

ニアフィールド構成材料の ガスの移行特性に関する研究 (概要)

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003年 2月

東洋エンジニアリング株式会社

本資料の一部または全部を複写・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村松4番地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)
2003

ニアフィールド構成材料のガスの移行特性に関する研究 (概要)
(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

山本 幹彦*, 伊藤 隆雄*, 大場 敏行*

要 旨

廃棄物収納容器, 金属製廃棄物等は, 地層処分環境条件として予測される還元性雰囲気下において水還元型の腐食反応を生じ, 処分場内で H₂ ガスを発生する。さらに, 廃棄物に含まれる有機物は微生物活動によって分解されることにより, CH₄, CO₂ 等のガスを発生すると予測されている。処分場内で発生したガスは, その蓄積と移行の過程で人工バリアシステム内の間隙圧力上昇, 放射性核種に汚染された間隙水の早期排出, あるいは気体状放射性物質の早期移行等の現象を誘発することにより, 処分システムの長期安全性に影響を及ぼす可能性が指摘されている。

本研究は, ニアフィールドを構成するバリアのひとつである岩盤についてガス透過試験を実施し, ガス移行挙動解析に必要な特性パラメータの評価に資することを目的として実施した。測定対象は軟岩系岩盤より凝灰岩を選択し, 3 軸拘束条件下における飽和試料及び乾燥試料に対するガス透過試験, 並びに拘束遠心法, 水銀圧入による法毛管圧力の測定試験を行なった。その結果, ガス透過試験では 2 試料に対して試験を行い, 飽和試料の水の透過係数は $8.4 \times 10^{-19} \sim 8.9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ であった。また, 乾燥試料に対するガスの透過係数は $2.3 \times 10^{-16} \sim 2.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ で, 注入圧力の影響が見られた。さらに, ブレイクスルー時の差圧は約 700 ~ 1,700 kPa で注入圧力の昇圧速度の影響が見られたほか, 排水速度が急激に増加してガスブレイクスルーが生じた後のガス排出速度は, 粘土系材料とは異なり緩やかに増加する挙動が確認された。毛管圧力試験では Threshold 圧はほぼ 10¹ kPa の桁であり, 粘土系材料に比較して極めて小さく, 低飽和度領域において 10 MPa の桁であることが示された。

以上の試験結果より, 本凝灰岩試料は多孔質系媒体の特徴を強く示し, 連続媒体系に対する従来の 2 相流モデルが適用できる可能性が高く, 固液間の物理化学的相互作用は比較的大きいことが明らかとなった。

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との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当課室: 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部
処分材料研究グループ

* : 東洋エンジニアリング株式会社プロジェクト本部

Gas Migration Phenomena in Potential Components of
Near-Field Barrier System II(Summary)
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contact)

Mikihiko Yamamoto*, Takao Ito* and Toshiyuki Oba*

Abstract

Gas production resulting from some mechanisms, including metal corrosion and microbial degradation in a geological repository, enables to lead overpressurization of pore pressure and enhanced release of pore water with dissolved radionuclides.

In this study, gas injection experiments under three-dimensional confinement pressure, a gas-water capillary pressure test using high speed centrifuge method and high pressure mercury injection test were performed on tuff core samples to clarify flow parameters of gas and water.

Results of the gas injection tests under the condition of constant injection pressure and axial flow were described. The water permeability of saturated samples were existing between 8.4×10^{-19} and $8.9 \times 10^{-19} \text{m}^2$, although the gas permeability of dried sample were varied between 2.3×10^{-16} and $2.5 \times 10^{-15} \text{m}^2$ depending on gas injection pressure. Gas breakthrough phenomenon after rapid rise in outflow rate of water was indicated rather slow increase of gas outflow than that observed on clay materials. Obtained excess pressure when the breakthrough phenomena occurred were 700 and 1,700 kPa . Grater the gas injection pressure, higher the excess pressure at breakthrough. Threshold pressure obtained from the capillary pressure test was order of 10^1 kPa which was two order of magnitude lower than the value of clay materials.

Based on these experimental results, the gas migration process and the retention curve of the tuff sample indicated typical properties observed on porous media. Thus it is expected that the conventional continuum two-phase flow model will be applied reasonably for the tuff sample.

