

高レベル放射性廃棄物処分場の熱－水－応力 長期相互作用を考慮した遠心力模型実験

西本 壮志^{1*}・岡田 哲実¹・澤田 昌孝¹

¹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）

*E-mail: soshi-n@criepi.denken.or.jp

本研究では高レベル放射性廃棄物地層処分場周辺（ニアフィールド）の長期挙動評価のために、遠心力載荷装置を用い、廃棄体の発熱を考慮したニアフィールド模型試験を行った。縮小模型は処分孔を空けた岩盤、ベントナイト、加熱型オーバーパックから成り、地圧相当の応力を負荷し30Gの遠心場において最長80日間実施された。その結果、オーバーパックの変位、ベントナイトの土圧、岩盤のひずみの経時変化は、大局的に見れば発熱を考慮しない既往実験と類似した傾向が見られた。一方で、廃棄体の発熱にともない発生する水の蒸発に伴い間隙流量率が変化し、実験終了後のX線CT撮影からベントナイトが規定の飽和密度に達していないといった諸現象が観察され、廃棄体の周辺に不飽和領域が形成された可能性がある。

Key Words : centrifugal model test, high-level radioactive waste, long-term behavior, THM coupling

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分場周辺（ニアフィールド）では、廃棄体の発熱、地下水の再冠水、ベントナイト緩衝材・埋戻し材の膨潤・変形、岩盤の変形といった挙動が長期間にわたり複合連成作用を生じる極めて複雑な環境下にある。加えて金属製の収納容器（オーバーパック）、粘土のベントナイト緩衝材、それらを封入する岩盤という異種複合材料で構成される。このため、処分孔や坑道の安定問題や廃棄体の支持性、核種移行経路に影響を及ぼしうる緩衝材や周辺岩盤の長期挙動を評価し、施設の安全評価の信頼性向上を図る必要がある。

一般に、実規模実証試験の実施やその結果と数値解析によるヒストリーマッチングは有効な評価手段の一つである¹⁾。一方、ニアフィールドの数百年～数千年にわたる長期挙動評価のために、実規模試験を実施できる期間には限りがあり、数値解析モデルやパラメーターの妥当性の検証を別途考える必要がある。

遠心力場における相似則を利用した遠心力模型実験は、実物と縮尺模型の応力の対応が良く力学的・水理的挙動も実物に近い。また、透水現象に伴う諸挙動の時間加速の効果により、遠心力模型実験を行うことでニアフィールドの長期挙動を再現・評価できる可能性がある。

西本ほか²⁾ではこの点に着目し、長期運転が可能な遠

心力載荷装置を用い、模擬廃棄体（オーバーパック）、処分孔、ベントナイト緩衝材、岩盤から成る廃棄体周辺模型を用いて、30Gの遠心力場において最長2ヶ月（実物換算時間約165年相当）の模型実験を行った。実験は、拘束圧（地圧、 P_0 ）をパラメータとした応力拘束条件下（2～10MPa）において実施された。その結果、処分孔の変形を考慮しない既往のひずみ拘束条件下の遠心力模型実験結果³⁾と異なり、オーバーパックの変位量、緩衝材の土圧が拘束圧に応じて変化し、かつ同実験の期間内において収束しないことが分かった。すなわち地圧と時間経過に応じた岩盤の変形挙動と緩衝材の膨潤変形挙動の力学的相互作用によって、オーバーパックの変位量、緩衝材の土圧が地圧依存性・時間依存性を生じることを実験的に明らかにした。

一方で、西本ほか²⁾は温度の境界条件が25℃に設定され、廃棄体からの発熱は考慮されていない「水－応力連成」模型実験である。廃棄体は、処分孔埋設時には90℃程度であるために、地下水の蒸発や緩衝材や周辺岩盤の熱変形、熱膨張による水圧発生の可能性がある。

そこで本研究では、加熱可能な模擬オーバーパックを用い、廃棄体の発熱と境界温度を考慮した「熱－水－応力連成」の遠心力模型実験を行った。これにより、より実物に近い条件におけるニアフィールドの長期力学的挙動データの取得を行う。

