

緩衝材大型試験設備 (BIG-BEN) における熱-水-応力連成試験†

茂呂吉司 ††

藤田朝雄 ††

菅野 毅 ††

小林 晃 †††

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア内の力学的挙動には廃棄体からの発熱、周辺岩盤からの地下水の浸入、地下水の浸入による緩衝材の膨潤圧の発生、周辺岩盤の地圧変化などの現象が相互に影響していることが予測される。このような熱-水-応力連成現象を評価することは、性能評価研究におけるニアフィールド環境の明確化の観点からすると重要な課題の1つである。

緩衝材大型試験設備 (Big-Bentnite facility; 以降 Big-Ben と呼ぶ。図 1 に全体の概要を示す。) は緩衝材中の基本的な熱-水-応力連成現象を観察し、解析モデルの開発・検証に資するとともに、緩衝材の施工性を確認することを目的に、平成 2 年 3 月製作された。Big-Ben はこれまでに、加熱試験と部分注水試験を実施している [1~3]。加熱試験は、圧縮成型した緩衝材ブロックの設置後に注水を行わずにヒータによる加熱のみを行ったもので、ブロック方式による緩衝材の施工性、ヒータの発熱による人工バリア中の伝熱状況、温度勾配を持つ緩衝材中での水分移動等に関するデータを得ている。加熱試験に引き続き実施した部分注水試験では、加熱試験で温度勾配の生じた緩衝材中に人工岩盤に設けた人工亀裂より注水し、ブロック方式による緩衝材の接合面の止水性、注水による浸潤状況の変化、膨潤圧の発生状況等についてのデータを得ている。

現在は、加熱・全面注水試験を実施することにより、上記の試験の結果を踏まえ、原位置締固め方式による緩衝材の施工性を確認するとともに、温度勾配が発生する過程での緩衝材の浸潤状況、膨潤圧の発生状況等を明らかにすることを目的としている。試験は、平成 4 年 3~4 月に原位置締固め方式による緩衝材の充填、センサーの

設置及び装置の改造等を行い、平成 4 年 4 月 27 日より加熱・注水を開始し、温度勾配の生じた緩衝材中での水分移動と膨潤圧の発生等に関して計測を実施中である。

ここでは、全面注水試験開始後 5 か月迄の試験データを紹介するとともに、連成解析結果を報告する。

2. 試験設備

Big-Ben は図 1 に示すように人工岩盤 (コンクリート)、緩衝材、オーバーバック、ヒータからなる。オーバーバックは炭素鋼から出来ており、その中にはガラス固化体を模してガラスビーズを充填し、廃棄体から発生する熱を表現するためにその中心にヒータを設置した。図 2 に加熱・注水試験の緩衝材設置状況を示す。緩衝材と人工岩盤の間に透水マットを介させた注水層 (厚さ 3 cm、珪砂充填) を設け、岩盤から緩衝材に均一に浸水するように配慮している。また、緩衝材締固め後に設置したオーバーバックと緩衝材との隙間にも珪砂を充填した。

緩衝材の材料には、ベントナイト (クニゲル V1、クニミネ工業製) と珪砂 (3 号、5 号) の重量比を 7:3、含水比を $16.5 \pm 1.0[\%]$ に調合したものをを用い、一層毎の締固め厚さと締固め時間を管理して緩衝材の乾燥密度が $1.6[\text{g}/\text{cm}^3]$ となるよう人力による振動タンパーと電動タンピングランマーで原位置にて締固めを行ない設置した。また、各層ごとに出来高測定を行い、各層の体積と充填した緩衝材の重量から密度を求め、施工精度を確認しながら行なった。

Big-Ben 中の各種データを取得するために表 1 に示すような各種センサーを設置した。

加熱はヒータを 0.8 kW の出力で一定にセットし、注水は緩衝材部分を取り巻く透水マット全面から均一に $0.5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ の水圧で全面注水を行なった。

3. 計測結果

3.1 温度分布

図 3 に G.L.-3.0m (ヒータの中心部の深さ) での温度

† Full-Scale Test on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes in Engineered Barrier System, by Yoshiji Moro, Tomoo Fujita, Takeshi Kanno, and Akira Kobayashi

†† 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所 Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

††† 岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate Univ.