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

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

* Toyo Engineering Corporation Domestic Project Division

目 次

1	はじめに	1
2	地質媒体のガス移行特性データ取得及びガス移行特性の検討	2
2.1	ガス透過試験	2
2.1.1	試料調整パラメータ	2
2.1.2	試験条件パラメータ	2
2.2	試験操作	3
2.3	試験結果	5
2.3.1	飽和過程後期	5
2.3.2	ガス押し過程	7
2.3.3	乾燥試料に対するガスの透過係数	13
2.4	毛管圧力の測定評価	16
2.4.1	試験方法	16
2.4.2	試験結果	17
2.5	結論	19
2.5.1	ガス透過試験	19
2.5.2	毛管圧力の測定評価	19
2.5.3	今後の課題	20

目 次

図 2-1	試験手順	4
図 2-2	飽和過程後期における注入圧力の経時変化(供試体 4)	6
図 2-3	飽和試料の透過係数の評価(供試体 4)	6
図 2-4	ガス押し過程における注入圧力の系時変化(供試体 4)	9
図 2-5	ガス押し過程におけるガス排出速度の系時変化(供試体 4)	9
図 2-6	ガス押し過程における累積排出水量の系時変化(供試体 4)	10
図 2-7	ガス透過時における水の透過係数の変化(供試体 4)	12
図 2-8	ガス透過時におけるガスの透過係数の変化(供試体 4)	13
図 2-9	乾燥試料に対するガス注入圧力の変化(供試体 4)	14
図 2-10	乾燥試料に対するガス排出速度の変化(供試体 4)	14
図 2-11	Klinkenberg 透過係数の評価(供試体 4)	15
図 2-12	試験後の供試体(供試体 4)	15
図 3-14	軽石凝灰岩の毛管圧力と飽和度との関係(遠心法)	18

表 目 次

表 2-1	軽石凝灰岩の基本諸元	2
表 2-2	基本的試験条件	3
表 2-3	飽和試料の透過係数の算定(供試体 4)	7
表 2-4	排出水量より求めた試験終了後の間隙水飽和度(供試体 4)	11
表 2-5	重量測定より求めた試験終了後の間隙水飽和度(供試体 4)	11
表 2-7	各供試体の基本物性及び透過特性	16
表 2-7	測定方法による特性値の比較	17

1 はじめに

我が国の地層処分対策は、高レベル放射性廃棄物に対して昭和 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)、平成 5 年 5 月に高レベル事業推進準備会が設立された後、平成 12 年 6 月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が公布された。これを受けて同年 10 月に通商産業大臣(当時)の認可を得て「原子力発電環境整備機構」が設立され、平成 14 年 12 月 19 日には全国の市町村を対象として、処分施設設置可能性調査区域の公募が開始された。一方、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)、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。また、T R U核種を含む放射性廃棄物に対しては、原子力委員会において昭和 63 年 10 月に放射性廃棄物対策専門部会の下に設置された T R U廃棄物分科会が、平成 3 年 7 月に「T R U核種を含む放射性廃棄物の処分について」)をとりまとめ、T R U廃棄物の区分目安値(全核種濃度：約 1GBq/t)を示すとともに、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 12 年 3 月に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」)がとりまとめられ、原子力委員会原子力バックエンド専門部会における審議の基礎資料として供されている。

処分場内で金属腐食等によって発生するガスの影響は、EU 諸国による国際研究プロジェクト、米国における WIPP、Yucca Mt.に対する性能評価研究を中心に研究開発が実施されているが、研究開始が 1980 年代後半と歴史が浅く、OECD/NEA の見解としても、各バリア構成材料とも評価モデルの確立、十分なデータの取得には至っていないのが現状である。

本研究では地層処分研究開発第 2 次取りまとめ、及び T R U廃棄物処分概念検討書の成果を踏まえ、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ため、ニアフィールド構成材料の 1 つである地質媒体の中から、堆積岩系岩盤の一種である凝灰岩に対して三軸拘束型のガス透過試験装置を用い、地層環境を模擬した試験条件においてガス及び水の透過量の経時変化を測定するとともに、高速遠心法等により毛管圧力特性を評価し、凝灰岩中のガスの移行挙動を検討することにより、気液 2 相流モデルに基づくガス移行特性データの設定のための基礎データの整備を行った。