2. 遠心力模型実験

(1) 遠心力場での相似則

遠心力模型実験において実物と模型が同じ材料であるとした場合、ニアフィールドは岩盤・土と間隙流体からなる二相混合体と考えることができる。このため熱・水・応力に関連するパラメータの静的場における相似率は表-1のようになる。詳細については、既報を参照されたい⁴⁾。従って、実寸法の $1/N$ の模型を遠心力载荷装置により N 倍の重力加速度場に置けば、相似則を満たし且つ透水現象に伴う諸力学的挙動は N^2 倍に加速される(表-1)。例えば $N=30$ として1ヶ月間の実験を行なえば約76.5年相当の力学的挙動を評価できることになる。

(2) 想定した施設およびその模型

本研究で用いたニアフィールド模型は、廃棄体周辺を抽出したものである。すなわち、処分孔内の緩衝材・廃棄体と廃棄体周辺の岩盤から構成される縮小模型である(図-1)。この模型は、電中研・電事連共同研究報告書⁹⁾において提案されているオーバーパックや処分孔サイズの約 $1/30$ の大きさである。

加熱型オーバーパックは全密度が 6.16g/cm^3 となるようにステンレス鋼材(SUS430)に小型ヒーター(200V-1.2A)を封入した。緩衝材は圧縮ベントナイト(クニゲルV1)を用い、初期乾燥密度は 1.74g/cm^3 (膨潤後平均密度を 1.55g/cm^3)になるように圧縮した。周辺岩盤は $\phi 180\text{mm} \times$ 高さ 180mm の円柱状で、軟岩サイトを想定し均質・安価で容易に入手可能な田下凝灰岩を使用した。田下凝灰岩の乾燥密度、湿潤密度はそれぞれ、約 1.7g/cm^3 、 2.0g/cm^3 であり、一軸圧縮強さは $15 \sim 33\text{MPa}$ (気乾)および $8 \sim 16\text{MPa}$ (湿潤)である⁹⁾。

(3) 遠心力载荷装置

本研究では、最長6ヶ月連続運転可能な「超長期遠心载荷岩盤実験装置」("CENTURY5000-THM")を使用した(図-2)⁴⁾。本装置は、回転アームが4柱ビーム式、最大有効回転半径 3.2m の装置であり、直径約 10m のコンクリートピット内に格納されている。付与できる最大遠心加速度は静的条件で 100G (167.2rpm)である。模型を搭載するプラットフォーム面積は 2.64m^2 ($1.60\text{m} \times 1.65\text{m}$)、最大積載可能量は $150\text{G} \cdot \text{ton}$ である。回転軸には動力・制御用スリップリング、通信用無線LAN、油圧・水圧・空圧用ロータリージョイントが設置されており、機外から回転体内部へ電力や油圧等が供給される。また、圧力容器の応力制御のために、回転軸付近のアーム上面に増圧機4台、プラットフォームには加熱型オーバーパックの温度コントロールユニットを搭載している。増圧機・加熱型オーバーパックの制御および実験データは無線LANを通じ

表-1 静的条件における遠心力場の相似率。

物理量	model/prototype	相似率
長さ	l_m/l	$1/N$
面積	A_m/A	$1/N^2$
体積	V_m/V	$1/N^3$
応力	σ_m/σ	1
ヤング率	E_m/E	1
弾性ひずみ	$\varepsilon_{em}/\varepsilon_e$	1
温度	T_m/T	1
間隙流体の粘性	η_{wm}/η_w	1
間隙流体の速度	u_m/u	N
時間	t_m/t	$1/N^2$

