

人工バリアシステムの原位置ガス移行挙動試験における 2 相流 モデリングの適用性に関する検討

A DISCUSSION OF THE APPLICABILITY OF WATER/AIR TWO-PHASE FLOW MODELING TO IN-SITU GAS MIGRATION BEHAVIOR IN ENGINEERED BARRIER SYSTEM

森康二*・多田和広*・登坂博行**・岡本修一***・藤原愛***

Koji MORI, Kazuhiro TADA, Hiroyuki TOSAKA, Shuichi OKAMOTO and Ai FUJIWARA

Reproducibility of the observed data at the in-situ Gas Migration Test (GMT) by 2-phase numerical fluid flow simulator is discussed. The in-situ experiment has been done through several stages, such as opening cavern, emplacement of Engineered Barrier System (EBS), natural and artificial resaturation, hydraulic testing and gas migration tests. A 3-D model is used for discretizing the EBS and surrounding rock body, and for reproducing the whole processes dynamically. In the simulation, gas dissolution to water and pressure-dependent pathway-dilation model of EBS are considered. Through trial and error runs, good matching is attained for the observation at resaturation stage, and at gas injection stage qualitative applicability of the proposed pressure-dependent model is indicated.

Key Words: radionuclide geological isolation, gas migration, in-situ experiment, 2-phase flow, pathway dilation

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分施設においては、長期にわたる廃棄体オーバーパックの金属腐食や有機物分解に伴うガスの発生が考えられ、人工バリア健全性への影響を実験的・解析的に評価・予測することが検討項目として挙げられている。

(財)原子力環境整備促進・資金管理センターでは、スイス・グリムゼル試験場において、処分時に想定されるスケールでの EBS (Engineering Barrier System) を設置し、模擬廃棄体への圧入ガスの EBS 内移行挙動評価試験 (Gas Migration Test : GMT) を実施している⁽¹⁾。本試験では、EBS 内に設置された多数の計器により、原位置におけるオペレーションによる状態変化を記録すると共に、そこで得られた結果をいくつかの異なる概念化や数理モデルに基づいた数値解析コード (コード名 : TOUGH2, ROCKFLOW, CODE_BRIGHT, MERLIN, GETFLOWS) による比較検討を行っている。これらの中には、古典的 2 相流解析からベントナイト膨張・固相変形を考慮した力学連成を含むもの等まで含まれている。

本報では、その一つとして、多相多成分流動シミュレータ GETFLOWS⁽²⁾ による原位置試験系のモデル化と長期モニタリングデータの解釈を試みた結果を報告すると共に、2 相流解析手法の適用可能性に関する考察、現状の課題について述べる。

2. GMT 原位置試験の概要

GMT 原位置試験系の概念を図-1 に示す。試験空洞は高さ 3m の上部空洞と下部空洞からなり、部分的に母岩

* 株式会社地圏環境テクノロジー

** 東京大学工学系研究科地球システム工学専攻

*** 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

(Granite) より透水性の高い破碎帯 (Share Zone) が横切る⁽¹⁾⁽³⁾。下部空洞は高さ 4.5m, 直径 4m の円筒形ピットで、ベントナイト系充填材 (20%砂混合ベントナイト) とその内側にコンクリートサイロ (模擬廃棄体) が設置されている。岩石コアの分析結果によれば、母岩の亀裂密度は約 2.5[1/m], 破碎帯で約 10.0[1/m]である。EBS 内は全 13 層 (以降, L1, L2, …, L13 と記す) に区分し, 下部空洞底端から 20~60cm の厚さで順次施工され, 図-2 に示すように上方へ付番されている。サイロ中央部には, アクセス坑道側から注入管を介してガスを注入することができ, 周辺に埋め込まれた圧力センサー, TDR センサー (含水率), および岩盤中の圧力センサーにより, ベントナイト中や岩盤内を移動する流体挙動を検知できるようにしてある。また, ベントナイトには硝酸鉛が層間に混入されており, ガスの通過したパスが解体時に明らかになるようにしてある。本実験は 1996 年より開始され, ①試験空洞掘削, ②EBS 設置, ③人工飽和試験 (強制注水, 上部空洞加圧), ④各種の透水試験, ⑤ガス移行挙動試験 (約 10 ヶ月), ⑥解体・EBS 特性調査 (各種モニタリング, 観察) を行い, この 2004 年秋に終了する運びとなっている。