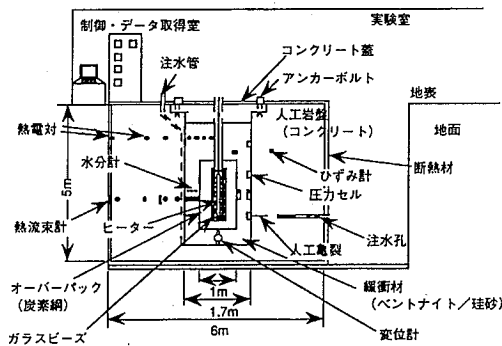


図1 緩衝材大型試験設備 (BIG-BEN) の全体図

表1 計測センサーの一覧

項目	計測対象	センサー	点数
温度	ヒーター、オーバーバック、緩衝材、人工岩盤	熱電対	139ch
熱流束	オーバーバック、人工岩盤	熱流束計	13ch
含水比	緩衝材	比抵抗式水分計、ヒートプローブ、高分子膜湿度計、サイクロメータ	38ch
沈下量	オーバーバック	変位計	1ch
ひずみ	人工岩盤	ひずみ計 (鉄筋に設置)	12ch
膨潤圧	緩衝材	圧力セル	20ch
応力	緩衝材	圧力セル	4ch
間隙水圧	緩衝材	間隙水圧計	2ch
水圧	注水管	圧力計	1ch

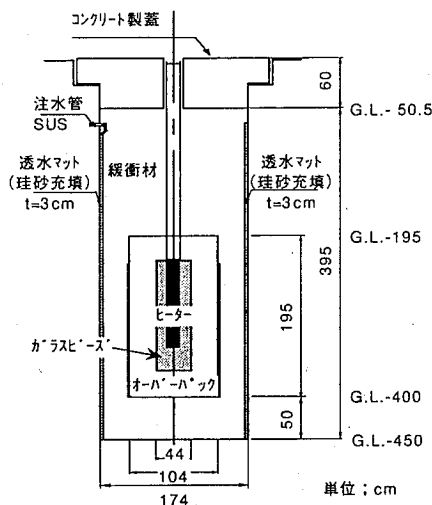


図2 緩衝材設置状況

分布の経時変化を示す。図4に鉛直断面での5ヶ月後の温度分布を示す。各部の温度は、ヒーターの温度が約20日後に一定になった後も緩やかに増加した。

3.2 水分分布

今回の試験では、注水・加熱に伴う水分の変化を計測するためにサイクロメータ、抵抗式水分計に加え、試験的に、ヒートプローブ、高分子膜湿度計を応用した水分計を緩衝材中に設置した。設置前に各々の較正試験を行ない、その較正式を基に含水比を算出した。

サイクロメータの測定値 (化学ポテンシャルの低下量)

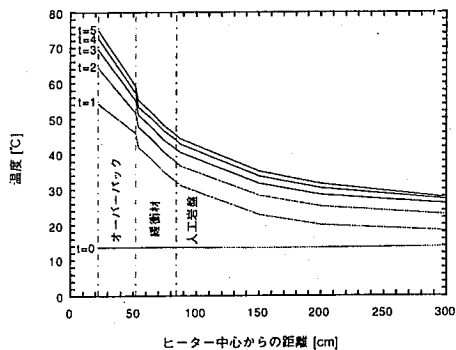


図3 温度分布の経時変化。(t: 経過月数)

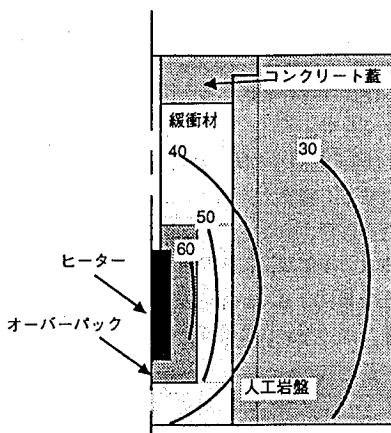


図4 鉛直断面の温度分布 (5か月後、単位: °C)

から算出した G.L.-3.0m (ヒーターの中心部の深さ) での

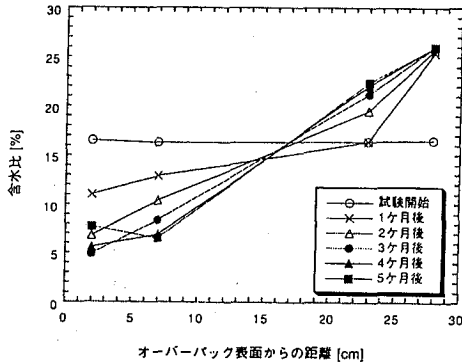


図 5 緩衝材中の含水比分布の経時変化 (サイクロメータによる測定)