2 地質媒体のガス移行特性データ取得及びガス移行特性の検討

代表的なニアフィールド構成材料としては、緩衝材としての粘土系材料、充填材、構造躯体、支保工としてのセメント系材料のほか、処分空洞近傍の岩盤がある。本年度はこれらのニアフィールド構成材料のうち、処分場内の間隙圧力、及び地表へのガスの移行に重要な影響を及ぼすと考えられている地質媒体に対して、三軸拘束型のガス透過試験装置を用いることにより、飽和から非定常のガスの透過試験、及び各間隙水飽和度における毛管圧力の測定を行った。現時点では処分場が設置される地質媒体の種類としてはさまざまな岩種が候補となるが、本年度は軟岩系岩盤の中から透水特性が得られている凝灰岩を選択した。また、得られた試験結果に基づいて凝灰岩中のガス移行の特徴、機構について検討した。

2.1 ガス透過試験

既往の石油資源開発分野における研究開発により、砂岩、塩基性岩等の多孔質媒体の特性を示す傾向が強い岩盤に対しては、経験的に連続媒体中の2相流モデルを適用できることが知られており、今回測定対象とした凝灰岩もその構成物質、間隙構造から多孔質媒体としての特性を示す傾向が高いと考えられる。連続媒体に対する2相流モデルを用いた解析には、ガス及び水の絶対透過係数、相対透過係数、ガス侵入圧(threshold 圧)等のパラメータが必要となる。これらのパラメータは、特定圧力/応力条件下でのガス及び水の排出量の経時変化の測定によって評価することができる。本項ではこれらの値を測定するためのガス透過試験に対して設定された試験条件を示す。

2.1.1 試料調整パラメータ

本研究で用いられた供試体の諸元を以下に示す。

表 2-1 軽石凝灰岩試料の諸元

材料名	産地等	強度(既往値)	
軽石凝灰岩	栃木県大谷産 平成 13 年 8 月切出し	一軸圧縮強度	6.5 MPa

2.1.2 試験条件パラメータ

本年度実施したガス移行試験条件を、表 2-2に示す。

表 2-2 基本的試験条件

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	材料	試験点数
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 相当の背圧 注入圧 + 3.5MPaの拘 束圧	厚さ 50mm 直径 77mm	軽石凝灰岩	2試料
排水時相対透過係数 (水) 排水時相対透過係数 (ガス) threshold圧力	間隙水飽和試料の ガス押し	累積排出水量の 経時変化 ガス排出速度の 経時変化 ブレイクスルー/ ガス入り圧力				
ガス注入圧力と 実効透過係数の関係	乾燥試料の ガス押し	ガス排出速度の 経時変化				
飽和度	試料中水分量	重量変化				

2.2 試験操作

寸法測定により所定の寸法に成型加工されていることを確認したコア試料の中から、両端面及び側面に欠損の少ない試料を選び、重量を測定した後、試験容器中の Viton 製スリーブ内に挿入し、フェルール、ラムチップ等の蓋閉め部部品を設置することにより、容器を密封する。その後のガス透過試験は、以下に示す一連の操作工程に従って実施された。

脱気純水により供試体を飽和させる。(飽和過程)

飽和供試体の水透過係数を測定する。

注入する流体を脱気純水から N_2 ガスに切り替え、注入圧力を段階的に昇圧してガス、水の排出量を測定し、threshold / ブレイクスルー圧を検出する。(ガス押し過程)

threshold、及び特にブレイクスルーの検出後、ガス注入圧力を一定に保持しデータ記録のインターバルを段階的に短縮して、ガス、水の排出量の経時変化を測定する。

ブレイクスルー出現後、ガス排出速度がほぼ一定になるまでガス、水の排出量の経時変化を測定する。(フラックス一定過程)