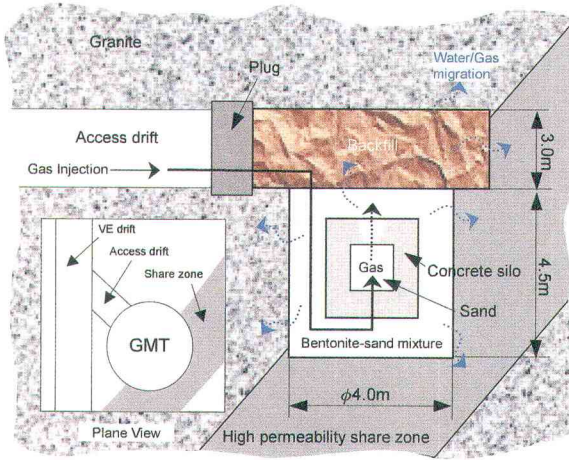


図-1 原位置ガス移行挙動試験の概念

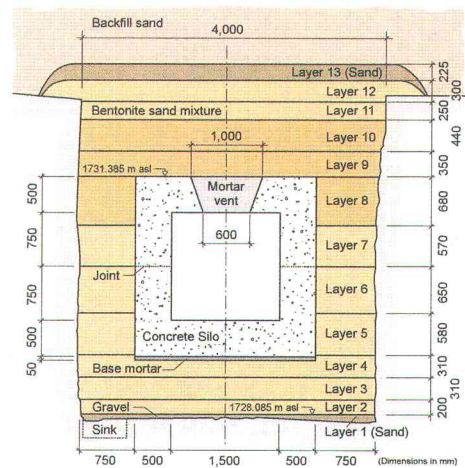


図-2 下部空洞内のベントナイト系充填材⁽⁴⁾

3. 実験結果の概要

人工飽和試験では, EBS 上位層 (L8~L10) の透水性は高く, 下位層に比較して再冠水時間が早いことが明らかになった。これは, コンクリートサイロや上位層の自重や締固めにより EBS 下位層の透水性が低下したためと考えられる。主なガス移行経路となる EBS 上位層の飽和が確認された後, 注入量を段階的に増加させたガス移行挙動試験 (GI1~GI3) が実施された。EBS 各層に設置された圧力センサーは, 注入ガス量に応じて, ガス溶解, 2 相流挙動及び空隙損傷と見られる特徴的な応答を示した。EBS 各層における観測データの詳細については, 一連の実験オペレーションを追跡した再現解析結果とともに後述する。

4. 解析手法

4.1 基本方程式

本検討では, 一般化ダルシー流れに基づく 2 相流解析モデルを基本とし, ①空洞掘削, ②EBS 設置, ③人工飽和試験, ④ガス移行試験からなる一連の実験時オペレーションに対して, 人工バリアシステムにおける流体挙動を追跡する。ガス移行試験の再現では, 間隙圧の上昇に伴うガス溶解, 空隙構造の拡張と水理特性の変化を考慮する。等温条件における多孔質媒体中の水・空気の時流れは, 以下に示す 2 相圧縮性流体に関する一般化ダルシーの法則により記述される。

$$\nabla \left(\frac{K k_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_w \right) - q_{ws} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_w}{B_w} \right) \quad (1)$$

$$\nabla \left(\frac{K k_{r_g}}{\mu_g B_g} \nabla \Psi_g \right) - q_{gs} - f_{gs}^{g-w} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_g}{B_g} \right) \quad (2)$$

$$\nabla \left(\frac{K k_{r_w} R_g}{\mu_w B_w} \nabla \Psi_w \right) + \nabla \left(D_w \nabla \frac{R_w}{\alpha_w} \right) - q_{ws} R_g + f_{gs}^{g-w} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_w R_g}{B_w} \right) \quad (3)$$

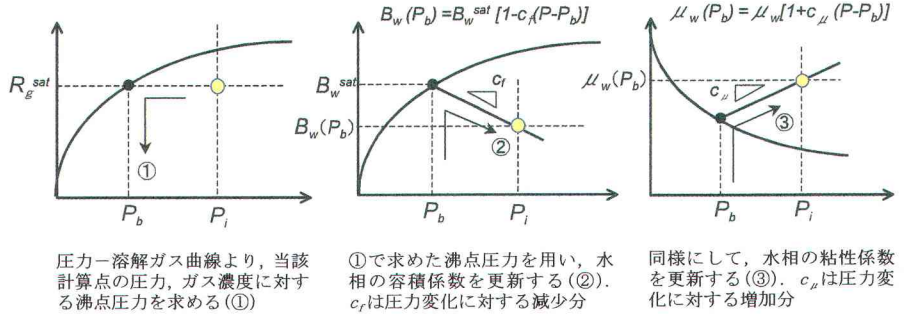
各式は、それぞれ水、気相中のガス、水相中の溶解ガス成分に関する質量収支式を表す。ここで、 K は絶対浸透率 (m^2)、 k_{r_p} は相対浸透率 (—)、 μ_p は粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、 B_p は容積係数 (—)、 Ψ_p はポテンシャル (Pa)、 q_{ps} は単位体積岩石からの標準状態での生産圧入速度 ($\text{m}^3/\text{m}^3/\text{s}$)、 S_p は飽和率 (—)、 R_g は地下水中の溶存ガス成分の濃度 (m^3/m^3)、 D_p は分散係数 (m^2/s)、 ϕ は間隙率 (—) である。添え字 p は各相 (w : 地下水, g : ガス) に関する諸量であることを示す。また f_{gs}^{g-w} は気相と水相間のガス移動量 ($\text{m}^3/\text{m}^3/\text{s}$) である。これら 3 式は同時完全陰的差分法により、気相圧力、水飽和率、溶存ガス濃度を未知数として解くことができる。