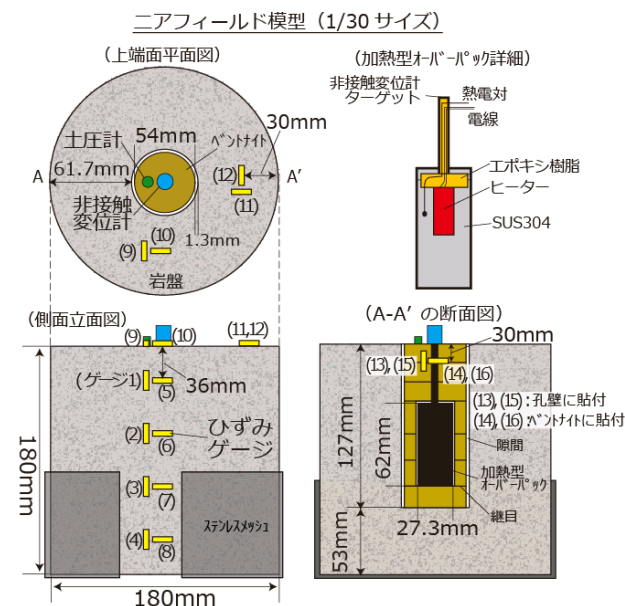


図-1 ニアフィールド模型およびセンサーレイアウト。



図-2 本実験で用いた遠心力载荷装置の写真。

て計測室内のPCで随時制御・保存する。

(4) 圧力容器

本研究では廃棄体周辺を抽出した縮小模型を用いるため、模型に地圧相当の応力を負荷する必要がある。このため図-3に示すような圧力容器を用いた⁴⁾。本圧力容器は周圧を水圧、軸圧をピストン構造によって負荷する三軸タイプで、最大 10MPa の等方圧を負荷できる。圧力容

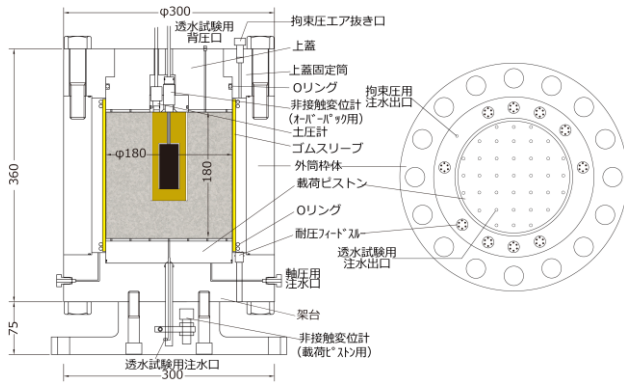


図-3 本研究で用いた圧力容器の概要図。

器の下端・上端にそれぞれ注水・排水ポートが設けられており、模型にゴムスリーブを被覆することで間隙水の注入が可能である。容器内部下端には、貫通孔式耐圧フイードスルーが設置され、ひずみゲージ、熱電対、加熱型オーバーパックの電線を通し、ロガー、温度コントロールユニットに接続する。容器上蓋内部には非接触変位計と土圧計が組み込まれており、ロガーに接続する。

(5) 実験条件

実験条件は、遠心加速度30G、6MPa（試料No. TG-17）、10MPa（TG-19）の等方圧の応力拘束条件で、それぞれ深度300m、500mを想定した。オーバーパックの温度は既往の数値解析結果⁷⁾を参考に95℃一定、岩盤の境界温度は平均的な地温勾配（2℃/100m）⁸⁾からそれぞれ31、35℃一定に設定した。模型への注水圧は拘束圧の半分、背圧は0.5MPaで一定制御し（排水条件）、模型下面より注水した。模型下半分側面にはステンレスメッシュが被覆されているため（図-1）、模型下面および下半分側面より模型に水が流入する。なお、本実験は静的実験のため、相似則上、実物と模型の流入流体の粘性が同一である必要があることから、間隙流体は蒸留水とした。

実験手順は、乾燥状態の模型を圧力容器に設置した後、ピット内を所定の温度に設定、拘束圧を付与した。圧密による岩盤のひずみがほぼ収束した後に遠心加速度を付与し、所定の遠心加速度に到達した後、オーバーパックの加熱（50℃/h）と注水（1MPa/h）を開始した。実験期間は最長80日（実物換算時間約200年相当）で、模擬オーバーパックの変位量、ベントナイトの土圧、岩盤のひずみおよび温度を計測した。なお、Gauge1～8、10、12、13は測温機能付きひずみゲージ（以下、測温ゲージ。ゲージナンバーの後ろに“T”をつけて示す）であり、これにより模型の温度を測定した（図-1）。また、加熱型オーバーパック内部には熱電対が埋め込まれており、温度の制御・計測を行う。

