

人工バリアシステム中の ガスの移動に関する研究（V）

－ 2相流モデルによる粘土系材料におけるガス影響評価結果の妥当性の検討－

（核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書）

研 究 概 要

2000年2月

東洋エンジニアリング株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

人工バリアシステム中のガスの移動に関する研究 (V)
— 2 相流モデルによる粘土系材料におけるガス影響評価結果の妥当性の検討 —
(研究概要)
(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告)

山本 幹彦*
関 義孝*
森 竜馬*

要 旨

TRU 廃棄物処分場内での金属の腐食等によるガス発生により、人工バリア中の核種移行の加速や、圧力上昇による人工バリアの破壊が懸念される。

本研究では、処分場におけるガスの影響を評価するために、人工バリア材料の候補である粘土系材料（ケイ砂混合ベントナイト：ケイ砂混合率 30wt% 乾燥密度 1.6Mg/m^3 ）に対して、ガスの透過試験、ガス移行特性の定量評価を行い、拡張型気液 2 相流モデル（ベントナイト／砂モデルを付加した気液 2 相流モデル）の適用性評価を行うとともに処分システム中のガスの影響評価を実施した。

ガスの透過試験を体積歪み拘束条件にて実施し、排水速度が急激に増加する点、およびその後の排水速度が低下し、ガス排出速度が急激に増加する点が確認された。また、後者に対応する計測上のブレイクスルー圧は平均有効応力がより小さい程小さくなるという傾向も確認された。ガスのブレイクスルー圧は 2～7MPa 程度で、ブレイクスルー後ほぼ定常に達した時点でのガスの透過係数は $10^{-21}\sim 10^{-19}\text{m}^2$ の範囲に分布すること、またブレイクスルー後も一定圧力下で排水が継続し、その後注入ガス圧力を減少させると排水速度は低下すること等が示された。

ガス透過試験結果のフィッティングによりベントナイト／砂モデル（ケイ砂混合ベントナイトのガスの透過係数を、比表面積と間隙率との関係で表現したモデル）を付加した拡張型気液 2 相流モデルに必要なパラメータを設定し（ただし閉塞圧が推定値）、TRU 廃棄物の廃棄体グループ 2 を定置する坑道について解析を行った。拡張後の気液 2 相流モデルによる解析結果は、処分場内のガス圧力は拡張前とほぼ等しいものの、処分システムからの汚染水の累積排出量については 1/2 倍程度となり、これまで実施してきた気液 2 相流モデル／パラメータでの評価の保守性が示された。

本報告書は、東洋エンジニアリング株式会社が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部
システム解析グループ

* 東洋エンジニアリング株式会社 原子力・電力事業部 原子力・電力技術部

Gas Migration in the Engineered Barrier System (V)
Examination of gas migration evaluation through bentonite/sand mixture
using two-phase flow model

Mikihiko Yamamoto*
Yoshitaka Seki*
Ryoma Mori*

Abstract

Gas production resulting from mechanisms, which include metal corrosion and microbial degradation in TRU (TransUranic nuclide bearing) waste repository, can lead to overpressurisation and enhanced release of radionuclides.

In this study, gas injection experiment and quantitative evaluation of gas flow properties in bentonite/sand mixture (70 weight percent of bentonite and 30 weight percent of quartz sand, 1.6 Mg/m³ of dry density) were carried out. Under the condition of cylindrical, constant volume geometry and axial flow, gas breakthrough phenomenon at which sharp increase of gas outflow rate after rapid rise in outflow rate of water was observed. Then an injection pressure rises to a peak value range from 2 MPa to 7 MPa higher than backpressure. Afterward, outflow rate of gas increased to a steady state value in the permeability range 10^{21} - 10^{19} m². Outflow of water continued after gas breakthrough. When the gas injection pressure decreased, outflow rate of water declined coincidentally.

An enhanced two-phase flow model in which bentonite/sand gas flow sub-model, based on Kozeny-Carman model, is added to conventional two-phase flow model was used for simulation. Simulation results of gas injection test were compared with the test's data. Results of the simulation were in reasonably agreement with obtained experimental data. Also, two-dimensional calculation of gas migration in a multi-barrier repository of TRU waste was implemented. Parameter values used here without reseal pressure were identified through the simulation of the test's results. Comparing these results with other simulation results obtained by conventional two-phase flow model shows that the maximum pore pressure was almost same value between two different models. But estimated value of expelled water from cavern by enhanced two-phase flow model was less than the value from conventional two-phase flow calculation. Therefore in view of the expelled water, former calculated results used by conventional two-phase flow model and their parameters might be rather conservative evaluation.

This work was performed by Toyo Engineering Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Agency.

JNC Liaison: Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

Nuclear and Electric Power Engineering Dept.

目 次

まえがき	1
1. 粘土系材料のガス透過試験	3
1.1. 試験条件	3
1.1.1 試料（ベントナイト/砂混合物）	3
1.1.2 応力条件	3
1.2. 試験装置	4
1.3. 試験方法	4
1.3.1 試料の調整方法	4
1.3.2 試験手順	5
1.4. 試験結果	5
1.4.1 飽和過程	5
1.4.2 ガス押し過程	5
1.5. 考察	7
1.5.1 飽和過程	7
1.5.2 ガス押し過程	7
2. ガス移行特性の定量的評価	9
2.1 計算結果及び考察	9
2.1.1 飽和度	9
2.1.2 水の透過係数	11
2.1.3 ガスの透過係数	11
2.1.4 ガス排出速度の急激な上昇	11
2.1.5 結論	12
3. 2相流モデルの適用性評価	13
3.1 移行モデル	14
3.1.1 ベントナイト/砂モデル	14
3.2 ガス透過試験のシミュレーション	14
3.2.1 試験条件及び結果	14
3.2.2 シミュレーション	17

4. 処分システムのガス影響評価	19
4.1 解析条件の設定	19
4.1.1 幾何モデル及び入力パラメータ	19
4.2 ガス移行の影響評価	22
4.2.1 2相流モデルによる解析結果	22
4.2.2 ベントナイト／砂モデルによる解析結果	24
4.3 まとめ	26
4.3.1 結論	26
4.3.2 今後の課題	28
参考文献	29

図 目 次

図 1.3.1-1	試験に供する試料(硬岩系岩盤条件のフィルタ、円筒セル、試料)	4
図 1.4.2-1	ガス押し過程における圧力、ガス排出量、排水量の経時変化(試料 10)	6
図 1.5.2-1	ガス押し過程における累積排出水量の経時変化モデル図	7
図 1.5.2-2	計測上の threshold 圧と平均有効応力との関係	9
図 3.2.1-1	硬岩系岩盤条件での累積排出水量経時変化 (試料 10)	16
図 3.2.1-2	硬岩系岩盤条件でのガス排出速度経時変化 (試料 10)	16
図 3.2.2-1	70/30 硬岩系岩盤条件に対するシミュレーション結果 (試料 10 水)	18
図 3.2.2-2	70/30 硬岩系岩盤条件に対するシミュレーション結果 (試料 10 ガス)	18
図 4.1.1-1	TRU 処分概念 硬岩系岩盤 Gr. 2 の解析モデル	21
図 4.2.1-1	間隙圧力の経時変化 硬岩系岩盤 廃棄体 Gr.2	23
図 4.2.1-2	間隙水累積排出量 硬岩系岩盤 廃棄体 Gr.2	23
図 4.2.2-1	間隙圧力の経時変化 硬岩系岩盤 廃棄体 Gr.2 (ベントナイト/砂モデル) ...	25
図 4.2.2-2	間隙水累積排出量 硬岩系岩盤 廃棄体 Gr.2 (ベントナイト/砂モデル)	25

表 目 次

表 1.1.1-1	試料の条件	3
表 1.1.2-1	試験ケース	3
表 1.5.2-1	各試料における経時変化－累積排出水量の関係	8
表 2.1.1-1	各試料における間隙体積、試験容器内残留水、飽和度	10
表 2.1.1-2	排水量の経時変化から求めた試料の飽和度	10
表 2.1.2-1	各試験における水透過係数	11
表 2.1.5-1	試験結果のまとめ	13
表 3.2.1-1	70/30 硬岩系岩盤条件に対する試験条件（試料 10）	15
表 3.2.2-1	70/30 硬岩系岩盤条件に対するモデルパラメータ（試料 10）	17
表 4.1.1-1	ガス移行解析入力パラメーター ベントナイト/砂モデル	19
表 4.1.1-2	ガス移行解析入力パラメーター 2 相流モデル	20
表 4.3.1-1	2 相流モデル及びベントナイト/砂モデルによる解析結果の比較	27

ま え が き

まえがき

現在我が国では核燃料サイクルの完結を目指し、フロント及びバックエンドの各ステップにおいて事業化を目的とした研究開発、法規・体制の整備が行われつつある。

これまでに、低レベル放射性廃棄物に対しては法整備、実施主体の設立が行われ、発電所の均質固化体については平成 4 年 12 月に埋設が開始された。また、高レベル放射性廃棄物に対しては昭和 55 年に原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会において基本的な考え方が示され¹⁾、平成 5 年 5 月に国、研究機関、電気事業者の協調の下、高レベル事業推進準備会が設立され、平成 12 年に予定される実施主体設立の準備が行われている。また、処分技術については平成 11 年に地層処分研究開発第 2 次取りまとめが報告され²⁾、我が国における地層処分の技術的信頼性が示されている。

T R U 核種を含む放射性廃棄物に対しては、諸外国における α 廃棄物または ILW の処分スケジュールを見た場合、高レベル放射性廃棄物の処分に先立って処分開始を計画するイギリス、スイス等の国も多く、早急に適切な処分方法を確立する必要がある。我が国においては、原子力委員会において昭和 63 年 10 月より放射性廃棄物対策専門部会の下に T R U 廃棄物分科会が設置され、平成 3 年 7 月にとりまとめられた「T R U 核種を含む放射性廃棄物の処分について」³⁾において、T R U 廃棄物の区分目安値（全 α 核種濃度：約 1GBq/t）を示すと共に、処分方法の見通しを 1990 年代末までに得ることを勧告した。これに従い、平成 9 年より核燃料サイクル開発機構、電力業界の協力協定の下、「T R U 廃棄物処分概念検討書」⁴⁾がとりまとめられつつある。

本研究は処分を具体化する上で不可欠となる長期安全評価手法の確立に資することを目的として、T R U 廃棄物の処分で評価対象とすべき固有、かつ重要であるとして摘出された現象のうち処分場でのガス発生と移行に着目し、評価手法の調査検討、データの取得、収集を行い、適切な評価技術を確立するものである。