4.2 溶解ガスの取扱い

ガス成分は気相中と水相中に存在し、両相間を圧力状態に応じて移動する。石油工学の分野ではこの現象は両相の平衡状態を仮定して取り扱われているが、本論では両相の接触時間に応じて速度論的に移動量を計算する方法を採用することにする。あるガス溶解濃度を持つ水相と気相が、ある圧力下で Δt 時間接触したとすると、相間を移動する量は Higbie の浸透説により半無限溶媒中の一次元非定常拡散として次式で表される⁽²⁾。

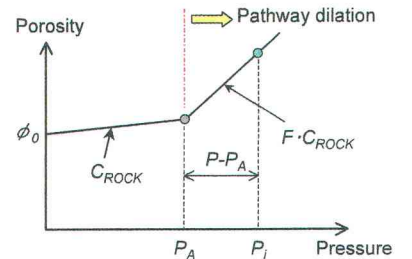
$$f_{gs}^{g-w} = \gamma \cdot A(S_w, S_g) \cdot \sqrt{\frac{D_{gw}}{\pi \Delta t}} \left(\frac{R_g^{sat}}{B_w^{sat}} - \frac{R_g}{B_w} \right) \quad (4)$$

ここに、 $A(S_w, S_g)$ は地下水とガスの接触面積 (m^2) であり、各相の飽和率の関数で表す。 D_{gw} は溶解速度 (m^2/s)、 Δt は時間刻み幅 (s)、 γ は実験パラメータ (—) である。また、 R_g^{sat} および B_w^{sat} はそれぞれ地下水中の溶存ガスが飽和状態に達した際のガス溶存比、地下水相の容積係数であり、いずれも沸点圧力 P_b を閾値とした非線形関係に従い、図-3 に示す①～③の手順により求められる。粘性係数 μ_w についても同様に沸点圧力の関数となる。



4.3 流路拡幅と透水性の圧力依存性

廃棄体からのガス発生等により媒体中の間隙圧力が上昇する場合、空隙が拡幅 (pathway dilation) し透水性が増加する。ここでは、間隙圧力と間隙率の関係として、図-4 に示す概念を用いる。流路拡幅が生じる圧力値を P_A とし、これより小さい圧力レベルでは、ベントナイト充填材の間隙率は間隙圧により C_{ROCK} の勾配で線形変化するものとする。 P_A より大きい圧力レベルでは、充填材の降伏により、より容易に変形できるものと仮定し、本来の係数 C_{ROCK} を F 倍することとする。さらに、充填材の絶対浸透率は、これに伴い以下のベキ型の関係により変化するものとする。



$$K=C \cdot K_0 \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^m \begin{cases} P < P_A \text{ のとき: } \phi(P) = \phi_0 [1 + C_{ROCK}(P - P_0)] \\ P \geq P_A \text{ のとき: } \phi(P) = \phi_0 [1 + C_{ROCK}(P_A - P_0) + F \cdot C_{ROCK}(P - P_A)] \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 K_0 、 ϕ_0 は、それぞれ静置された状態での絶対浸透率、間隙率である。 C 、 m は間隙率と透水性を対応づける実験パラメータ⁽⁶⁾である。流路幅が生じる圧力レベル P_A は時々刻々と変化する応力状態に追従させるパラメータであり、ベントナイト・岩盤間やベントナイトブロック間等の材料界面の特性や不均質性に依じて、実験的に求められるものとする。なお、ここでは流動・応力の完全連成解析ではないので、 P_A は各地点における上載圧を考慮して陽的に与えることとする。

5. GMT ガス移行解析モデル

5.1 三次元モデルおよび境界条件の設定

GMT サイト周辺の VE トンネル、アクセス坑道、試験空洞からなる 3 次元坑道形状と破砕帯を表現するため、図-5 に示す平面 200m×200m、深さ 400m の 3 次元領域をモデル化範囲とした。領域上面は地表までモデル化し、標準大気圧の固定境界とした。領域側方及び底面は閉境界とした。図-6 に試験空洞とその周辺の 3 次元格子分割を示す。ガスベント直上の L8~L10 は重要なガス移行経路となるため、格子分割を十分細かくした。格子数は 474,320 である。なお、本検討では図-6 に示した 3 次元モデルと合わせて、2 次元軸対称モデルを用意し、試行錯誤によるパラメータ同定に利用した。2 次元軸対称モデルは、アクセス坑道や破砕帯を考慮しない単純系を想定し、ガス移行挙動試験で得られたサイロ内の圧力応答データとの概略のマッチングに用いた。