3. 結果および考察

(1) 結果

以下に、本模型実験で得られた結果を示す。なお図において、模擬オーバーパック変位量のプラスは浮上、マイナスは沈下、ひずみのプラスは膨張、マイナスは圧縮を示す。ベントナイトの土圧は計測された土圧から背圧を差し引いたものである。図の下横軸は実験経過時間（対数）、上横軸は相似則による実物換算時間（対数）、図の値はオーバーパックの加熱と注水開始点を原点（0時間）としてプロットしてある。特に断りのない限り実験経過時間を用いて記述する。

a) 岩盤の温度

図-4に例としてTG-19の加熱型オーバーパックおよび測温ゲージの温度の経時変化を示す。実験開始後、測温ゲージの温度は1℃程度の緩やかな上昇を計測した。これは遠心装置回転における空気との摩擦熱による温度上昇と考えられる。約10時間経過時点ではほとんどの測温ゲージにおいてほぼ一定値を示した。約30時間経過時以降から再び温度上昇が計測された。Gauge1T～4Tに注目すると、加熱型オーバーパックからの距離が近い測温ゲージがより温度が高いため、オーバーパックから発せられた熱による温度上昇と考えられる。また約100時間経過時以降は一定の温度を計測した。Gauge10T、13Tについ

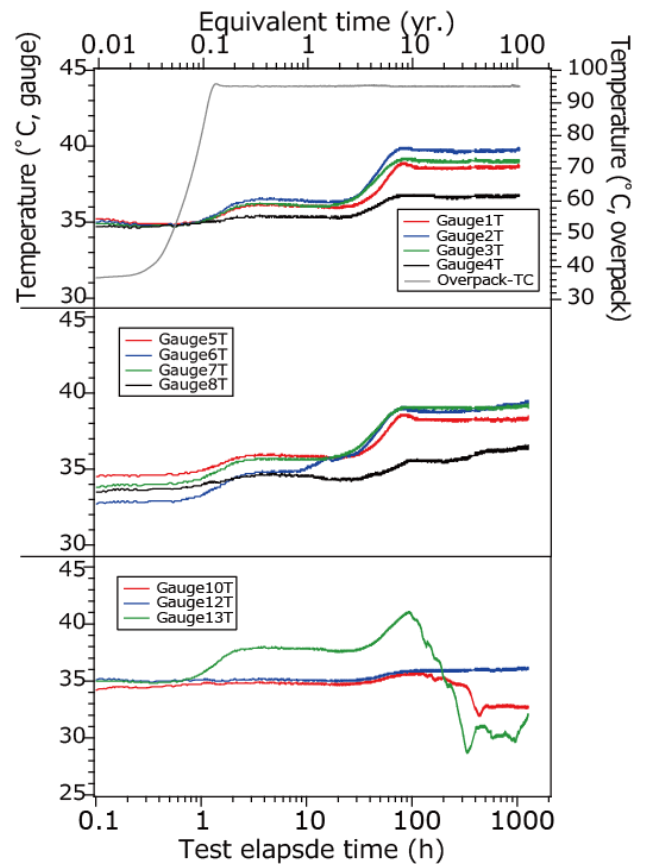


図-4 オーバーパックの熱電対および測温ゲージで計測された温度の経時変化。

ては急劇な変化が計測されているが、原因は不明である。

b) 模擬オーバーパック変位

図-5(上)に模擬オーバーパックの変位量を示す。本図では、左縦軸が計測変位量、右縦軸が相似則による実物換算変位量を示す。合わせて類似の拘束圧条件の既往研究²⁾の結果もプロットした。

