリコンチューブの間にグリセリン（引火点：177°C）を注入して発生させる。また、熱効率を上げるために鋼管の側面と底盤の内側に断熱材を貼り付ける。

### b) 不飽和領域の作製方法

孔壁周辺の不飽和領域は、ヒーター孔内に浸出する地下水を連続して汲み上げ、ヒーター孔の底盤を水位境界に保つことで作製する。図-5にシステム図を示す。図から2つの電磁三方弁をコントロールすることで、通常は真空ポンプで地下水を汲み上げ、タンクが満タンになる前に溜まった地下水をコンプレッサーで1分以内に排出し、孔壁表面近傍に不飽和領域を作製する。

### c) 温度の影響を極力抑えた地表面沈下計測

フェーズIVでは、試験横坑内の室温が高温になる可能性がある。そのため試験横坑内に設置する変位計を固定する梁（固定梁）が温度変化によって伸縮し、計測値に影響することが懸念される。そこで、固定梁に線膨張係数が $0.3 \sim 0.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と小さいインバー線を用いる。

### d) 3次元の主ひずみが計測できる岩盤ひずみ計測

本研究において、採取したコアにひずみゲージを貼り付け、採取した位置に再び戻して岩盤中のひずみを計測するセンサー（通称、コアセンサー）を開発した<sup>5)</sup>。フェーズIとIIで設置したコアセンサーは、鉛直方向、周方向、半径方向のひずみが計測できる。今回、ひずみゲージの貼り方に工夫を加え、3次元の主ひずみを計測できるコアセンサーに改良した。図-6に新型コアセンサー

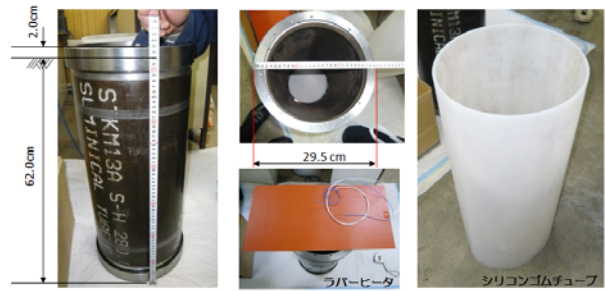


写真-1 PM-Heaterの構成部品

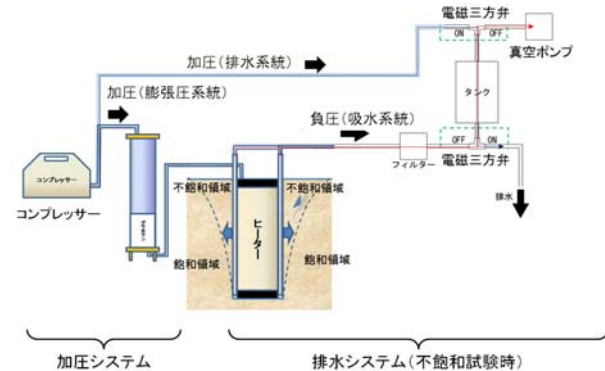


図-5 不飽和領域の作製方法

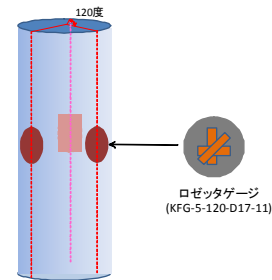


図-6 新型コアセンサーのひずみゲージの貼り方

表-2 フェーズIII・IVの計測項目一覧

	計測項目	センサーおよび使用機器
継続する計測項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>岩盤中のひずみ</li> <li>岩盤中の温度</li> <li>孔壁のひずみ</li> <li>挟み層の間隙水圧</li> <li>底盤の変位</li> <li>底盤の温度</li> <li>加熱中の岩盤の比抵抗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ひずみゲージ(WFLM-30)</li> <li>熱電対(TG-0.65)</li> <li>ひずみゲージ(WFLM-30)</li> <li>間隙水圧計(KPD-200KPA)</li> <li>接触式変位計(CDP-25)</li> <li>熱電対(TG-0.65)</li> </ul>
新たな計測項目	<p>【加熱中】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>孔壁近辺の水平変位</li> <li>孔壁周辺の変形特性変化</li> <li>孔壁周辺の含水比</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>孔壁のひずみ</li> </ul> <p>【加熱後】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>赤外線カメラ撮影</li> <li>底盤の目視観察</li> <li>埋設した間隙水圧計の較正</li> <li>コアセンサーの較正</li> <li>接触型変位計の較正</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>εゲージ(BCD-E-70S)</li> <li>ひずみゲージ(WFLM-30)</li> <li>小口径ボーリングマシン(無水掘り)</li> <li>ひずみゲージ(QFLA-30-11-6FA:高温対応型)</li> <li>NEC三栄 TH9100MV</li> </ul>