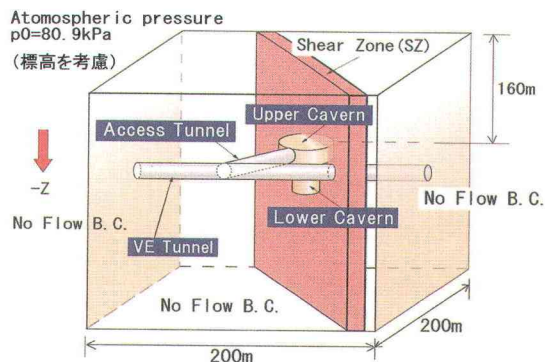


図-5 モデル化の範囲と境界条件

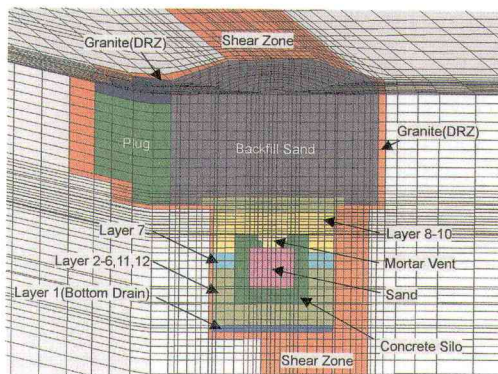


図-6 サイロ周辺の三次元格子分割

5.2 物性パラメータの基本設定

主な 2 相流パラメータを表-1 に示す。これらの基本設定は、別途行われた室内試験データや原位置における水理試験データとのマッチングを通じて同定されたものである⁽⁵⁾。ベントナイト充填材の毛管圧力曲線 P_c 、相対浸透率曲線 kr_w

は、それぞれ van-Genuchten (vG) Brooks-Corey (BC) モデルによるフィッティングパラメータ λ 、 n として代表させた。気相の相対浸透率曲線 kr_g は、BC モデルに加え、Grant モデル ($kr_g = 1 - kr_w$) の双方を用い、後述するガス移行挙動試験データの再現性を比較検証することとした。これらの関係を図-7 に示す。

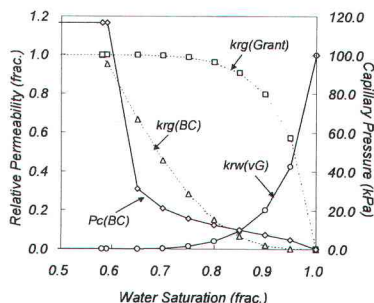


図-7 相対浸透率曲線、毛管圧力曲線

表-1 2 相流パラメータの設定

	絶対浸透率 K(m2)	空隙率 ϕ (-)	圧縮率 C_{ROCK} (Pa ⁻¹)	エントリ圧 (Pa)	残留飽和率(-) 水相	残留飽和率(-) 気相	2相流モデル 構成式	パラメータ
Granite(fracture)	1.00E-17	0.01	3.40E-10	1.E+05	0.1	0.01	vG	n=1.88
Granite(DRZ)	1.65E-16			1.E+04				
Layer 1(Bottom Drain)	1.00E-12			5.E+02				n=2
Shear Zone	2.00E-17			1.E+04				n=1.88
EBS		0.3	1.00E-08	4.E+04	0.58	0.01	vG vG,BC Grant	n=2.5 $\lambda=1$
Layer2-Layer6,11,12	5.00E-19			1.E+04				
Layer8-Layer10	1.12E-16							
Layer7	1.00E-17							
Concrete Silo	1.00E-18	0.2	2.70E-11	1.E+06	0.25	0.01	vG	n=2
Backfill sand	1.00E-12	0.25	1.00E-08	1.E+05	0.16			
Mortar Vent	1.00E-10	0.9	0	0.E+00	0.25			

6. 再現解析結果と考察

6.1 EBS 設置前の状態再現解析

EBS 設置時には既に周辺の場が乱れており、まずそれを作り出す必要がある。ここでは、解析領域内を静水圧分布と仮定した初期状態から、アクセストンネル、VE トンネル及び試験空洞の掘削解析を行い、EBS 設置ならびに人工飽和試験の初期状態を求めた。

6.2 EBS 飽和過程の再現解析

上記の状態から出発し、EBS 設置後の再現解析を行った。人工飽和試験では、下部空洞最下層 L1 及び最上層 L13 からの強制注水を行い、その約 6 ヶ月後に上部空洞を加圧 (550kPa) し再冠水を促進させている。図-8 に EBS 定置後の水相飽和率分布及び圧力分布を示す。初期は透水性の高い上部空洞への再冠水が顕著となり、下部空洞への水分進入は緩慢である。上部空洞が飽和した後、岩盤との界面を介して下部空洞へ水分移動が生じる。下部空洞内の再冠水は、透水性の高い EBS 最下層 L1 と上位層 L8~L10 が先行し、透水性の低い下位層は緩慢となる。図-9 は EBS 各層の圧力変化について、実測データと解析結果を比較したものである。上部空洞加圧前の緩やかな圧力上昇は、実測データとほぼ整合した傾向となった。加圧後の圧力応答は、第8層より上位の高透水層で立ち上がり早く、低透水層の第2層~第6層で緩慢となり、実測データにほぼ整合した特徴的な結果が得られた。