本研究で得られた模擬オーバーパックの変位量は、既往研究²⁾と同様に、約10時間経過時点までに緩やかな自重などの影響と考えられる沈下が見られた。その後、ベントナイトの膨張に伴い急激に浮上し、約30時間経過時点で極値を計測した。極値を計測した後は緩やかな沈下傾向を示した。一方で、約数百時間経過時点以降は浮上傾向に転じ、細かな浮上・沈下挙動を繰り返しながら実験終了時まで浮上傾向を示した。

c) ベントナイトの土圧

ベントナイトの土圧は、実験開始から約100時間は変化しなかった(図-5下)。その後ベントナイトの膨張による影響と考えられる土圧の急激な上昇が計測された。一方で、約200時間経過時点以降は緩やかに上昇を続け、極大値を計測し、以降、土圧は減少に転じた。

d) 岩盤のひずみ

図-6に例としてTG-19のひずみ計測の結果を示す。岩盤側面に貼付したひずみ(図-6上、中上)は、注水開始後、約10時間程度経過した時点でGauge4, 8が急激な膨張を示し、その後緩やかな膨張傾向を示した。その他のひずみゲージも同様に、注水側に近い側のゲージから順に、一定時間経過後に急激に膨張を計測した。これらの経時変化は西本ほか²⁾と調和的で、注入水の水位線の移動挙動をとらえていると考えられる。その後更に膨張ひ

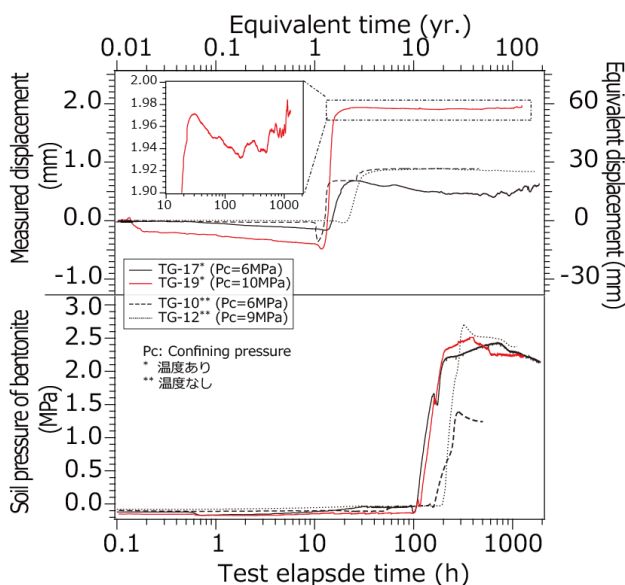


図-5 本研究および西本ほか²⁾の模擬オーバーパックの変位量(上)およびベントナイトの土圧(下)の経時変化。

ずみが計測され、上端面に近いゲージ(図-1参照)ほど膨張勾配が大きい結果が得られた。極値を計測した後、圧縮傾向に転じている。

模型上端面貼付したゲージ(Gauge9, 10, 12)の計測結果(図-6中下)では、約100時間経過後からほぼ同時に急激な膨張を示し、極大値を計測後には圧縮に転じた。また、処分孔内のGauge13, 14も同様に急劇な膨張後、極大値を計測し、その後は圧縮傾向に転じている(図-6下)。なお、Gauge11およびGauge15, 16は断線によりデータが得られなかった。

(2) 考察

西本ほか²⁾ではオーバーパックの発熱を考慮していない実験(以下、非加熱実験)であるが、本実験と同様の等方応力拘束圧条件の遠心力模型実験においてオーバーパックの変位量、ベントナイトの土圧、岩盤のひずみの