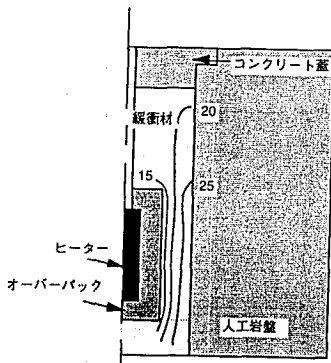


図 6 鉛直断面の含水比分布 (5 か月後、単位: %) (サンプルリングによる測定)

含水比分布の経時変化を図 5 に示す。また、より詳細な評価を行なうために 5 ヶ月経過後、加熱、注水を停止し緩衝材部分にボーリングによるサンプリングを施し、含水比の測定を行なった。その結果から得られた Big-Ben の鉛直断面の含水比分布を図 6 に示す。図 5 から分かるように、オーバーバック周囲の温度の高い部分で含水比が減少し、人工岩盤側では含水比が増加している。

3.3 膨潤圧

図-7 に各深度における試験孔壁面および試験孔底 (G.L.-4.5m)、コンクリート蓋 (G.L.-0m) での膨潤圧の測定結果を示す。試験孔壁面に取り付けた圧力セルに作用する膨潤圧は徐々に増加している。一方、試験孔底

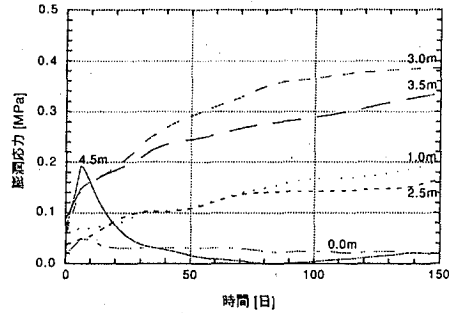


図 7 緩衝材の膨潤圧力の経時変化

及びコンクリート蓋に取り付けた土圧計では、注水開始直後に膨潤圧が発生した後、圧力は減少した。

今回の試験では、締め乾燥密度 $\gamma_d = 1.6 [g/cm^3]$ で、最大 $5 [kgf/cm^2]$ の膨潤圧が発生しており、室内試験でも同じ乾燥密度では約 $5 [kgf/cm^2]$ の膨潤圧が発生している。

4. 解析

4.1 支配方程式

今回の解析では、水分移動を蒸気水は水分拡散、液状水はダルシー則によって表現している。また、今回の解析で用いる THAMES[4] は、熱-水-応力連成解析コードで、未知数が全水頭、変位、温度であるので、蒸気水の水分拡散係数に水分勾配を乗じることによって表わされる水分移動を、蒸気水の水分拡散係数 $D_{\theta vij}$ に $\frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ を乗じて、水分勾配の代わりに圧力勾配で移動する式を用いる。その他、式 (1) の左辺第二項に示すように、温度勾配で水分移動する項を、通常の THAMES で用いている地下水の連続式に加えている。今回、解析に用いた支配方程式は、以下の様である。

$$\left\{ D_{\theta vij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,j} - z_{,j}) + \frac{k_{satij} K_r}{\mu} h_{,j} \right\}_{,i} + \{ D_T T_{,i} \}_{,i} - \rho_f n S_r \rho_f g \beta_p \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_f C(\psi) \frac{\partial h}{\partial t} - \rho_f S_r \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + \rho_f n S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここで、 k_{satij} は飽和透水係数テンソル、 K_r は不飽和領域の透水性の飽和領域のそれに対する比である比透水係数、 μ は動粘性係数、 D_T は温度勾配による水分移動に

関する係数である。 $\frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ は不飽和水分特性から求められる係数で、 θ は体積含水率、 ψ はポテンシャルである。 ρ_{f0} は初期状態の地下水の密度、 n は間隙率、 S_r は飽和度、 β_p は水の圧縮係数、 $C(\psi)$ は比貯留係数で $\frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ で表される。 β_T は水の熱膨張係数である。 u_i は変位ベクトル、 T は温度、 h は全水頭である。