6.3 ガス圧入段階の挙動再現解析

前記の再現結果を初期状態とし、コンクリートサイロ内へガスを注入し、そのときの EBS 内各計測器の応答と計算値の再現性を検証した。

まずは、前述した 2 次元軸対称モデルを用い、サイロ内の圧力応答に着目したマッチングにより、実測値を特徴付ける 2 相流挙動の解釈を試みた。

図-10~図-12 はサイロ内の圧力変化を実測値と計算値で比較したものである。ガス注入量は 0.025(GI1), 0.05(GI2a), 0.1(GI2b), 1.0(GI3a) および 5.0(GI3b) [mg/s] と段階的に増加させている。以下に、各圧入レベルについて結果を示す。

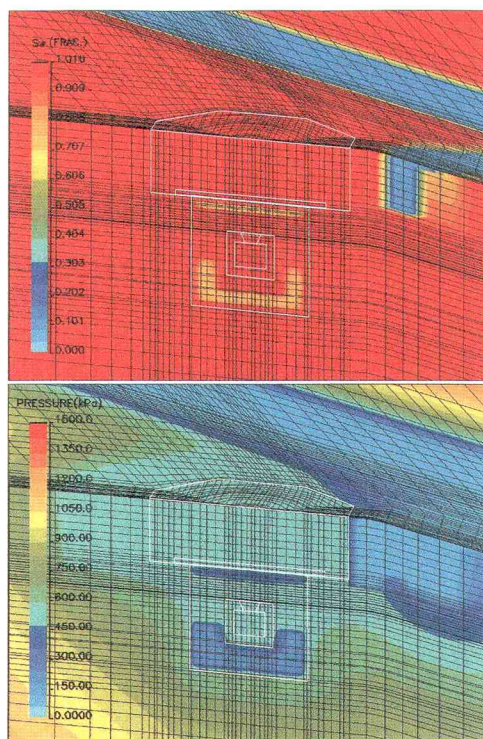


図-8 水相飽和率, 圧力分布 (EBS 定置後 243 日)

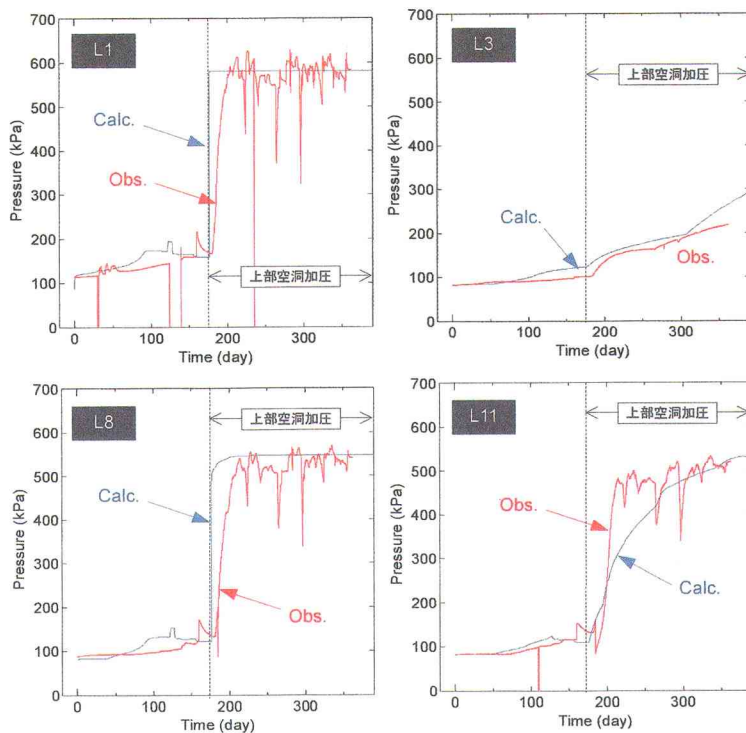


図-9 人工飽和試験：EBS 各層の圧力変化

(1) Gas Injection-1, 2 (GI1, GI2a, GI2b)

図-10 に○線で示した計算結果 ($k_g=BC$) は、EBS 飽和過程の再現解析と同一条件で得られたものである。計算値はガス注入量に応じて階段状に増加する一方、実測値は 50kPa~100kPa の圧力レベルで小さな凹凸を伴う特徴的な応答を示し、両者の傾向は大きく異なる。

均質媒体中の 2 相流れを前提とした計算結果に対して、実測値との差異から推定される現象は、EBS 内のガスが通りやすい経路を選択的に移動する Preferential Flow の存在である。実際、主要なガス移行経路となるサイロ直上 (第 8 層付近) には、EBS 設置時にできたベントナイト層の界面が存在し、注入ガスはその界面に沿って比較的速やかに移動するものと考えることができる。ここでは、サイロ直上のベントナイト界面を薄い格子層で表現し、さらに、この格子層に到達したガスが速やかに移動するよう、ガス相の相対浸透率曲線に Grant モデル (図-7) を適用することで、再現性の改善を試みた。計算結果は、同図中に△線で示した ($k_g=Grant$)。GI1~GI2 の間で、計算値は実測値を良く再現し、とくに GI2a 及び GI2b 開始時の小さな圧力ピークにも追従する結果となった。これより、GI1~GI2 間のガス移行挙動では、ベントナイト界面を選択的に移動する 2 相流れの存在とそのパラメータの設定が重要なファクターとなることが分かる。