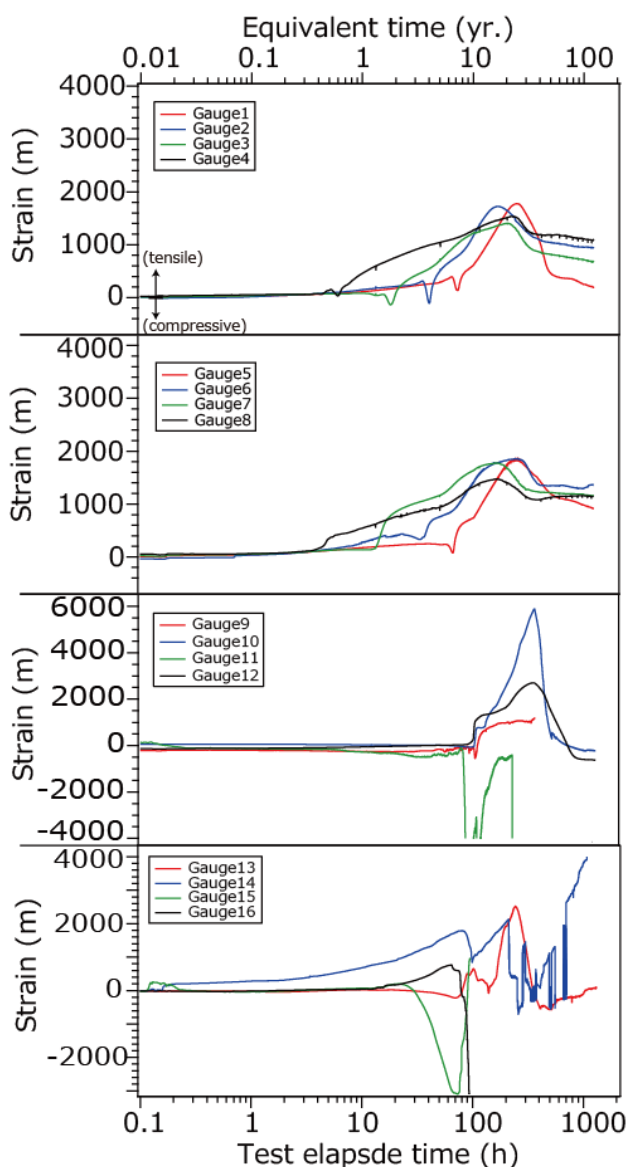


図-6 ひずみの経時変化。ゲージの貼付位置は図-1を参照されたい。

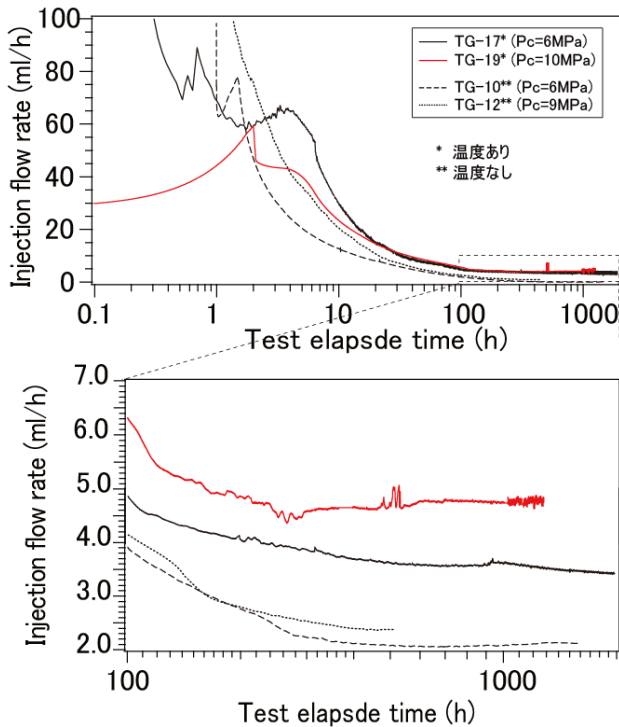


図-7 本研究および西本ほか³⁾における単位時間あたりの注水流量の経時変化（上），および100時間経過時以降の拡大図（下）。

長期挙動を計測している。

廃棄体の発熱を考慮した本実験の結果は、大局的には非加熱実験の結果に類似している。一方で、オーバーバックの変位においては極大値以降の沈下から再浮上、ベントナイトの土圧においては極大値前後の挙動、ひずみにおいては実験開始直後の漸増や極大値以降の圧縮傾向など、明らかに異なる挙動も計測されている。