また、エネルギーの保存則は以下で表される。

$$\begin{aligned} (\rho C_v)_m \frac{\partial T}{\partial t} + n S_r \rho_f C_{vf} V_{fi} T_{,i} - K_{Tm} T_{,ii} \\ + \rho_f H D_{\theta vij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,j} - z_{,j}) \\ + n S_r T \frac{\beta_T}{\beta_p} \left\{ D_{\theta ij} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} (h_{,j} - z_{,j}) \right\}_{,i} \\ + \frac{1}{2} (1-n) \beta_T \frac{\partial}{\partial T} (u_{i,j} + u_{j,i}) = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 $(\rho C_v)_m$ は水と骨格粒子からなる場の比熱、 C_{vf} は流体の比熱、 K_{Tm} は水と骨格粒子からなる場の熱伝導係数である。 H が単位質量あたりの水の蒸発潜熱である。

また、検討の主目的が水分移動現象の把握であるので、解析の収束性を向上させるために変形は考慮せずに解析を行なう。すなわち、全領域で変位をゼロに固定し、水分移動、熱移動に着目した解析を行なう。

4.2. パラメータ

4.2.1 温度勾配による水分拡散係数

一般に温度勾配による水分拡散係数 D_T の評価は簡単ではない。そこで、水分拡散係数 D_T を評価するために別途、室内試験を実施し、今回用いる解析モデルで解析することによって水分拡散係数 D_T の検討を行なった。試験供試体の寸法は直径 4.8cm、高さ 10cm である。温度は上端を 25℃ で固定、下端を 45℃、55℃ の 2 ケースで固定し、温度勾配を与えた。供試体はベントナイト 100% であり、密度は 1.6g/cm³、初期含水比は下端の設定温度 45℃ のものは 13.78%、設定温度 55℃ のものは 14.46% である。境界は全て変位固定、かつ no flow 境界とし、温度勾配下の水分移動に着目した。

その結果、 D_T は以下のような温度に対する非線形性を式を用いた場合最も良い一致がみられた。

$$D_T = D_{T_0} \exp \left(\alpha \frac{T - T_0}{T_0} \right) \quad (3)$$

ここで、 D_{T_0} は規準となる係数の値、 T_0 は初期温度、

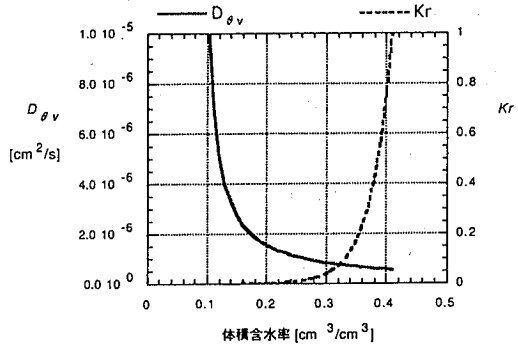


図 8 蒸気水の水分拡散係数、および比透水係数と体積含水率の関係

α は温度に対する非線形性の度合を調整するパラメータでスカラー量である。 T_0 、 D_{T_0} 、 α は、この室内試験の実測値と良く一致した値、 $D_{T_0} = 9.0 \times 10^{-6}$ cm²/s℃、 $\alpha = 1.8$ 、を Big-Ben の解析に用いた。

4.2.2 蒸気水の水分拡散係数および比透水係数

蒸気水の水分拡散係数 $D_{\theta v}$ も別途行なった室内試験より求めた。同一条件で作成した、直径 2cm、高さ 2cm の供試体を数個、下端を水面につけて、異なった経過時間で供試体内部の水分の分布状況を測定し、水分拡散係数を求めた。供試体はベントナイト 70%、珪砂 30%、密度は 1.6g/cm³ である。試験から得られた水分拡散係数 $D_{\theta v}$ は体積含水率 θ の増加に伴い下に凸な関数となる。この $D_{\theta v}$ の中には液状水による移動分と、蒸気状態での移動分の 2 つの現象の影響が考えられる。そこで D_{θ} の最小値を示す θ より小さい θ では蒸気状態、大きい θ では液状水状態と仮定して、蒸気水の拡散係数 $D_{\theta v}$ と液状水の拡散係数 $D_{\theta l}$ に分類した [5]。

液状水の比透水係数 K_r は、液状水の水分拡散係数に $\frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ を乗じることにより算出した。