(2) Gas Injection-3 (GI3a, GI3b)

この間の圧力応答は、ガス注入の直後に急激に立ち上がり、その後、緩やかに増加する傾向にある。上記のベントナイト界面を考慮したモデルでも、この傾向は再現できていない (図-10)。このことから、本試験系では、注入ガス量の増加と間隙水圧の上昇に伴い、移行ガスが空隙構造を変化させ、浸透率を上昇させる流路拡幅が生じていることが推定される。流路拡幅を考えない幾つかの試行計算により、この傾向の再現を試みたが、浸透率やエンタリー圧等の一般的な 2 相流パラメータやそれらの組み合わせだけでは、実測値をマッチングさせることはできなかった。ここでは、前記 3.3 項に示した方法に従い、ベントナイト界面における流路拡幅を考慮した 2 相流モデルにより、実測値の再現性について検討した (図-11)。式(4)に示した実験パラメータ C , m 及び流路拡幅が生じる圧力レベル P_A については、実測値を再現するよう試行錯誤的に設定した。図中に示した 2 ケースの解析結果①, ②は、これらの試行錯誤の過程で得られた一例である。いずれも、ベントナイト界面における流路拡幅により、GI3 間の圧力応答が大きく低下し、実測値に近づく傾向が得られた。すなわち、GI3 におけるガス移行

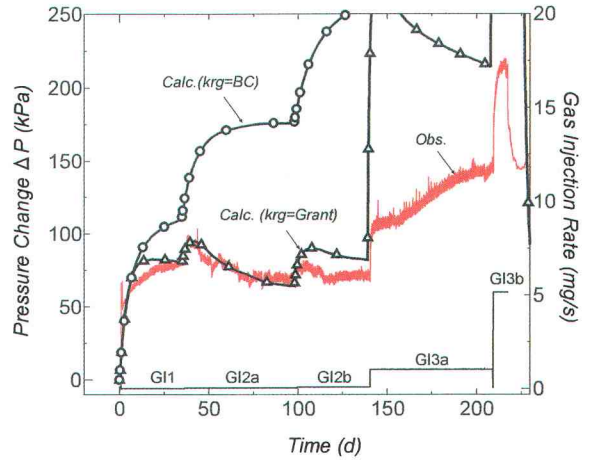


図-10 サイロ内の圧力応答の比較

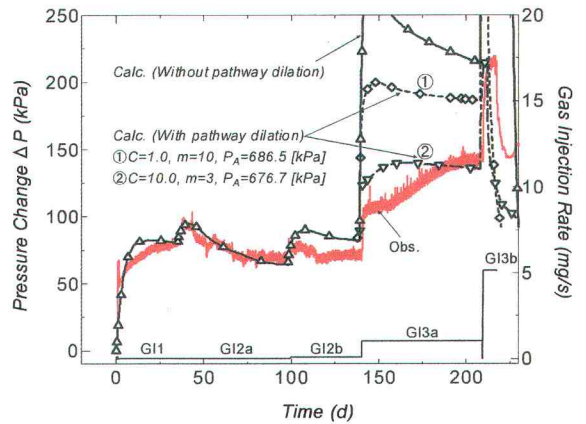


図-11 サイロ内の圧力応答の比較
(GI3a 以降の流路拡幅を考慮)

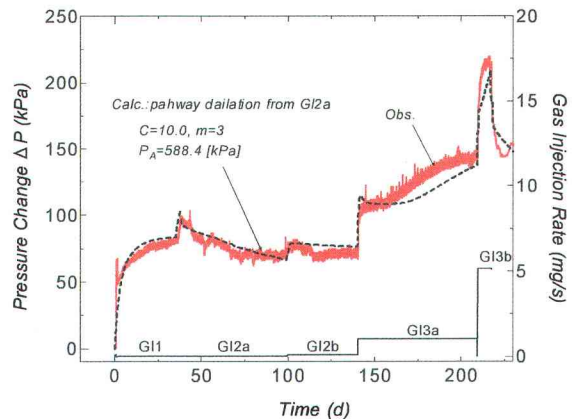


図-12 サイロ内の圧力応答の比較
(GI2a 以降の流路拡幅を考慮)

挙動は、サイロ直上のベントナイト界面への選択的な2相流れに加えて、流路拡幅に伴う動的な透気性の変化が生じているものと考えられる。

以上より、本試験系におけるEBS内のガス移行挙動は、サイロ直上のベントナイト界面を選択的な移行経路とし、注入ガス量と間隙圧の上昇に応じて、その浸透特性を時々刻々と変化させる複合現象（2相流れ+変形）であることが示された。この現象は、古典的2相解析モデルの中で、選択的なガス移行経路の特定とその水理性状を適切に取り込み、流路拡幅による物性変化を逐次追跡することにより予測可能と考えられるが、選択的な経路を事前に特定するためには、今後の基礎データの蓄積が課題となろう。