本実験において、オーバーバックの温度は実験を通じて95℃一定に制御されている。測温ゲージの温度は、実験開始初期の遠心装置の回転による摩擦熱やオーバーバックの加熱に伴い、速やかに一定値に達している。実験初期においてひずみの漸増が認められ（例えば図-6上・中上）、非加熱実験においてはこの漸増は認められなかったことから、オーバーバックの加熱による岩盤の熱膨張の影響と考えられる。また、Gauge1～8において、空気－水置換による膨張ひずみ発生後の経時変化に注目すると、注水側から排水側のゲージに向かい順に膨張の極大値を計測し、その後大きく圧縮に転じている。かつ、その極大値は排水側ほど大きい傾向がある。加えて、このひずみの極大値以降において、オーバーバックの変位が沈下から浮上、ベントナイト土圧が増加から減少傾向へ変化している（以降、再変化点）。

図-7に本実験および非加熱実験における単位時間あたりの注水流量（流量率）の経時変化を示す。実験初期の流量率の急激な変化は、いずれも注水圧を規定の圧力ま

で上昇させる際の水の圧縮による影響である。本実験と非加熱実験で若干挙動が異なるのは、非加熱実験では制御プログラムの問題で流量率の最小制御値が0.1MPa/minであり、規定値到達時間が本実験よりも早いためである（本実験は1MPa/h）。この点を除けば規定圧到達後は、いずれも同程度の指数関数的な低下を示した。一方で、本実験は流量率の絶対値が大きく（図-7下）、かつオーバーバックの変位量やベントナイト土圧の再変化点の前後で、流量率も一時的な減少から横ばい傾向に変化している。

本研究ではオーバーバックを95℃に設定していることから水の蒸発が考えられる。温度の高いベントナイト周辺では周辺岩盤に比べ相対的により多く（高い）の水蒸気（圧）が発生することから、ベントナイトへの水の浸潤がより困難になり、岩盤部を優先的に通水することが考えられる。これによりベントナイトが不飽和になる可能性がある。

図-8に実験終了後に行ったX線CT撮影から得られたTG-19のCT値の例を示す。比較のため非加熱実験のTG-12の結果も併せて示す。非加熱実験では岩盤、ベントナイトともに想定飽和密度に達している。一方で本実験においては、オーバーバックに向かいCT値（密度）の