本年度は、緩衝材の候補材料であるベントナイト／砂混合材に対して、圧力／応力条件の変化によるガス透過特性の変化を把握することを目的としてガス透過試験を実施した。また、特性試験で得られたデータを用い、ベントナイトのガス透過特性を反映すべく開発された解析コードの確証を行った。さらに、処分システムに対するシミュレーションも実施し 2 相流モデルとの比較を行うことにより、各モデルの適用性、課題について検討した。

1 粘土系材料のガス透過試験

1. 粘土系材料のガス透過試験

処分システム内でガス移行評価上影響が最も大きいと考えられる緩衝材の材料として検討されている、ベントナイト／砂混合系材料（配合率 70/30wt%）を用いて三軸透過試験装置によりガス透過試験を実施し、ガス、水に対する透過特性データを取得した。

1.1. 試験条件

1.1.1 試料（ベントナイト/砂混合物）

測定対象とした試料は、緩衝材の候補材料として試験、研究が進められているベントナイト／砂混合物とし、試料は以下の表に示す条件に調整した。

表 1.1.1-1 試料の条件

材料	ベントナイトと珪砂の混合材料 (ベントナイトと砂の重量比 = 7 : 3)
ベントナイト	クニゲル V1
珪砂	3号砂と5号砂を重量比 1 : 1 に配合
乾燥密度	1.6 Mg/m ³
試料寸法	57.2mm ϕ × 30mmH

1.1.2 応力条件

試験はガス侵入圧の評価が比較的容易であると予想され、平均有効応力は膨潤圧相当で一定と考えることができる体積歪拘束条件（硬岩系岩盤条件）で行った。表 1.1.2-1 に本試験で設定した試験ケースを示す。

表 1.1.2-1 試験ケース

	評価項目 【解析時入力データ】	試験方法	測定項目	圧力/応力	寸法
硬 岩 系 岩 盤 条 件	絶対透過係数(水)	間隙水飽和試料の水押し	累積排出水量の経時変化	深度500m 無拘束圧	厚さ 30mm 直径 57.2mm
	排水時相対透過係数(水)	間隙水飽和試料のガス押し	累積排出水量の経時変化		
	排水時相対透過係数(ガス)		ガス排出速度の経時変化		
	Threshold圧力		ブレイクスルー/ガス侵入圧力		
	ガス注入圧力と実効透過係数の関係				
	閉塞圧				
	飽和度分布	試料各部水分量	重量変化		

1.2. 試験装置

主たる装置構成及び仕様は以下の通りである。

- ① 試験容器：円柱形試料(57.2mm ϕ ×30mmH)に対してガス・水の注入圧力、背圧、半径方向及び軸方向拘束圧を最大 35,000kPa まで载荷可能
- ② 流体供給系/拘束圧系/背圧系：シリンジポンプによりガス及び水の定流及び定圧送り出しが可能 10⁻³ml/min~10⁷ml/min の流量、0~35,000kPa の圧力で運転
- ③ 流出水・ガス捕集測定系：水は Lucite セパレータと電子天秤型積算水量計(精度 0.001g)、ガスは熱線コイルを用いたガス流量計(0~1,000cc/min)を使用
- ④ 制御系：ガス・水の注入、排出速度、各部圧力、及び温度等の経時変化のデータを自動収集記録 ステップ昇圧(~50 ステップ、~24 時間)等圧力制御、threshold、ブレイクスルー検出機能を装備

1.3. 試験方法

1.3.1 試料の調整方法

以下に供試体の作成手順、及び図 1.3.1-1には硬岩系岩盤条件の供試体を示す。

- ①円筒セルを鉛スリーブ内に挿入し、下端に焼結金属フィルタを設置
- ②乾燥したベントナイト、3号、5号珪砂を所定重量比で混合し、円筒セル内に充填
- ③乾燥密度 1.6g/cm³ となるよう圧縮し、試料上端から約 5mm の試料を削り取る
- ④圧縮試料の上端に、試料側に 325 メッシュ、外側に 60 メッシュのフィルタを設置
- ⑤鉛スリーブの端部(上流側・下流側)を整形する

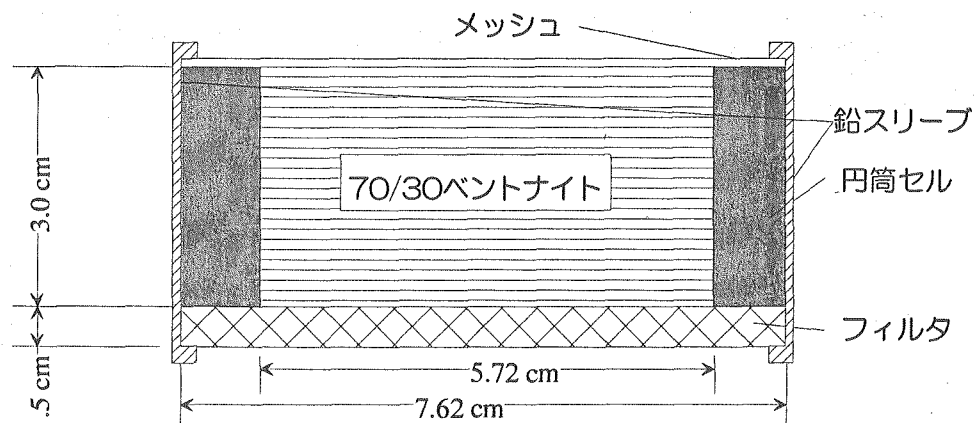


図 1.3.1-1 試験に供する試料(硬岩系岩盤条件のフィルタ、円筒セル、試料)

1.3.2 試験手順

以下に設定された測定手順を示す。

- ①減圧後イオン交換水で試料を飽和させる。(飽和過程)
- ②飽和試料の水の透過係数を測定する。(注入圧力：8,000kPa、背圧：5,000kPa)
- ③ガス押しに切り替えガス及び水のフラックスを測定する。(ガス押し過程)
 - ・注入圧を 5,000kPa から 50kPa/2hr でステップ昇圧し、threshold 圧、ブレイクスルー圧を検出
- ④ガス及び水のフラックスの経時変化を測定する。
- ⑤圧力を一定に保ち、水、ガスのフラックスの経時変化を測定。(フラックス一定過程)
- ⑥注入ガス圧力を減少させ、排出ガスフラックス停止までさらに測定。(閉塞圧過程)
- ⑦試験後の試料の飽和度分布を測定する。

1.4. 試験結果

ここでは例として試料 10 に対する試験結果を示す。同試料では円筒スリーブと試料との界面でのガス透過を防止するため、試料を厚さ約 10mm ごとに三層に分け、中央部の層の外周に膨潤圧が大きい 100%ペントナイトを厚さ 5mm で配置した。

1.4.1 飽和過程

真空ポンプで供試体内を 2 時間減圧させた後、試料の上下両端から水を注入し、注入圧を 625kPa/1 時間で 8 時間ステップ状に昇圧させ 5,000kPa とした。この状態を 303.7 時間継続し、この期間の注入ポンプの吐出量は 32.4ml であった。試料上下両端の設定圧を 5,000kPa とした後、背圧は 5,000kPa で一定とし、上流側の圧力を 250kPa/1 時間でステップ状に昇圧し、12 時間で 8,000kPa まで昇圧した。

本試料はさらに試料の飽和度を増加させるために、再度飽和過程を前期後期について実施した。

1.4.2 ガス押し過程

注入流体をガスに切り替えて背圧を 5,000kPa、注入ガス圧力は 5,000kPa から 125kPa/2 時間でステップ昇圧し、ガスの排出を検出後一定圧となるように設定した。

試験開始後 118.5 時間後にブレイクスルーを検出した。ブレイクスルー圧は 2,801kPa であった。試験開始から 164.8 時間後にガスフラックスが急激に上昇し、ごく短時間でアキュムレータのガスが枯渇してしまう現象が生じている。

図 1.4.2-1 にガス押し過程における注入ガス圧力の経時変化とガス排出速度、及び累積排出水量の経時変化を示す。

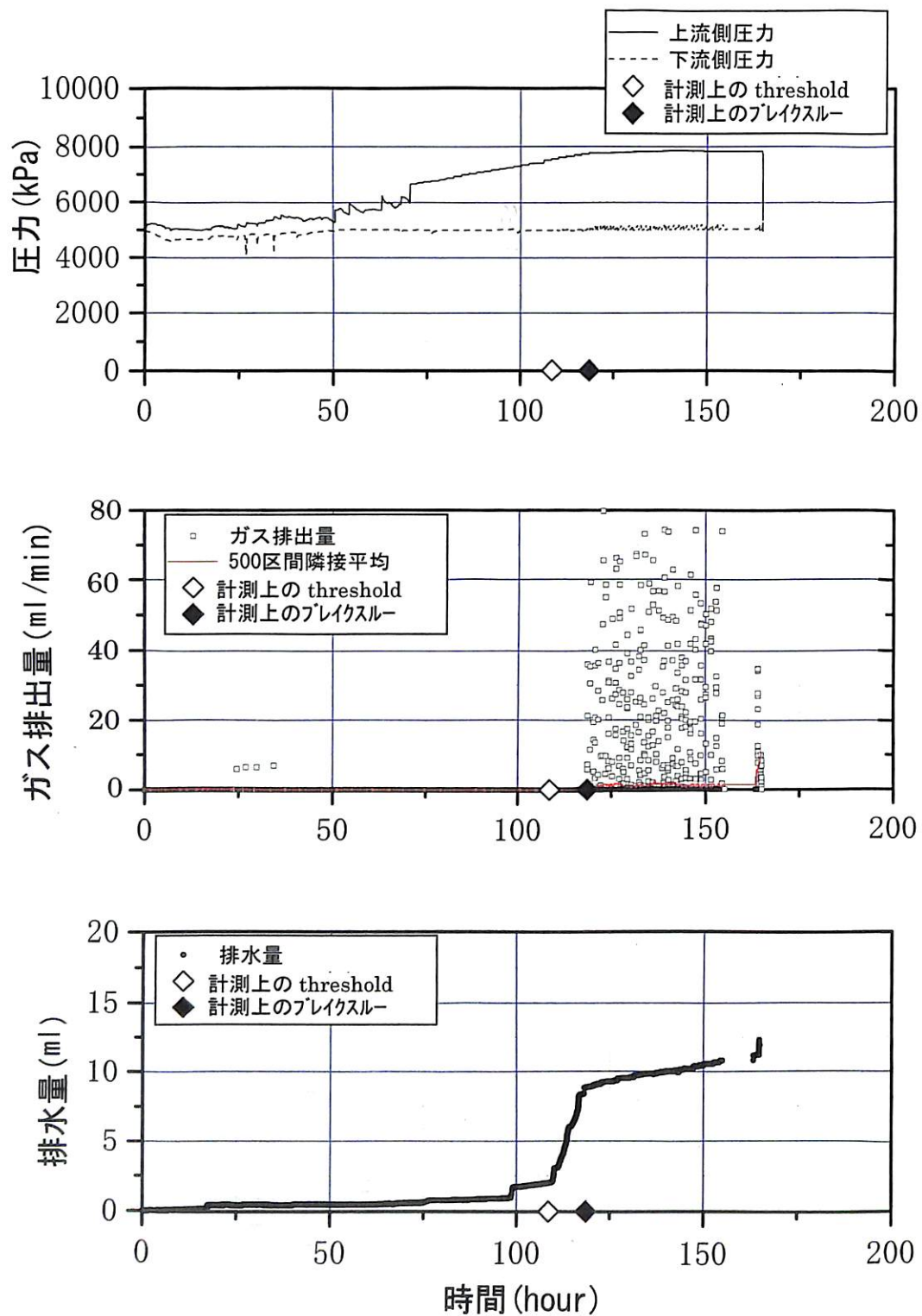


図 1.4.2-1 ガス押し過程における圧力、ガス排出量、排水量の経時変化(試料 10)