なお、図-12は上記の代替ケースとして、GI2開始時から流路拡幅が生じ、さらに周辺岩盤に到達したガスが小さな割れ目等の高透水部に進入するものと仮定した解析結果である。高透水部の設定は、空洞掘削時の緩み領域や破砕帯に対応するものと考え、健岩部に対して1オーダー程度大きな透水係数を割り当てた。圧力応答の再現性は全体的に良好であり、特にGI3の間の圧力上昇は岩盤内へのガス進入を考慮しない図-11の結果より大幅に改善している。この間の圧力上昇は、注入ガス量の増加と岩盤中に進入したガスフロントの移動がバランスする結果として得られる。現時点では、どちらが原位置の状況を良く再現しているかは明らかでないが、EBS内のガス移行経路の様相が異なる点は興味深い（図-13）。今後、試験施設の解体撤去で得られるデータをもとに、詳細を明らかにしてゆく予定である。

最後に、3次元モデルによりEBS各層の圧力応答の再現性を検証した結果を示す。上記のとおり、GI2以降は流路拡幅が重要となるが、ここでは圧力レベル P_A を三次元的に割り当てずに、気相の相対浸透率 k_{rg} にGrantモデルを用いることとした。図-14にガス注入前後の溶存ガス濃度 R_g 、水相飽和率 S_w 、圧力 P の各変化量の分布を示す。また、図-15にEBS各層における圧力変化を示す。EBS各層の圧力応答は、GI1~GI2の実測値を概ね再現できている。GI3以降の圧力応答は、ベントナイト界面の流路拡幅を考慮しない分、2次元軸対称モデルと同様に極端に大きな圧力となっている。前述したとおり、選択的なガス移行経路と流路拡幅に関する諸パラメータを三次元で組み込むことにより、再現性が改善するものと考えられる。

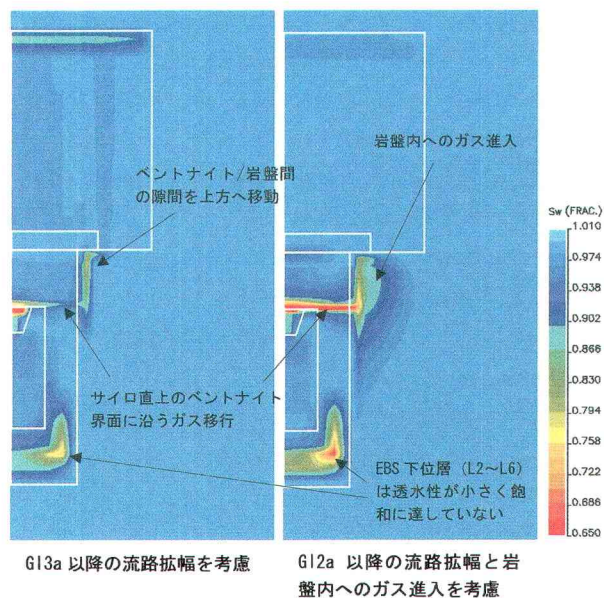


図-13 ガス移行経路の相違(GI3)

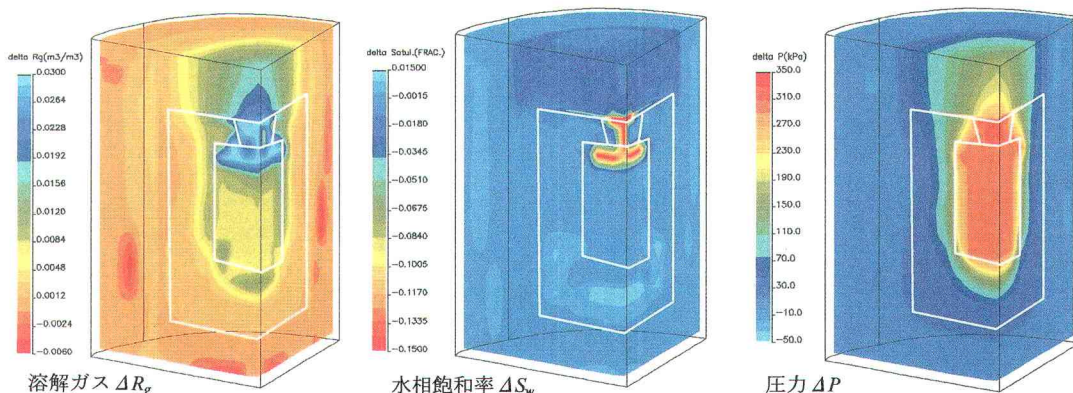


図-14 ガス注入試験前後におけるEBS内の状態変化(左から溶解ガス濃度、水相飽和率、圧力)

7. まとめ

本報では、溶解ガス、媒体変形による物性変化を考慮した2相流シミュレータを開発し、GMT 原位置ガス移行挙動試験への適用と長期モニタリング結果の再現と解釈を行った。本検討を通じて明らかになった点は、以下のとおり要約される。