以上より求めた $D_{\theta v}$ と K_r は、体積含水率の関数で図 8 のようになる。

4.2.3 不飽和水分特性

本解析では、 $\frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ を蒸気水の水分拡散係数 $D_{\theta v}$ に乗じて、圧力勾配で蒸気水が移動する式を用いている。そのために、 $\frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ が必要であり、これは θ - ψ 関係から求められる。解析に用いた θ - ψ 関係は、室内実験結果から得られたものを用いた。また、 $D_{\theta v}$ ($\frac{\partial \theta}{\partial \psi}$) の算出にあたり、 θ - ψ 関係から求めた $\frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ を蒸気水の水分拡散係数に乗じたものを用いた。図 9 は ψ と θ の関係であり室内試験から得られたものである。サイクロメータを用いて測定したもの

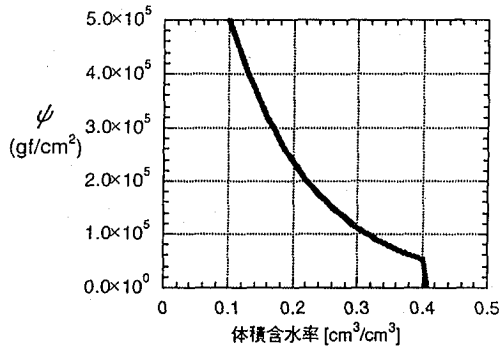


図9 不飽和水分特性

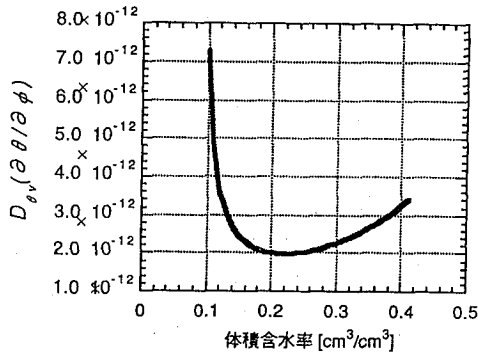


図10 $D_{\theta v} (\frac{\partial \theta}{\partial \phi})$ と θ の関係

である。図10は $D_{\theta v} (\frac{\partial \theta}{\partial \phi})$ と θ の関係である。

4.2.4 緩衝材の熱伝導係数 K_{Tm} 、比熱 $(\rho C_v)_m$

緩衝材の熱伝導係数 K_{Tm} 、比熱 $(\rho C_v)_m$ に関しては、別途行なった熱伝導に関する室内試験の結果をもとに、熱伝導係数については体積含水率の関数、比熱については体積含水率と湿潤密度の関数として以下の様に設定する。

$$K_{Tm} = 0.33 + 3.1\theta \quad [\text{kcal/m/hr/}^\circ\text{C}] \quad (4)$$

$$(\rho C_v)_m = \frac{\gamma_d \times 0.2 + \theta}{\gamma_l} \quad [\text{kcal/kg/}^\circ\text{C}] \quad (5)$$

ここで、 γ_d は乾燥密度、 γ_l は湿潤密度である。

4.2.5 その他のパラメータ

その他のパラメータについては、その一覧を表2に示

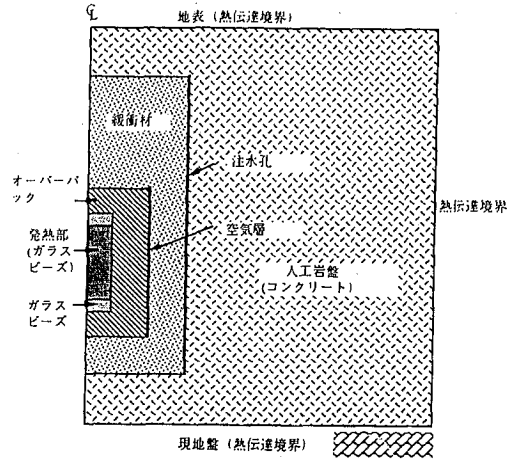


図11 解析条件の概要図

す。緩衝材の弾性係数、ポアソン比は圧縮試験から、飽和透水係数は透水試験、熱膨張係数は熱膨張試験それぞれ求めた。コンクリート、オーバーバック、ガラスビーズ、空気層の各物性は文献値を採用した。