1.5. 考察

1.5.1 飽和過程

飽和過程前期におけるポンプの吐出量より、水注入圧をステップ状に昇圧した期間に試料容器内に急速に水が注入され、フィルタ及び試料内に水が侵入していることがわかる。その後の試料両端の圧力を 5,000kPa で一定に保持した期間もポンプ吐出量は増加し続けており、また試験容器中の間隙体積がポンプ吐出量を上回ることから、この段階では試料が完全に飽和していないと考えられた。飽和過程後期終了時には、注入ポンプ吐出速度と排水速度がほぼ等しくなっていることから、試料内はほぼ飽和したものと考えられる。

1.5.2 ガス押し過程

(1) ガス押し過程における累積排出水量の経時変化

ガス押し過程における累積排出水量は、各ケースにおいて図 1.5.2-1に示す 3 段階に分けることができ、典型的な変化が観察される。

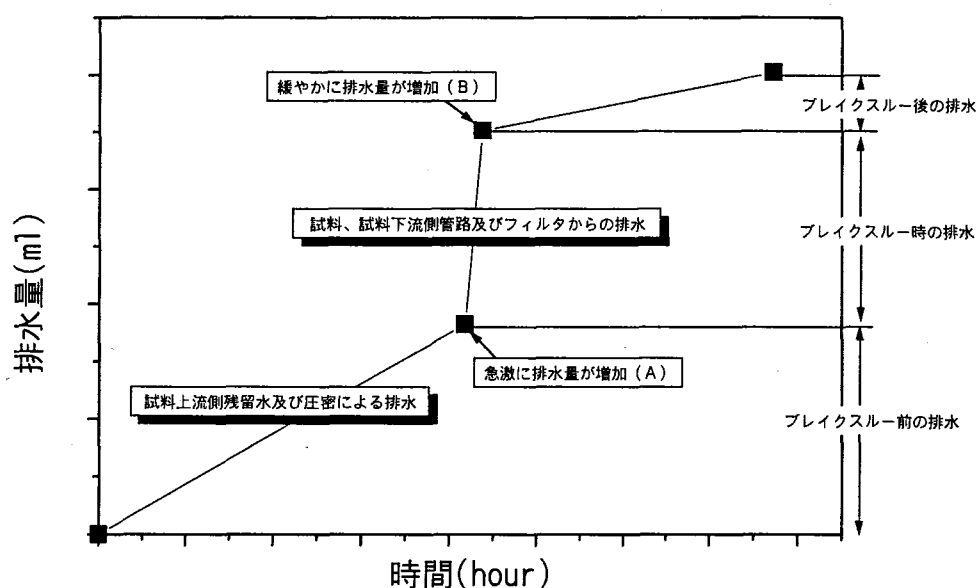


図 1.5.2-1 ガス押し過程における累積排出水量の経時変化モデル図

各試料に対して、各段階の排水量を表 1.5.2-1に示した。ブレイクスルー前の累積排出水量は 1.5～13ml の範囲に分布する。試料上流側配管内の残留水注入による排水量は 0.32ml 以下であることから、これを超える量の排水は試料間隙中の水がガス

と置換することによって排出されたものと考えることができるが、これに加えて、試料の圧密排水を含む可能性も否定しきれないと思われる。一方、ブレイクスルー時の累積排出水量は 6.8～8.6ml の範囲にある。試料下流側の配管内残留水は、4.98ml でありフィルタの間隙体積が 8.57ml であることから、この期間の排水は試料下流側配管内残流水の他、試料及びフィルタにガスが侵入することによって排出された間隙中の水が加わったものと考えられる。さらに、ブレイクスルー後の期間の累積排出水量は 1.1～3.2ml の範囲にあるが、これは主に試料間隙水の排出に起因するものであり、これにフィルタ内の間隙水の排出が加わったものと考えられる。

表 1.5.2-1 各試料における経時変化－累積排出水量の関係

試料	ブレイクスルー前の排水		ブレイクスルー時の排水		ブレイクスルー後の排水	
	時間(hour)	排水量(ml)	時間(hour)	排水量(ml)	時間(hour)	排水量(ml)
1	56.0	1.6	69.1	8.6	105.6	1.9
3	92.9	2.2	129.3	7.8	164.9	3.0
4	209.6	9.1	219.4	8.4	386.3	2.6
6	165.1	4.9	182.3	7.7	190.7	1.1
7	120.9	2.1	168.7	8.0	194.9	2.7
8	202.6	13.4	207.1	6.8	259.9	3.2
10	109.8	2.1	118.0	6.8	163.6	2.3

(2) ガス侵入圧力と有効応力

計測上の threshold 圧は試料中にガスが侵入する閾値を評価する目安となるものであるが、総ての試料についてほぼ 2MPa から 3MPa の間にある。膨潤性の粘土系材料中でのガスの透過が、粘土鉱物結晶板間に作用する力に抗してガスの圧力が結晶板の間隔を押し広げて流路を形成する機構を含み持つのであれば、ガスが侵入、透過する圧力は試料に作用する有効応力に影響されることが予想される。

図 1.5.2-2に平成 11 年度に得られたガス透過試験結果と併せて、上記の計測上の threshold 圧と有効応力との関係を示した。計測上の threshold 圧は平成 11 年度の試験結果とほぼ同一の値を示し、異なる地下応力を再現した試験条件によって得られた有効応力との関係においても、その傾向は一致している。

2 ガス移行特性の定量的評価

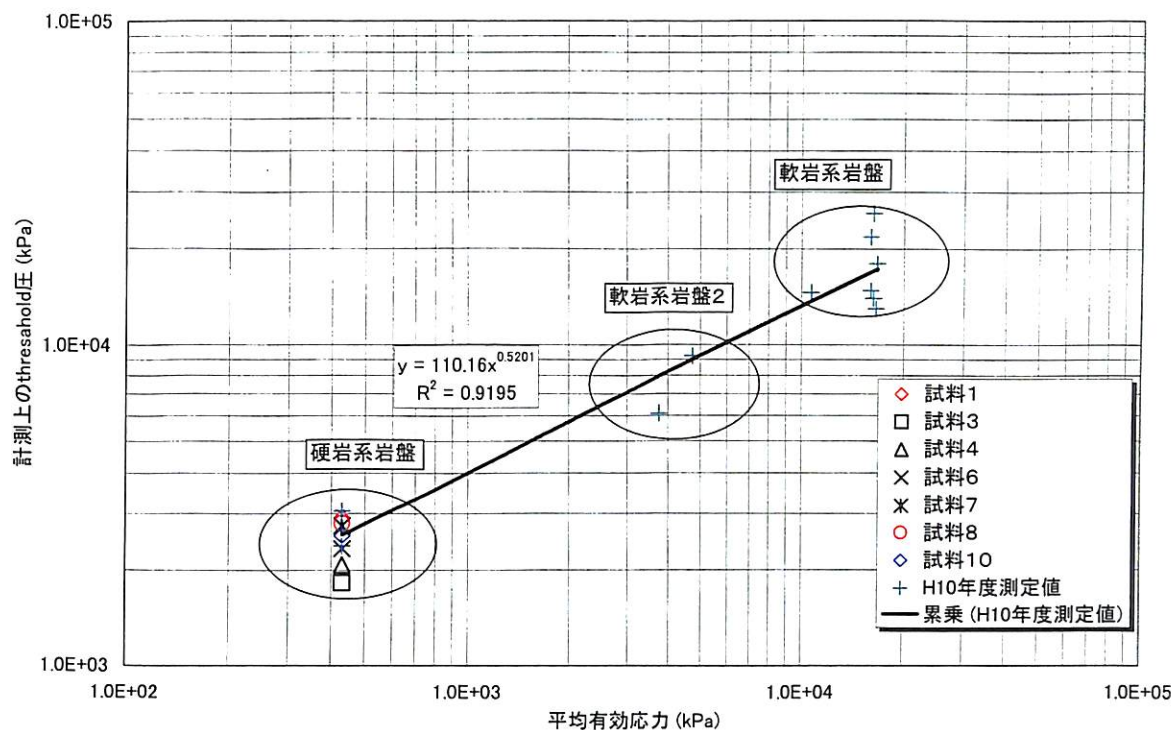


図 1.5.2-2 計測上の threshold 圧と平均有効応力との関係

2. ガス移行特性の定量的評価

1章で得られた試験前後の試料重量、寸法、乾燥密度、間隙率より間隙水飽和度を、また飽和後試料の通水により得られた排水流速より水の透過係数を、さらにガス押し過程における間隙水及びガス排出速度の経時変化と注入ガス圧力等の値からガスの実効透過係数を評価した。

2.1 計算結果及び考察

2.1.1 飽和度

(1) 飽和過程後期終了時における飽和度

表 2.1.1-1に各試料及びフィルタの間隙体積、試験容器内残留水量、さらにフィルタは飽和過程において完全に飽和に達したものと仮定して算出された試料に対する飽和度の評価値を示す。

表 2.1.1-1 各試料における間隙体積、試験容器内残留水、飽和度

試料	間隙体積(ml)		試験容器内残留水(ml)			飽和度 (-)
	試料	フィルタ	飽和過程前期	飽和過程後期	合計	
1	31.87	8.57	33.22	6.41	39.63	0.97
3	33.37		34.40	4.41	38.81	0.91
4	31.30		21.60	3.96	25.56	0.54
6	33.38		25.27	5.57	30.84	0.67
7	32.34		31.55	6.21	37.76	0.90
8	31.37		26.37	2.15	28.52	0.64
10	32.21		37.73	4.98	42.71	1.06