のひずみゲージの貼り方を示す。図に示すように、コアの断面上に120度間隔で3枚のロゼッタゲージ（三軸加工ゲージ）を貼る。

## (3) 計測項目

フェーズIII・IVでは、フェーズI・IIの試験結果を基



に計測項目を改良および追加する。表-2に継続する計測項目と新たな計測項目を分けて示す。

継続する計測項目は、底盤の変位を計測する変位計の防水対策を強化したり、 $\pi$ ゲージの計測箇所を増やしたり、孔壁に貼るひずみゲージを高温対応型にしたりして、取得データの信頼性を向上させる。

新たに計測する項目は、加熱中の変形特性、赤外線カメラを用いた底盤の面的な温度分布変化、不飽和領域の評価するためのサンプリングを行う。加熱後は、埋め込んだ間隙水圧計とコアセンサー、および底盤に設置した変位計と $\pi$ ゲージを校正する。ここで、校正するコアセンサーは、孔壁に近接して設置したD孔をオーバーコアリングして採取する。

#### (4) 加熱方法

ヒーターの加熱サイクルタイムを図-7に示す。既に実験が終了したフェーズ I・II では、ヒーターの設定加熱温度を10秒以内に次のStepに上げたことによるひずみゲージへの影響が懸念されたため、フェーズ III・IV では、2日間で次のStepの設定加熱温度まで上昇させ、2日間温度を一定にする4日サイクルで加熱する。なお、新型ヒーターの加熱温度はコンピュータで制御する。

#### 5. おわりに

高温下における計測技術の確立および原位置加熱実験で得られたデータを基に熱-水-応力連成解析コードの検証を行うため、堆積軟岩中に構築した深度50 mの地下空間実験場において、高レベル放射性廃棄物処分で想定されている縦置き方式の約1/8サイズの空洞を掘削し、実験を行なっている。

本論では、安全評価上の課題の一つとなる、熱源が100°C以上になった場合を想定した熱源周辺岩盤の挙動を評価するため、加熱しながら膨張圧を負荷できるヒーターの開発や孔壁周辺の不飽和領域を生成するシステムを構築するなど、施工プロセスを考慮した原位置加熱実験計画について報告した。今後は、高温下での温度補正

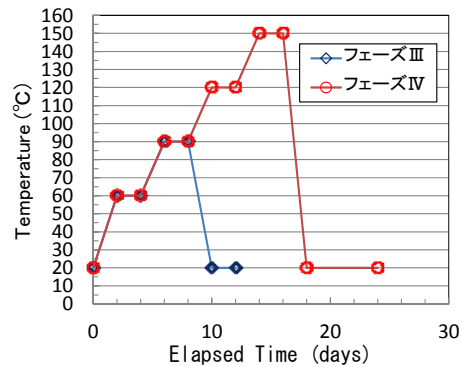


図-7 ヒーターの加熱サイクル

方法を確立し、より精度が高い実験データを取得する。  
謝辞：本実験で製作した新型ヒーターを製作するにあたり、(株)立川機械製作所の立川日出男社長、および立川智勝氏に貴重な助言をいただきました。ここに、心より感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 澤田昌孝, 竹田佳代, 谷和夫, 岡田哲実, 高倉望, 池野谷尚史: 堆積軟岩を対象とした原位置加熱実験の熱-水-応力連成解析による事前検討, 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.283-288, 2008.
- 2) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-総論レポート, JNC-TN1400-99-020, IV-72, 1999.
- 3) 池野谷尚史, 岡田哲実, 高倉望, 澤田昌孝, 平野公平, 谷和夫: 高温下における堆積軟岩の原位置加熱実験 (フェーズ I), 第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, CD-ROM, 2008
- 4) 池野谷尚史, 岡田哲実, 高倉望, 澤田昌孝, 平野公平, 谷和夫: 堆積軟岩の原位置加熱実験 (フェーズ II), 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 投稿中, 2011.
- 5) 高倉望, 池野谷尚史, 岡田哲実, 澤田昌孝, 平賀健史, 平野公平, 谷和夫: ボーリングコアを用いた岩盤中のひずみ計測方法の適用性について, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp.457-458, 2007.

## PLAN OF THE IN-SITU HEATING TEST IN SEDIMENTARY SOFT ROCK (PHASE 3 and PHASE 4)

Nozomu TAKAKURA, Tetsuji OKADA, Masataka SAWADA,  
Takafumi IKENOYA, Kouhei HIRANO and Kazuo TANI

Research has been conducted on high level radioactive waste geological disposal in sedimentary soft rock. One of the research topics is that the long-term mechanical behaviors of soft rock can be affected by various environmental factors such as temperatures and hydraulic conditions. Therefore, thermo-hydro-mechanical coupled analysis in which changes of temperatures, strains and pore pressures in the surrounding rock mass are measured under heating temperatures higher than 100 degrees centigrade.