- ・ 模擬廃棄体より発生したガスは、ベントナイト中を等方均質に移動する単純な2相流れとはならず、ベントナイト界面等を選択的に移行する **Preferential Flow** を伴う。
- ・ ガス圧が著しく増加する場合、流路拡幅が生じ、媒体の浸透特性を局所的に時々刻々と変化させる複合現象（2相流れ+変形）に発展する。
- ・ これらの現象は、古典的2相流解析モデルに対し、流路拡幅に伴う動的な物性変化を考慮することで予測可能と考えられる。
- ・ EBS 内の選択的なガス移行経路を予め特定する為には、更なる基礎データの蓄積が課題である。

今後は、試験施設の解体撤去時に取得される諸データからEBS内の不均質性が明らかになると考えられ、岩盤中の観測データを含めた全体的な再現性の検討を行う予定である。それにより、ガス移行挙動の数値的再現性、予測可能性の確立を目指したいと考えている。

謝辞

本研究は、経済産業省からの委託による「地層処分技術調査等」の成果の一部である。委員会の諸先生方をはじめ、貴重なご助言を頂いた関係者の方々に謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) 原環センタートピックス：スイス・グリムゼル試験場におけるガス移行挙動試験の概要，No.49, 1996. 6
- (2) 登坂博行，伊藤一誠，蝦原雅之，稲葉薫，伊藤彰，小島圭二：多成分多相型移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析，地下水学会誌，第38巻第3号，167-180, 1996
- (3) G.W.Lanyon, NAGRA: GMT/IR 00-04: Conceptual model of flow in the geosphere and EBS for the GMT Experiment (Step B)", Project Report 01-08, 2001. 3
- (4) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成14年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 人工バリア・天然バリアのガス移行挙動の評価, 2002
- (5) G.W. Lanyon: GMT/M 01-3: Note on the TPF comparison models, AN01-141, 2001
- (6) Tomochika TOKUNAGA, Shinichi HOSOYA, Keiji KOJIMA and Hiroyuki TOSAKA: Change of hydraulic properties of muddy deposits during compaction: Assessment of mechanical and chemical effect, Proc. 7th international IAEG Congress, 635-638, 1994

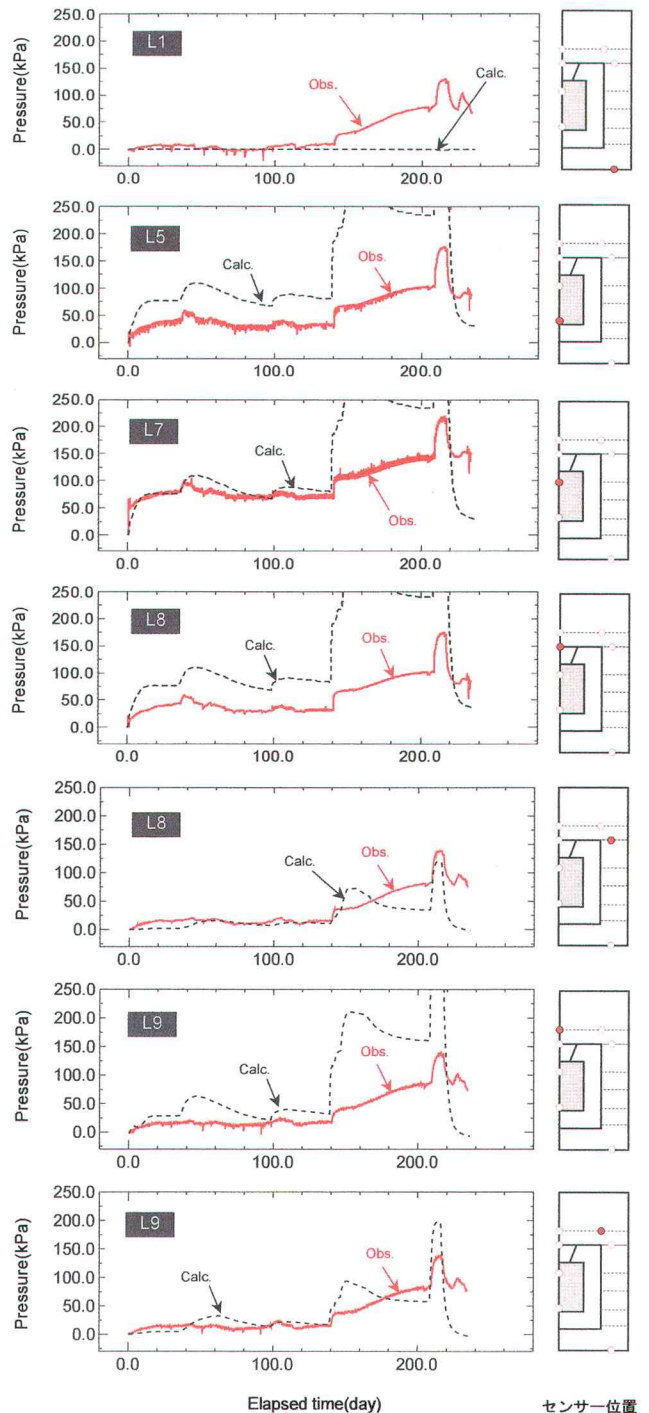


図-15 EBS 各層の圧力応答 (3次元モデル)