ここで特に試料 4、6、8 については飽和度が低くなっているが、試料 4、8 については注入ポンプ停止期間中に水の侵入があること、また試料 6 については湿潤面の急速な膨潤による乾燥部の圧縮による間隙体積の減少が可能性として考えられる。また、後に評価された水の透過係数が上記飽和度に対する依存性が見られないことから、各試料は実際には飽和もしくはそれに近い状態にあると考えられた。

(2) ガス押し過程終了時における飽和度

ガス押し過程開始時に試料が完全に飽和していると仮定し、累積排水量の経時変化から試験終了時の試料の飽和度を求めた。その結果を表 2.1.1-2 に示す。

この表よりガス押し開始時の飽和度が 1.0 であれば、試験終了時における試料の飽和度は 0.53～0.90 の範囲に分布するとの結果となった。

表 2.1.1-2 排水量の経時変化から求めた試料の飽和度

試料	試験終了時の排水量 (ml)	管内の 残留水 (ml)	フィルタから の排水量 (ml)	試料間隙体積 (ml)	飽和度 (-)
1	12.0	5.3	—	31.87	—
3	13.0		1.05	33.37	0.80
4	20.1		2.16	31.30	0.60
6	13.5		1.88	33.38	0.81
7	12.8		1.61	32.39	0.82
8	23.4		3.32	31.37	0.53
10	11.2		2.82	32.21	0.90

2.1.2 水の透過係数

(1) 飽和試料の透過係数

各試料について飽和試料に対する水の透過係数を表 2.1.2-1に示す。

飽和試料の水の透過係数はすべての試験ケースの測定値が $5\text{E-}20\sim 9\text{E-}20(\text{m}^2)$ の範囲であり、既存の測定値と一致した値を示した。この点からも試料は飽和過程によりほぼ飽和に達していると判断することができる。

表 2.1.2-1 各試験における水透過係数

試料	1	3	4	6	7	8	10
流量 $Q(\text{m}^3/\text{sec})$	1.83E-11	2.07E-11	1.56E-11	1.21E-11	1.25E-11	2.09E-11	1.29E-11
差圧 (P1-P2)(Pa)	2.90E+06	2.77E+06	2.87E+06	2.81E+06	2.80E+06	3.43E+06	3.01E+06
水の透過係数 $K(\text{m}^2)$	7.40E-20	8.76E-20	6.34E-20	5.05E-20	5.23E-20	7.14E-20	5.04E-20

水の粘度: $1.002\text{E-}03 (\text{Pa} \cdot \text{s})$ 、試料長さ $L: 3.000\text{E-}02 (\text{m})$ 、断面積 $A: 2.570\text{E-}03 (\text{m}^2)$

2.1.3 ガスの透過係数

ブレイクスルー後のガス排出速度は、他の粘土系材料に対するガス透過試験でも見られるように間欠的、不連続に発生している。これは粘土系材料の透過機構そのものに原因があると考えられるが、一方で、本試験で用いた試験装置はガスフローメーターと試料の間に背圧レギュレータを介しており、大気圧に減圧後排出速度を測定していることも排出が間欠的に生じる原因として考えられる。ガス押し過程で得られたガスの見かけの（実効）透過係数は、ほぼ定常に達したと考えられる時期で試料 6、7 を除き $1\text{E-}20\text{m}^2$ の桁にあった。これは Boom Clay で得られた値と同等の値から約 1/10 の値の間にある。

2.1.4 ガス排出速度の急激な上昇

本年度はガス流路の閉塞圧力の検出を目的とした試験を実施し、ガスをより長期にわたって連続供給したが、急激にガス排出速度が上昇する現象が発生し、急速なガスの消費と圧力変動のため流路の閉塞を確認することができなかった。

この現象が生じる原因は、断面積の大きな卓越流路が形成するためであり、卓越流路は試料と円筒スリーブとの境界面、または試料内部に発生したと考えられる。この

うち、試料／円筒スリーブ界面に卓越流路が形成されたとする根拠は以下の通りである。

- ・ 試料に拘束圧が作用しないため、間隙圧力が試料の膨潤圧を超えて上昇すると、不連続界面である壁面との間において試料の圧密、変形により間隙を形成する。
- ・ 注入ガス圧に対して一定以上の拘束圧を負荷した条件下では、ガスフラックスの急激な上昇はあまり見られない。
- ・ 土壌の透水試験においても試料／容器界面において卓越流路を形成することがある。

一方、試料内部に大規模な流路が形成されたとする根拠は、以下の通りである。

- ・ ほぼ飽和した粘土ではポアソン比が相当程度大きいと考えられ、スリーブ界面において法線方向に作用する力は軸方向と同等であり、スリーブとの界面で間隙が生じる可能性が高いとはいえない。
- ・ 急激なガスフラックスの上昇はブレイクスルー後一定以上の期間が経過してから発生しており、微小な卓越流路が集中し飽和度が低下した部分で歪の発生、流路の統合により大断面積の流路が形成されていると考えることができる。

現時点では試験終了後試験容器から取出した試料の表面観察からは、明確な流路の痕跡は見出されていない。したがって、今後この現象に対する対策はそれぞれの流路形成位置に対して考慮する必要がある。

2.1.5 結論

本試験の試験条件及び本試験によって得られた結果をまとめて表 2.1.5-1に示す。

ベントナイト／珪砂混合比：70／30、乾燥密度 $\approx 1.6\text{g}/\text{cm}^3$ のほぼ水で飽和した資料を用い、試料に拘束圧を負荷しない硬岩系岩盤条件において、深度 500m 相当の水圧 5MPa を負荷した条件下で N_2 ガスを用いたガス透過試験を実施した。その結果以下のことが明らかになった。

- ① ガスのブレイクスルー圧力は 2～7MPa の間に分布した。
- ② ブレイクスルー後ほぼ定常に達した時点でのガスの透過係数は $1\text{E}-21\sim 1\text{E}-19\text{m}^2$ の範囲に分布した。
- ③ ブレイクスルー後も一定圧力下で試料からの排水は継続する。
- ④ 注入ガス圧力を減少させることにより水の排出速度が低下することは明らかとなったが、ガス排出速度が急激に上昇する現象のため、ガス流路が閉塞する圧力

3 2相流モデルの適用性評価

は確認できなかった。

- ⑤ 試験中に生じる急激なガス排出速度の上昇は、試料／円筒スリーブ界面での卓越流路形成によるものと考えられたが、今後さらに原因、機構の究明と対応策の実施、確認が必要である。

表 2.1.5-1 試験結果のまとめ

試験ケース	試料1	試料3	試料4	試料6	試料7	試料8	試料10	備考
高さ (cm)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	
直径 (cm)	5.72	5.72	5.72	5.72	5.72	5.72	5.72	
乾燥密度 (g/cm ³)	1.57	1.52	1.59	1.52	1.55	1.59	1.56	
間隙率 (-)	0.41	0.43	0.41	0.43	0.42	0.41	0.42	
絶対透過係数 (m ²)	7.40E-20	8.76E-20	6.34E-20	5.05E-20	5.23E-20	7.14E-20	5.04E-20	水の透過係数 (飽和時)
ガス押し開始時 飽和度(-)	0.97	0.91	0.54	0.67	0.90	0.64	1.06	注入水量より
ガス押し終了時 飽和度(-)	—	0.80	0.60	0.81	0.82	0.53	0.90	排出水量より (初期飽和)
計測上の threshold値 (MPa)	2.90	1.83	2.08	2.41	2.76	2.80	2.56	一定排水速度 検出時
計測上の ブレイクスルー値 (MPa)	2.90	2.66	4.92	3.68	3.57	7.11	2.78	一定排水速度 検出時
急激なガス排出 フラックスの増加	発生	発生	なし	発生	発生	発生	発生	

3. 2相流モデルの適用性評価

本章では、ベントナイト/砂混合材のガス移行特性のより正確な再現を目的として新規に開発されたモデルを適用し、1章に記述したガス透過試験のシミュレーションを行うことにより、当該モデルで用いるパラメータの値を設定した。また、このシミュレーション結果を、昨年度の研究成果として得られた2相流モデルパラメータを用いたシミュレーション結果と比較することにより、ベントナイト系材料中のガス移行に対する各モデルの適用性について評価した。

3.1 移行モデル

3.1.1 ベントナイト／砂モデル

現時点では移行機構の細部について特定できる段階にないことから、ここではメカニスティックなモデルではなく、多孔性媒体に対する既往のフローモデルを応用することにより、高圧縮ベントナイトに比較して相対的に大きな間隙水の排出量を再現しつつ、その他のガス侵入 threshold 圧、ガス透過経路の閉塞圧等についても粘土物質の特徴を再現可能なモデル（ベントナイト／砂モデル）を構築した。また、コード化においては、複数媒体で構成される多次元の系に対する解析を可能とするための効率的な手法として、ベントナイト／砂モデルは 2 相流解析コードである TOUGH2 に新たなモジュールとして組込む方法を採用した。

水で飽和したベントナイト／砂混合材のガス透過においては、有意な量の間隙水が排出されるため、既存の毛管束モデル及び国際共同研究において開発が進められている亀裂進展モデル、毛管進展モデルを適用することはできない。したがって、ここでは粒状媒体中の流体の透過係数を移行媒体の比表面積（あるいは透水半径）と間隙率との関係で記述する Kozeny-Carman モデルを適用することにより、ベントナイト／砂混合材中のガス移行挙動のより実際に近い再現を試みた。以下では上述の手法を用いて東洋エンジニアリング(株)が英国 AEA Technology と共同開発した、改良型 TOUGH2 コードを適用して解析を行った。

3.2 ガス透過試験のシミュレーション

本節では、ベントナイト／砂モデルを用いて行ったベントナイト／砂混合材料のガス透過試験結果に対するシミュレーションと、それによる各種モデルパラメータの設定値、さらに、シミュレーション結果に基づく当該モデルの適用性の評価について述べる。

3.2.1 試験条件及び結果

1、2 章に記述した、ベントナイト／珪砂混合材（混合率(wt%)=70/30）に対する硬岩系岩盤サイト条件でのガス透過試験結果で得られた排出ガス速度、及び排出水量の経時変化に対してフィッティングを行った。ここでは典型的なガス透過試験結果として試料 10 に対する結果を示す。