4.3 解析条件

解析条件の概要を図11に示す。解析は、ヒータ中心を軸にした軸対象問題として行なう。発熱は図11の発熱部と書いたガラスビーズ部分から均一に発熱するものとする。緩衝材への注水は注水孔に当たる節点の水圧を固定することにより注入状態を表現する。図中の空気層は実際、珪砂を充填してあるが、その密度、間隙比が不明であるので今回は空気層としてモデル化した。注水圧力は、 0.5 kgf/cm^2 として解析を行ない、緩衝材中の温度分布状況および水分移動状況について実験値と比較検討をする。今回の解析には、膨潤圧による変形を考慮していない。また、本解析で用いた人工岩盤周辺の熱伝達境界の熱伝導係数は熱伝導解析 (FINAS による解析) で求めた値、 $1.16 \text{ [W/m}^2/\text{}^\circ\text{C}]$ を用いた。

4.4 解析結果および考察

図12に1ヶ月後の緩衝材中の温度分布、図13に1ヶ月後の緩衝材中の体積含水率分布を示す。図中の距離は、オーバーバック表面からの距離である。すなわち、 $x = 0 \text{ cm}$ がオーバーバックに接した空気層側であり、 $x = 30 \text{ cm}$ が注水孔側、高さはヒーターの中心部における高さである。また、図14には5ヶ月後の緩衝材中の温度分布

表 2 解析に用いたパラメーター一覧

パラメータ	コンクリート	緩衝材	オーバーバック	ガラスビーズ	空気層
弾性係数(gf/cm ²)	2.50×10^8	2.00×10^5	2.00×10^9	8.20×10^8	8.30×10^2
ポアソン比	0.167	0.300	0.300	0.300	0.450
密度(g/cm ³)	2.30	1.87	7.80	1.60	1.00×10^{-3}
飽和透水係数(cm/s)	1.00×10^{-12}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-20}	2.50×10^{-2}	3.30×10^1
比熱(kJ/kg·°C)	7.50×10^{-1}	-	4.60×10^{-1}	8.40×10^{-1}	1.00
熱伝導係数(W/m·°C)	1.88	-	5.30×10^1	2.55×10^{-1}	7.29×10^{-2}
熱膨張係数(1/°C)	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.64×10^{-6}	1.00×10^{-5}	3.60×10^{-3}

を、図 15 には 5ヶ月後の体積含水率分布を示す。

図 12 より解析値は実験値より温度が高いが、温度勾配に関しては実験値、解析値ともほぼ同じである。また図 14 の 5ヶ月後の温度分布については解析値より実験値が高くなっている。このような温度勾配の解析値と実験値の差は、解析で用いた境界条件の差によるものと思われる。すなわち、緩衝材とオーバーバックの間の珪砂及び実際には変動した外気温の影響と思われる。本解析で用いた人工岩盤周辺の熱伝達境界の熱伝導係数は熱伝導解析 (FINAS による解析) で求めた値を用いており、実測されたものではない。

次に緩衝材中の水分移動状況について見てみる。図 13 より 1ヶ月後では、比較の対象となる実験値が無いが、解析結果では、ヒータ側では熱により水分が減少し、注水側では水分が増加しているという実現象を定性的に表現している。5ヶ月後の実験値との比較では、解析では注入孔より 18cm 位のところまで飽和しているが、実験では 10cm 程である。実験では、注入孔より 10cm から 20cm までの間の測定がされていないのでその間の飽和度の状況は不明であるが、20cm のところの体積含水率がより上昇しているとしても浸潤フロントは 15cm 程度のところに存在しているものと思われる。実際現象としては、ケイ砂とベントナイトの混合不十分による不均一性、締め固めによる不均一性、および膨潤による不均一性の影響もあるものと思われるが、これらを定量的に評価することは現時点では困難である。これらの影響については、供試体解体時の密度分布測定や膨潤圧のメカニズムに関

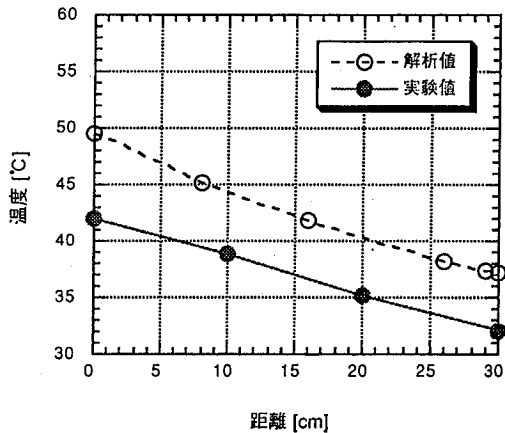


図 12 緩衝材中の温度分布 (1 か月後)