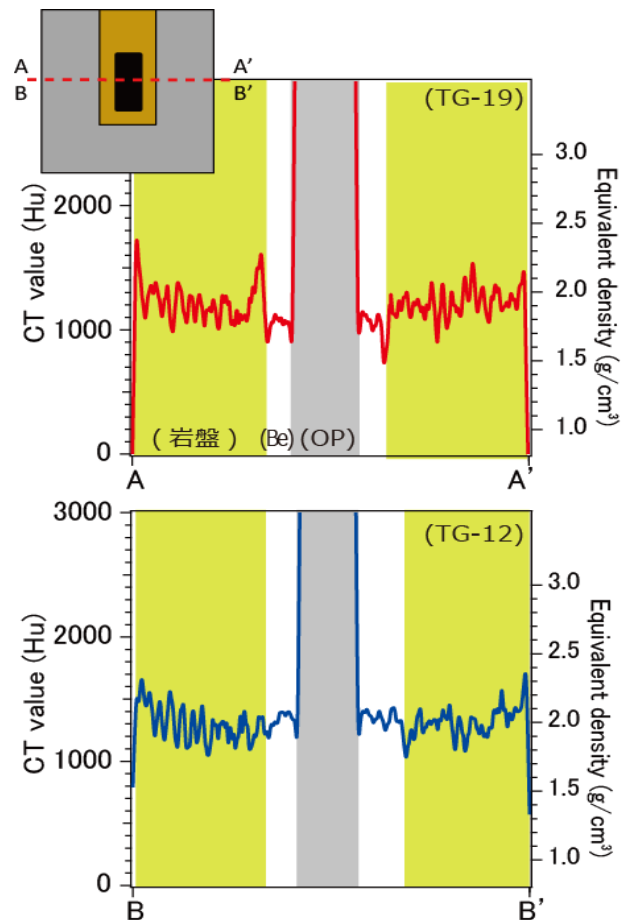


図-8 本研究および既往研究³⁾にCT値の比較。Be：ベントナイト，OP：オーバーバック。

低下が認められる。中心部ほど温度が高いため、廃棄体の周辺では不飽和領域が分布している可能性がある。また、岩盤部を優先的に通水する可能性があることから、模型全体の透水係数が相対的に上昇する可能性がある。これにより注水の流量率が変化し、オーバーパックやベントナイトの土圧の経時変化に影響を及ぼすことが指摘される。

4. まとめ

高レベル放射性廃棄物処分ニアフィールドの長期力学挙動を把握するために、本研究では、加熱可能な模擬オーバーパックを用い、「熱-水-応力連成」の遠心力模型実験を行った。

(1) 計測されたオーバーパックの変位、ベントナイトの土圧、岩盤のひずみは、大局的に見れば非加熱実験の結果と類似していた。

(2) 一方で、廃棄体の発熱にともなう水の蒸発の影響と思われる流量率の変化や実験終了後のX線CT撮影で得られた密度の低下といった諸現象が観察され、明らかに非加熱実験²⁾と異なる計測結果を得た。

現在、「熱-水-応力連成」の遠心力模型実験は本報で報告した2条件のみにとどまっている。このため今後は応力条件を変え、さらなる実験データの蓄積を行う予定である。

謝辞：本研究を行うに当たり、(株)ジオデザイン・荒井郁岳氏には実験業務に協力して頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 澤田昌孝, 岡田哲実, 西本壮志: スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル放射性廃棄物処分のための国際共同研究(その 10)ーベントナイトの膨潤挙動に伴う密度変化の数値解析による予測ー, 電力中央研究所研究報告書, N09020, 2010.
- 2) 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝: 遠心力载荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その 2)ーニアフィールド模型試験法の確立と等方応力拘束条件下における長期挙動ー, 電力中央研究所研究報告書, N11040, 2012.
- 3) 中村邦彦, 田中幸久: ベントナイトの種類と密度がオーバーパックの沈下量に与える影響, 土木学会論文集 C, 65, 1, pp.85-96, 2009.
- 4) 西本壮志, 岡田哲実, 澤田昌孝: 遠心力载荷装置を用いた高レベル放射性廃棄物処分場周辺の長期挙動評価(その 1)ー超長期遠心载荷岩盤実験装置と遠心力模型試験法の開発ー, 電力中央研究所研究報告書, N10018, 2011.
- 5) 電力中央研究所, 電気事業連合会: 高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術(概要版), p.195, 1999.
- 6) 大久保誠介, 秋哲淵: 気乾状態と湿潤状態での田下凝灰岩ならびに大谷凝灰岩の一軸圧縮クリープ, 材料, 43, pp.849-825, 1994.
- 7) 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ー地層処分研究開発第2次取りまとめー 分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-22, 1999.
- 8) 田中明子, 山野誠, 矢野雄策, 笹田政克: 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース, 数値地質図 DGM P- 5, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2004.

CENTRIFUGAL MODEL TEST FOR EVALUATION OF LONG-TERM BEHAVIOR IN HLW NEAR-FIELD UNDER COUPLED T-H-M CONDITION

Soshi NISHIMOTO, Tetsuji OKADA and Masataka SAWADA

The objective of this paper is to evaluate the long term behavior of HLW near-field under the coupled thermo-hydraulic-mechanical condition by the centrifugal model test. The model consists of the rock mass, bentonite buffer and heating-type model overpack. The centrifugal model tests were conducted at 30 G under the confining pressures upto 80 days. A similar result to the previous experiments without the heating of overpack was obtained in the trend of the present result. By contrast, the sudden flow rate of the pore water changed by evaporating for heat generation of overpack, and bentonite in the post-tests did not saturate from the images of X-ray CT. Therefore, there is a possibility that the unsaturated zone is formed around the overpack.