試料 10 に対するガス透過試験の試験条件を表 3.2.1-1に示す。

表 3.2.1-1 70/30 硬岩系岩盤条件に対する試験条件（試料 10）

項目	値／手法／仕様	備考
材料	ケゲル V1／3 号， 5 号珪砂	混合率 70/30wt%
試料寸法	5.72cm ϕ × 3.0cm H	円柱状
乾燥密度	1.56Mg/m ³	
間隙率	0.418	
ガス注入方法	ステップ昇圧	
背圧	5.0MPa	有効応力 0.43MPa (ブレイクスルー時)
拘束圧	—	

試料 10 に関する試験結果のうち、排出水量の経時変化を図 3.2.1-1に、ガス排出速度の経時変化を図 3.2.1-2に示す。ガスは Mx80 と同様に特定の注入ガス圧力に達した後試料内に侵入しているが、ベントナイト／砂混合材では試料中の間隙水を排出しつつ試料内を進展し、ブレイクスルー後試料下流側の装置内残流水を急速に排出した後、急激なガス放出を開始する様子が示されている。

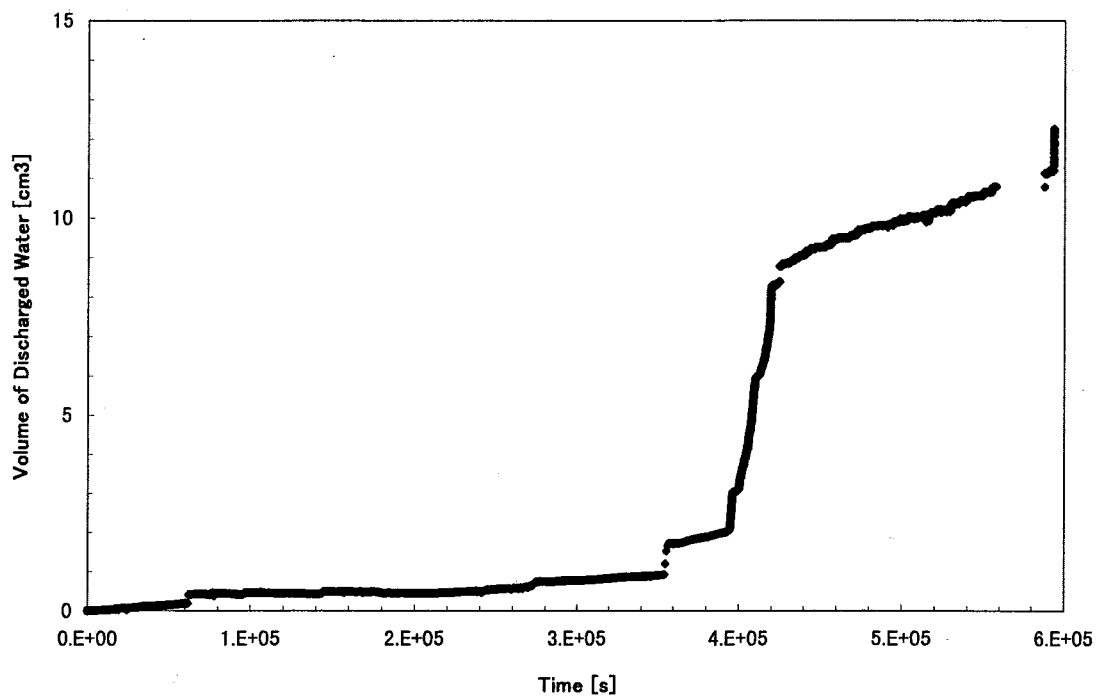


図 3.2.1-1 硬岩系岩盤条件での累積排出水量経時変化（試料 10）

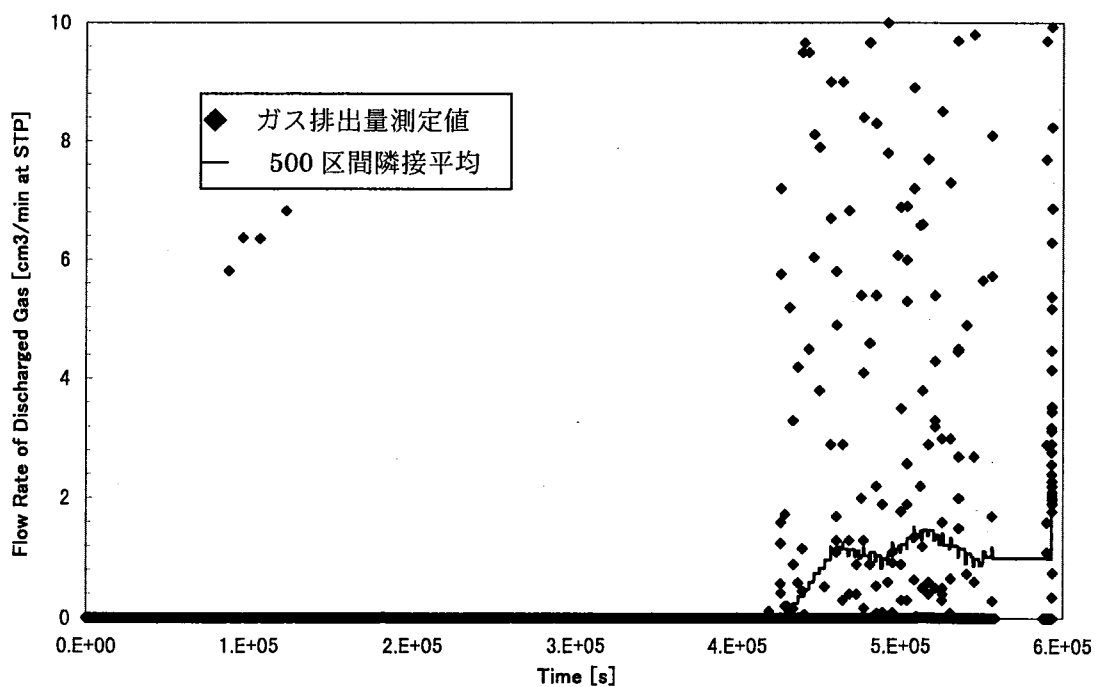


図 3.2.1-2 硬岩系岩盤条件でのガス排出速度経時変化（試料 10）

3.2.2 シミュレーション

Kozeny-Carman モデルを適用したベントナイト／砂モジュールを加えた TOUGH2 コードを用いて下記のパラメータを変化させ、累積排出水量、及びガス排出速度の経時変化に対してフィッティングを行うことにより、移行特性パラメータの設定を行った。ベントナイト／砂：70/30 混合材－硬岩系岩盤条件に対して設定された、試料 10 に対する各種モデルパラメータを、表 3.2.2-1に示す。

表 3.2.2-1 70/30 硬岩系岩盤条件に対するモデルパラメータ（試料 10）

試験条件	設定値	備考
初期条件		
注入ガス圧力	8.0MPa	一定速度で上昇
間隙水圧	5.0MPa	
間隙ガス圧	2.4855kPa	飽和水蒸気圧 at 21℃
特性パラメータ		
絶対透過係数	5.04E-20m ²	試験結果より設定
ブレイクスルー時のガス相対透過係数	2.14 E+1	試験結果より設定
ブレイクスルー時の過剰間隙ガス圧	1.40E+6Pa	試験結果より設定
移行経路閉塞時の過剰間隙ガス圧	5.0E+5Pa	想定値
弾性に係る定数	4.0 E+6Pa	フィッティングパラメータ
時定数	2.5 E-5	フィッティングパラメータ
形状因子	5.0 E+1	フィッティングパラメータ
k_{rg} の増加に係るスケールファクタ	6.9 E+2	フィッティングパラメータ

試料 10 に対するフィッティング結果を、図 3.2.2-1、及び図 3.2.2-2に示した。

ブレイクスルー直後のガス排出速度の上昇が試験結果に比較して緩やかであり、ブレイクスルー発生時期がやや遅く、ブレイクスルー後の水の排出速度がやや急速であるが、累積排出水量、ガス排出速度とも試験結果と良い一致を示していると考えられる。ブレイクスルー直後のガス排出速度の急激な上昇については、圧力変化に対する時間遅れを決定する時定数により調整可能であるが、移行媒体を複数の要素に分割して計算する REV (Representative Elementary Volume) モデル体系を適用する場合、各要素の状態変化が時間ステップ毎に進展することから、定常値に達するまである程度漸進的に変化する傾向は生じるものと考えられる。また、ブレイクスルー発生時期についてはブレイクスルー時の過剰間隙ガス圧及び形状因子、ブレイクスルー後の水の排出速度については同様に時定数及び形状因子を変化させることにより、さらに試験結果に近付けることは可能であると考えられる。