する考察が必要と思われる。

5. まとめ

性能評価におけるニアフィールド環境の明確化の観点から Big-Ben において加熱・注水試験を実施するとともに、熱-水-応力連成モデルを検討し、本試験への適用を行なった。その結果、以下の様な知見を得た。

1. 加熱・注水試験に於て、5ヶ月間の各部の温度分布、含水比分布、膨潤圧のデータが取得できた。
2. 水分勾配による水分移動を蒸気水による移動と液状水による移動に区分し、蒸気水の移動をフィッ

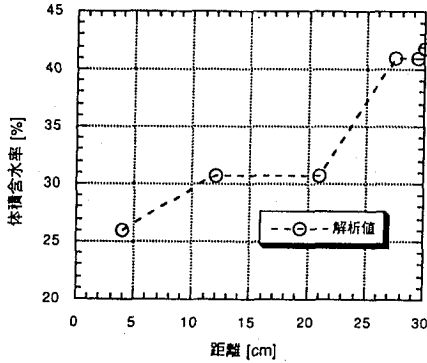


図 13 緩衝材中の体積含水率分布 (1 か月後)

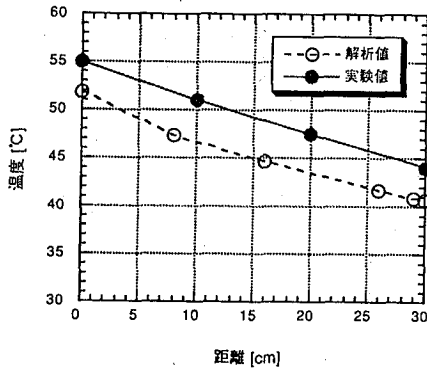


図 14 緩衝材中の温度分布 (5 か月後)

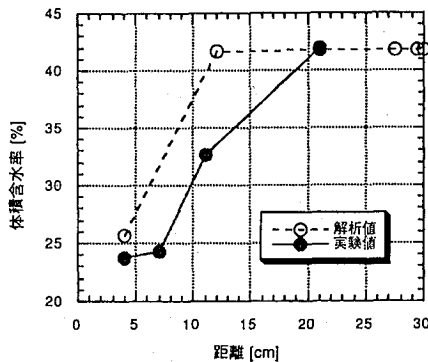


図 15 緩衝材中の体積含水率分布 (5 か月後)

ク則で、液状水の移動をダルシー則で表わしたモデルを作成した。また、温度勾配による水分移動

のモデルも作成した。

- 水分移動のシミュレーションを行なった。シミュレーションの結果、温度勾配による水分拡散係数 DT は式 (3) の様な温度に対する非線形性を有するモデルで大体表現できることが分かった。

今後、さらに正確かつ詳細に現象を把握し、より適切なモデルを開発するためには、以下の様な課題がある様に思われる

- ケイ砂混入ベントナイトの広範囲な体積含水率領域における不飽和水分特性の把握
- ケイ砂混入ベントナイトの膨潤メカニズムの検討
- ケイ砂混入ベントナイトの不均一性の把握
- 移動中の蒸気圧あるいは蒸気密度分布の測定

6. 謝辞

今回の解析に用いた緩衝材の基本物性の取得に関して、動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所の竹内真司氏と鈴木英明氏に、また Big-Ben でのデータ取得に関して松本一浩氏に、各々多大な協力を頂いたことをここに感謝する。

7. 参考文献

- 藤田、他：「大型緩衝材の熱-水-応力連成試験 (1)-加熱試験-」、日本原子力学会秋の大会 (1991)
- 藤田、他：「大型緩衝材の熱-水-応力連成試験 (2)-加熱・注水試験-」、日本原子力学会春の大会 (1993)
- Sato, S., et al.: Full-scale test on coupled thermo-hydro-mechanical process in engineered barrir system, Joint International Waste Management Conference (1991).
- Ohnishi, Y., et al.: Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, edited by Tsang, C.F., pp.679-697 (1989).