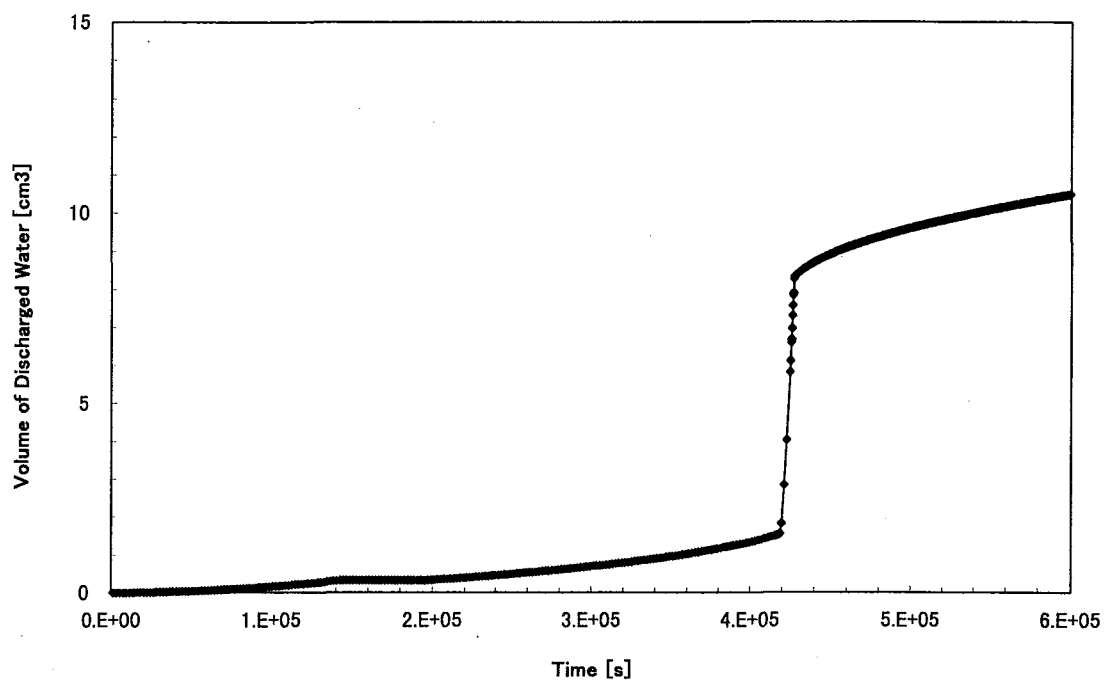


図 3.2.2-1 70/30 硬岩系岩盤条件に対するシミュレーション結果（試料 10 水）

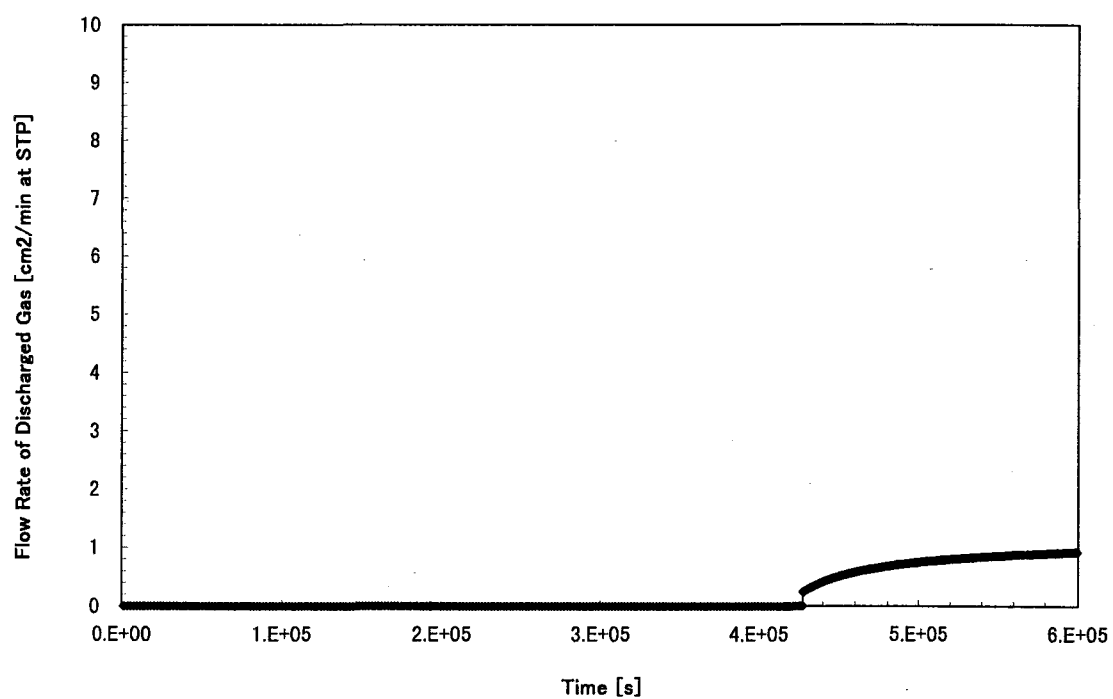


図 3.2.2-2 70/30 硬岩系岩盤条件に対するシミュレーション結果（試料 10 ガス）

4 処分システムのガス影響評価

4. 処分システムのガス影響評価

4.1 解析条件の設定

解析対象は TRU 廃棄物処分概念検討書において検討された、廃棄体グループ 2（ハル・エンドピース）を定置する坑道とした。解析にはベントナイト／砂混合材中のガス移行挙動を評価するためのモデルを組み込んだ改良版 TOUGH2 コードを使用した。

4.1.1 幾何モデル及び入力パラメータ

本解析では処分システムに対して 2 次元幾何形状を設定し、これを複数空間要素に分割して各バリア構成材量ごとに異なる代表的物性を付与した。

ベントナイト／砂モデルで用いる緩衝材の特性パラメータについては、得られたパラメータのうち、最も再現性の高い硬岩系岩盤条件の試料 10 に対する値を適用した。ベントナイト／砂モデルに対するパラメータ値を表 4.1.1-1 に示す。また、2 相流モデルに適用したパラメータは、昨年度結晶質岩系岩盤条件として実施した、処分場のガス移行解析と同一値とした。各バリアに設定した 2 相流パラメータ、及びその他の物性値を表 4.1.1-2 に示した。なお、ベントナイト／砂モデルを用いた解析では、埋め戻し材に対する特性パラメータが取得されていないことから、埋め戻し材に対しても緩衝材と同一のパラメータを用いた。また、ガス発生 の 停止時期及び発生量は TRU 廃棄物処分概念検討書で評価されたガス発生量解析結果に従うものとした。

硬岩系岩盤中の廃棄体グループ 2 処分坑道について、に幾何形状と空間要素の分割状態を示した。

表 4.1.1-1 ガス移行解析入力パラメーター ベントナイト/砂モデル

試験条件	設定値	備考
特性パラメータ		
絶対透過係数	5.04E-20m ²	試験結果より設定
ブレイクスル時のガス相対透過係数	2.14 E+1	試験結果より設定
ブレイクスル時の過剰間隙ガス圧	1.40E+6Pa	試験結果より設定
移行経路閉塞時の過剰間隙ガス圧	5.0E+5Pa	想定値
弾性に係る定数	4.0 E+6Pa	フィッティングパラメータ
時定数	2.5 E-5	フィッティングパラメータ
形状因子	5.0 E+1	フィッティングパラメータ
k_{rg} の増加に係るスケールファクタ	6.9 E+2	フィッティングパラメータ

注1) 埋め戻し材についても上記の緩衝材と同じ特性を与えた

注2) 緩衝材、埋め戻し材以外のバリアに対しては 2 相流モデルを適用し、表 4.1.1-2 に示す 2 相流パラメータを適用した

表 4.1.1-2 ガス移行解析入力パラメーター 2相流モデル

符号	名称	流体	絶対透過係数 (m^2)	相対透過係数(-)						毛管圧								間隙率 (-)
				計算式	S_{lr}	S_{sr}	m	n	S_{ls}	λ	計算式	$P_0(Pa)$	S_{lr}	η	$P_e(Pa)$	λ	S_{ls}	
1	廃棄体/充填材	水	1.00E-18	Corey	0.30	0.18	4.0	2.0	-	-	Narasimhan	1.20E+06	0.00	1.30	1.00E+05	-	-	0.22
		ガス	1.00E-16															
2	構造躯体	水	1.00E-18	Corey	0.30	0.18	4.0	2.0	-	-	Narasimhan	1.20E+06	0.00	1.30	1.00E+05	-	-	0.15
		ガス	1.00E-16															
3	緩衝材 (70/30 : 1.6g/cm ³)-2	水	7.86E-20	Corey変形	0.940		1.5	9.5			Narasimhan	2.50E+06	0.00	0.45	1.20E+06	-	-	0.43
		ガス	1.00E-19															
4	埋め戻し材 (廃棄体Gr.1,2)	水	8.20E-17	Sandia	0.997	0.00	-	-	1.0	2.0	Narasimhan	4.00E+06	0.00	1.00	9.00E+05	-	-	0.40
		ガス	1.30E-13	Corey			4.0	2.0	-	-								
5	母岩	水	8.20E-17	Corey	0.70	0.02	4.0	2.0	-	-	Narasimhan	1.40E+06	0.00	0.45	1.60E+04	-	-	0.02
		ガス	3.30E-15															

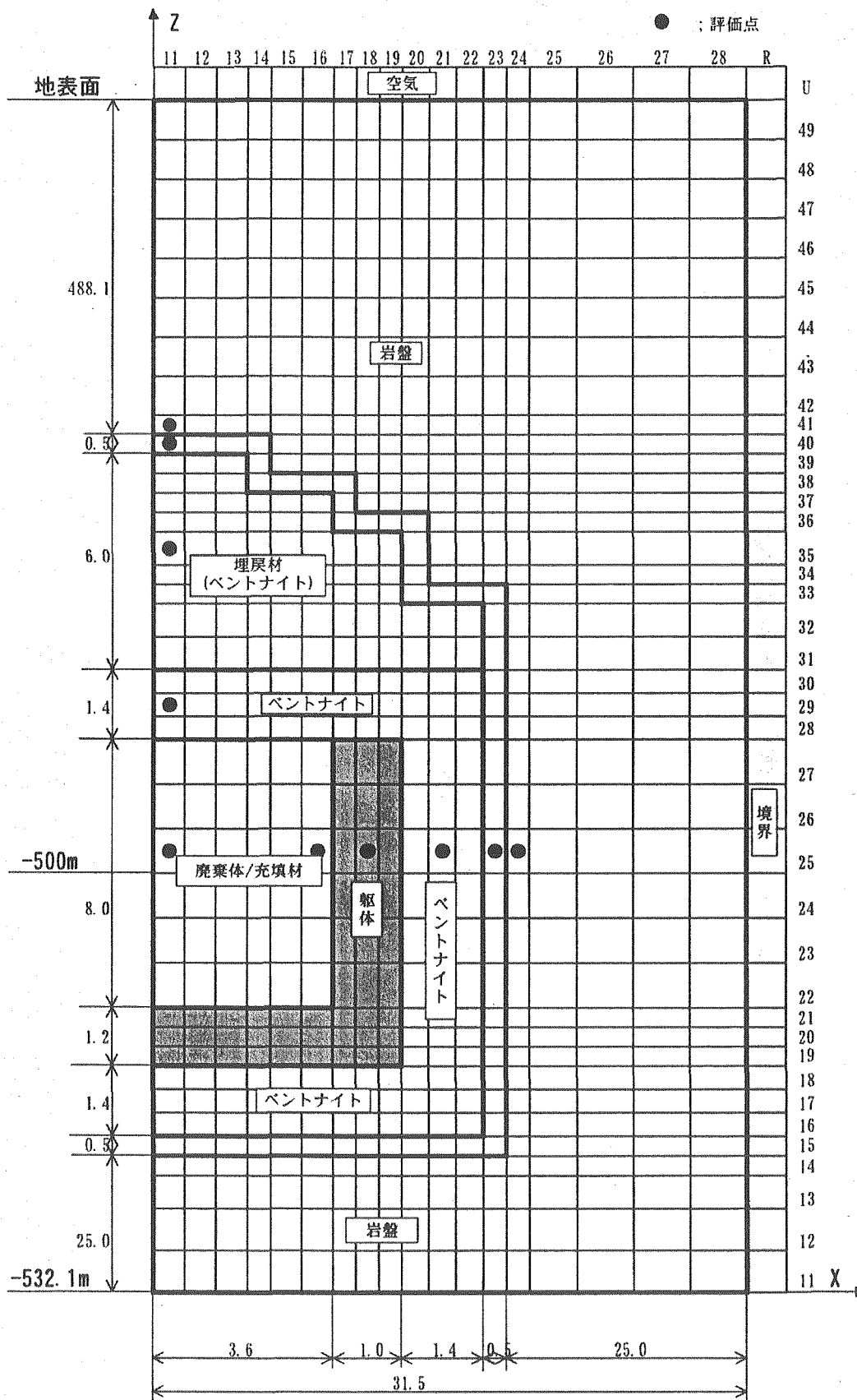


図 4.1.1-1 TRU 処分概念 硬岩系岩盤 Gr. 2 の解析モデル

4.2 ガス移行の影響評価

本節ではベントナイト／砂モデルを適用して得られた、ベントナイト／砂混合率：70/30 の移行特性値を用い処分場スケールでの解析を行った。この解析結果を2相流モデルで得られた解析結果と比較することにより、2相流モデル及びベントナイト／砂モデルのベントナイト／砂混合材への適用性について検討した。

4.2.1 2相流モデルによる解析結果

表 4.1.1-2 に示した2相流パラメータを用いて行った、硬岩系岩盤の廃棄体 Gr.2 処分坑道に対する解析結果を以下に示す。

(1) 間隙圧力の変化

解析結果を図 4.2.1-1に示す。最大間隙圧力は、ガス（気相）が緩衝材層に侵入を開始する処分場閉鎖後 140 から 150 年時点で出現し、廃棄体/充填材エリアにおいて 6.6MPa、緩衝材層においても 6.3MPa に達した。緩衝材エリアの最大間隙圧力と処分場深度における地下水压との差 1.3MPa は、緩衝材のガス侵入に対する threshold 値 1.2MPa にほぼ等しい。また、緩衝材層より内側の間隙圧力はその後漸減し、2000 年以降約 6.2MPa で定常となった。最大間隙圧力は緩衝材のガス侵入圧によって決定されることがわかる。

(2) 間隙水の排出

間隙水の累積排出量に関する解析結果を図 4.2.1-2に示す。ガス（気相）が緩衝材を透過して岩盤に到達する時期は処分場閉鎖後約 150 年以降であり、また、気泡は廃棄体/充填材エリアにおいて処分場閉鎖後 3～4 年で発生し、ガスの飽和度はその後上昇して、2000 年以降に 0.47 で定常に達している。ガス侵入後の緩衝材中におけるガスの飽和度は、比較的小さく 3～6%の間にあった。さらに、処分坑道から岩盤への間隙水の累積排出量は 700 年から 800 年で最大値に達し、その値は 8.2(m³/坑道 1m 当り)であった。

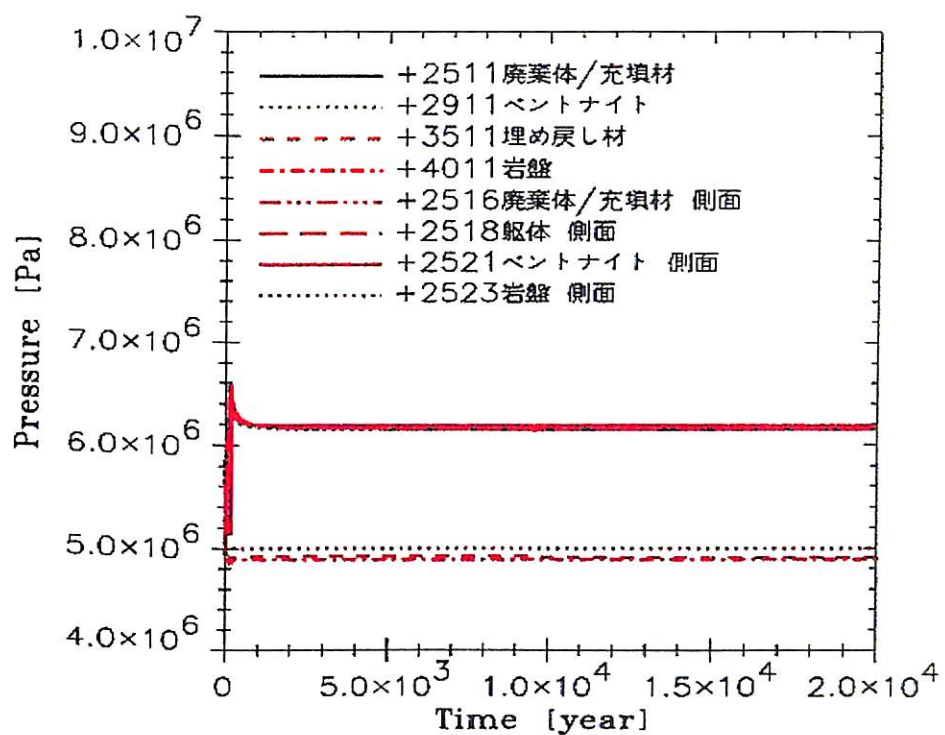


図 4.2.1-1 間隙圧力の経時変化 硬岩系岩盤 廃棄体 Gr. 2

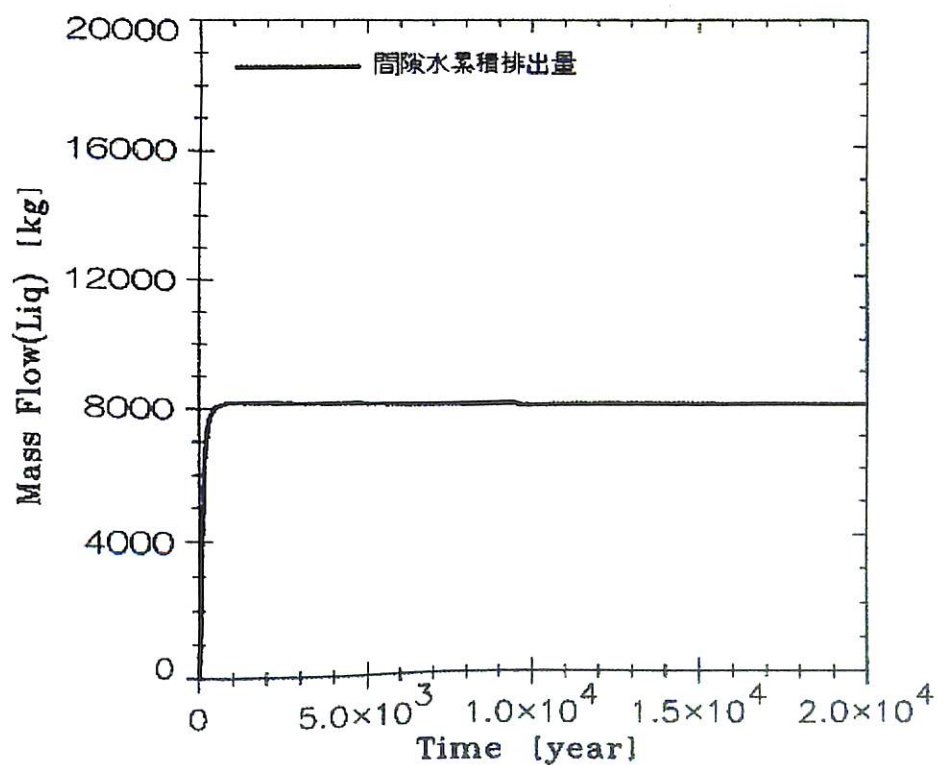


図 4.2.1-2 間隙水累積排出量 硬岩系岩盤 廃棄体 Gr. 2

4.2.2 ベントナイト／砂モデルによる解析結果

緩衝材及び埋め戻し材にベントナイト／砂モデルを適用し、表 4.1.3-2 に示したモデルパラメータを用いることにより、硬岩系岩盤及び軟岩系岩盤中の廃気体 Gr.2 処分坑道に対するガス移行解析を行なった。以下にその結果を示す。

(1) 間隙圧力の変化

解析結果を図 4.2.2-1 に示す。最大間隙圧力は廃棄体/充填材エリアにおいて、ガス（気相）が緩衝材層に侵入し、これを急速に透過する直前の処分場閉鎖後 120 年時点に 6.8MPa に到達する。この間隙圧力と処分深度における地下水圧との差 1.8MPa は、ガス透過試験のシミュレーションで設定されたブレイクスルー時の過剰間隙ガス圧 1.4MPa にほぼ等しい。その後間隙圧力は急激に 5.0MPa まで低下した後再び上昇し、ガスの発生量が低下する 5000 年まで 5.5 から 5.6MPa で定常となった。この時点での間隙圧力と地下水圧の差 0.5 から 0.6MPa は、このモデルパラメータにおいて想定した移行閉塞時の過剰間隙ガス圧 0.5MPa にほぼ一致する。

(2) 間隙水の排出

間隙水累積排出量に関する解析結果を図 4.2.2-2 に示す。ガスが緩衝材を透過して岩盤に到達する時期は、上述のように処分場閉鎖後約 120 年時点であった。なお、廃棄体/充填材エリアのガスの飽和度は約 150 年で最大の 0.30 となった後低下し、ほぼ 1000 年以降、ガスの発生量が低下する 5000 年までは 0.25 で定常を維持する。また、緩衝材中のガスの飽和度は透過経路が形成された部分で最大 0.30 に達するが、他の部分については 0.02 以下でありガスの飽和度の上昇が非常に小さい。処分坑道からの間隙水排出量は処分場閉鎖後約 120 年時点に最大の 4.7(m³/坑道 1m 当り)となるが、その後急速な間隙圧の低下によって地下水が処分場内に流入している。

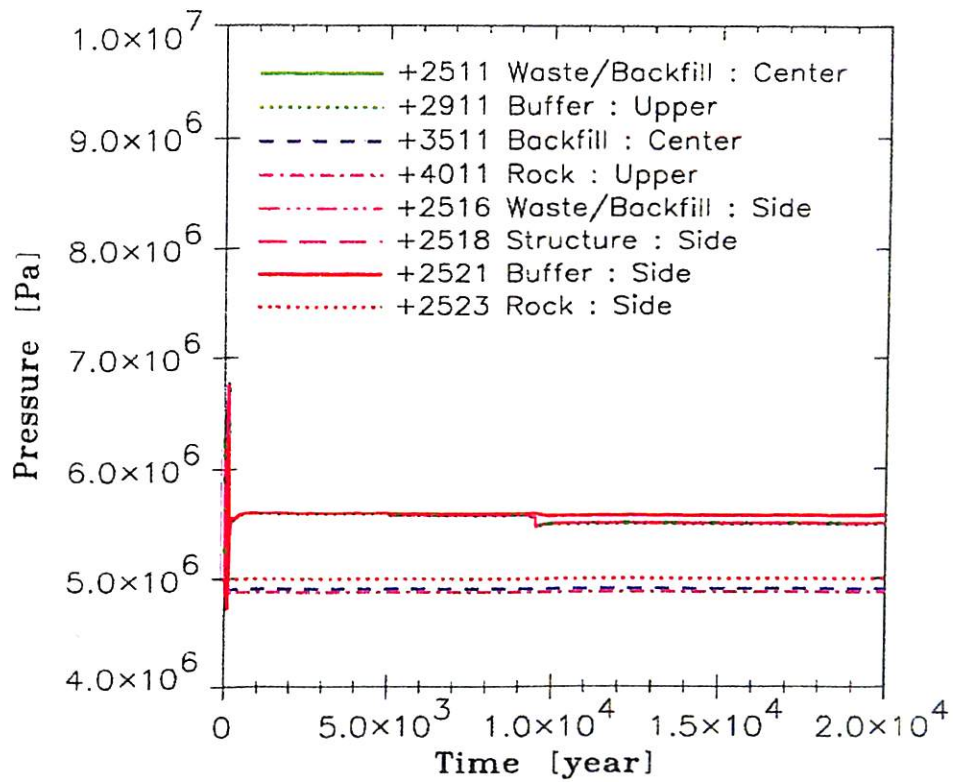
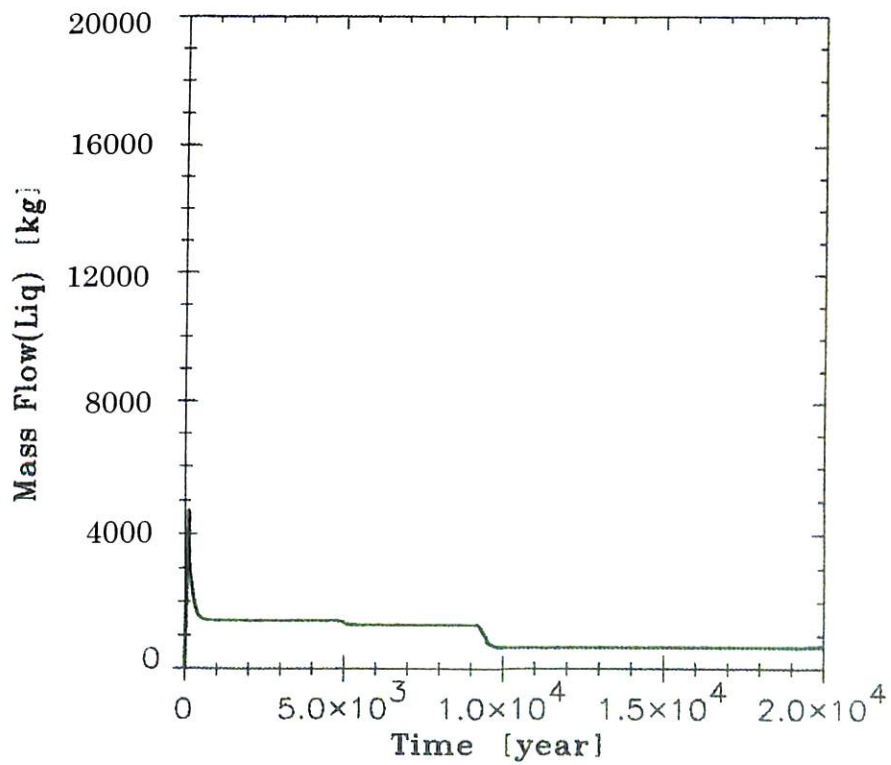


図 4.2.2-1 間隙圧力の経時変化 硬岩系岩盤 廃棄体 Gr.2 (ベントナイト/砂モデル)



4.3 まとめ

4.3.1 結論

2相流モデル、及びベントナイト／砂モデルによる廃棄体 Gr.2（ハル・エンドピース）処分坑道に対する解析結果の比較を示す。

最大間隙圧力は硬岩系岩盤中処分坑道において、2相流モデルで 6.6MPa（148 年）、ベントナイト／砂モデルで 6.7MPa（100 年）であり、ベントナイト／砂モデルの方が最大間隙圧出現時期（緩衝材中をガスが透過し圧力の低下が開始する時期）が早まるものの、圧力の値にはほとんど差はない。これより、2相流モデルでは緩衝材の毛管圧力の threshold 値、ガスの相対透過係数 vs.飽和度の関係が、またベントナイト／砂モデルではブレイクスルー時の過剰間隙ガス圧（ガス侵入圧力）、ブレイクスルー時のガス相対透過係数がそれぞれ適切に設定されれば、最大間隙圧力はほぼ等しい値で評価されるものと考えられる。一方、最大間隙圧力出現後の間隙圧力の変化は大きく異なっている。2相流モデルでは、ベントナイト層内の間隙圧力はガス（気相）の侵入以降、毛管圧の threshold 値によって決定されるため、不飽和である限り〔間隙水圧+threshold 値〕を下回ることはない。これに対し、ベントナイト／砂モデルでは間隙圧力の低下に移行経路閉塞時の過剰間隙ガス圧を制限値として設定する。今回の解析では移行経路閉塞時の過剰間隙ガス圧を 0.5MPa に設定しているため、間隙ガス圧が一旦ブレイクスルー圧の 6.4MPa を超えてガスが侵入した部分については、間隙ガス圧が 5.5MPa を下回るまでガスの透過とそれによる間隙ガス圧の低下が生じることになる。これより、ベントナイト／砂モデルでは緩衝材の透過特性にフィットした特性値を設定し、より現実的な解析が可能であるものと考えられる。

処分坑道内の間隙水累積排出量については、2相流モデルで 8.3m³/坑道 1m（2,000 年）、ベントナイト／砂モデルで 4.7m³/坑道 1m（120 年）であり、ベントナイト／砂モデルの方が早期に間隙水の排出が停止している。排水量に最も寄与の大きいと考えられる廃棄体/充填材エリアのガスの飽和度は、定常に達した時点で、2相流モデルで 0.47、ベントナイト／砂モデルで 0.25 であり、したがって累積排水量もベントナイト／砂モデルによる評価値は、2相流モデルのほぼ 1/2 と少ない値となっている。このようにベントナイト／砂モデルでは、緩衝材のブレイクスルー特性、移行経路の閉塞特性を反映したガス／水の移行の評価が可能であり、ガス移行特性試験結果を評価に反映しやすいモデルであると考えられる。

表 4.3.1-1 2相流モデル及びベントナイト/珪砂モデルによる解析結果の比較

天然バリア (処分場深度[m])	廃棄体 Gr.	解析ケース	施設形態	充填材 構造躯体	緩衝材 厚さ、配合比 [m]	廃棄体設置エリア 間隙率 [-]	坑道長 [m]	最大ガス発生密度 [mol/m ³ /y]	最大間隙圧力*1 /出現時期 [MPa] at [年]	最大間隙水排出量 (坑道単位長さ) m ³ /坑道1m at [年]	最大間隙水排出量 (全処分施設) [m ³]	備考
1. 硬岩系岩盤 500[m]	2	2相流モデル	坑道	OPC	1.4m ベントナイト/珪砂:70/30	0.22	336.0	112.4	6.6 /148年	8.3 /2,000年	2,789	ベントナイト/珪砂:70/30データを使用*2 (硬岩系岩盤条件)
		ベントナイト/砂 モデル							6.8 /120年	4.7 /120年	1,579	
2. 軟岩系岩盤 500[m]	2	2相流モデル	坑道	OPC	1.2~2.75m ベントナイト/珪砂:70/30	0.25	627.6	61.7	6.7 /100年	4.0 /2,000年	2,510	ベントナイト/珪砂:70/30データを使用*2 (硬岩系岩盤条件)
		ベントナイト/砂 モデル							6.8 /85年	1.8 /85年	1,318	

*1 最大間隙圧力は、廃棄体/充填材エリアの中央部エレメントの値とした。

*2 緩衝材の透過特性はベントナイト/珪砂配合率:70/30のデータを使用した。(結晶質岩条件(体積歪拘束)測定値)

4.3.2 今後の課題

Kozeny-Carman モデルの適用によるベントナイト／砂モデルの適用性について以下のことが明らかとなった。

- ① ベントナイト／砂モデルにより、従来の 2 相流モデルでの課題であったブレイクスルー後の過渡的現象（排出ガスフラックスの急激な上昇と定常値への漸近）が改善される。
- ② ベントナイト／砂モデルにより、ブレイクスルー後の過渡的特性を改善すると同時に、移行経路形成に伴う間隙水の排出を評価可能であることが明らかとなった。
- ③ ベントナイト／砂モデルにより、ガスの侵入、ガス流路の閉塞に関する圧力をフレキシブルに設定可能であり、透過試験結果をより实际的に解析に反映可能である見通しが得られた。
- ④ ベントナイト／砂モデルにより、ベントナイトの力学特性、可塑性に起因する圧力変化と流路形成、透過性変化との間の時間遅れについて評価可能であるとの見通しが得られた。

また、これらの成果を踏まえて摘出された、今後実施すべき課題は以下の通りである。

- ① 本年度実験的に得られなかったガス流路の閉塞圧力を測定評価し、ベントナイト／砂モデルでの再現性を確認する必要がある。
- ② ベントナイト／砂混合率、乾燥密度、有効粘土（スメクタイト）密度等による特性の変化についてデータを取得し、パラメータの変動、モデルの適用性について確認する必要がある。
- ③ Kozeny-Carman モデルとベントナイト／砂混合材中のガスの移行機構について検討し、主要パラメータについて物理的意味付けを行なう必要がある。
- ④ 各国における粘土中のガス移行モデルの開発動向を把握し、それぞれのモデルについて比較検討することにより合理的モデルの評価、選定を行なう。
- ⑤ 亀裂性媒体等、粘土系材料以外の移行媒体についてもデータ取得、モデル化、モデルの適用性の評価を行なう必要がある。

参 考 文 献

参 考 文 献

- 1) 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会（1980）：高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発の推進について
- 2) 核燃料サイクル開発機構（1999）：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 一地層処分研究開発第2次取りまとめ一，JNC TN1400 99-020~024.
- 3) 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会 TRU 廃棄物分科会（1991）：T R U核種を含む放射性廃棄物の処分について
- 4) 共同作業チーム，核燃料サイクル開発機構，電気事業連合会（報告書準備中）：T R U 廃棄物処分概念検討書