ガス注入圧力を背圧まで低下させた後、試験容器内を減圧して供試体を取り出し、速やかに試験後の重量を測定する。

供試体を乾燥器内で 100 ~ 110 °C にて 48 時間以上乾燥させた後、乾燥後の重量を測定し飽和度の算定に資する。

乾燥供試体に対するガスの透過係数評価のため、再度ガス透過試験を行う。

図 2-1 に試験手順フローを示す。

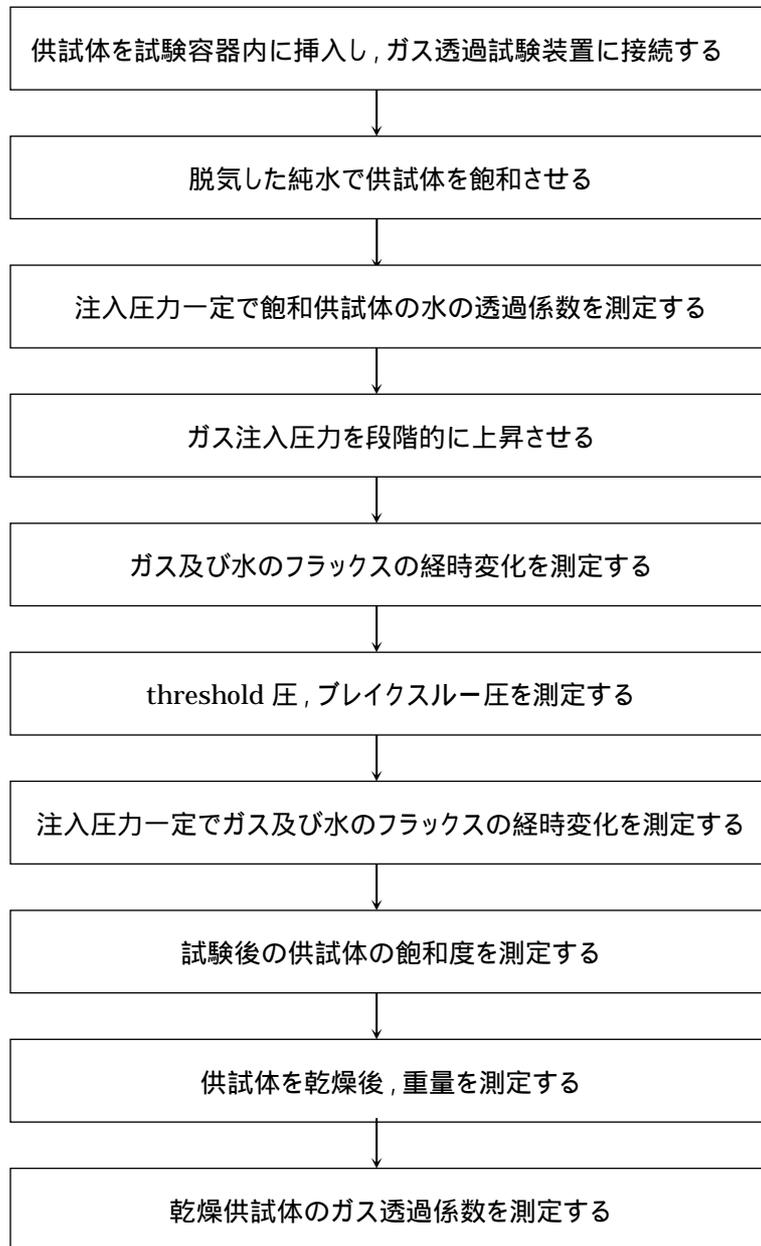


図 2-1 試験手順

2.3 試験結果

実施した 2 供試体の試験から、代表として供試体 4 に対する試験結果を以下に示す。

2.3.1 飽和過程後期

飽和過程後期（供試体上流側から注入し排出水量を測定）における注入圧力の経時変化の経時変化を図 2-2に示した。

上下流側両端の注入水圧を約 5,000 kPa で一定とした飽和過程前期の終了後、供試体下流側の圧力（背圧）を 5,000 kPa で一定とし、供試体上流側の注入圧力のみを昇圧することにより水を透過させた。注入圧力は 50 kPa/1 時間でステップ状に昇圧させ 6,100 kPa まで昇圧して約 215 時間保持した。飽和過程後期に供試体内に注入された水の量は約 3.5 ml であると考えられ、飽和過程前後期を通じて供試体内に注入された水量は合計約 58 ml であった。供試体への累積注入量と供試体からの累積排出水量との差は、昇圧開始から約 150 時間以降ではほぼ一定となり、注入速度と排水速度が一致したことから飽和が達成されたものとみなし、この範囲で水の透過係数の評価を行った。

排水速度がほぼ一定となった昇圧開始後 100 時間以降の期間で得られたデータを用いて、飽和試料に対する水の透過係数値を算定した。水の透過速度の評価結果を図 2-3に、透過係数の算定結果を表 2-3に示した。

供試体からの排出水量は十分な精度で直線に近似され、これに基づいて本供試体に対して得られた飽和時の水による透過係数は $8.92 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ であった。この値は、供試体 3 で得られた透過係数値 $8.45 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ と極めて良い一致を示すほか、平成 13 年 8 月に切り出された同一の岩石ブロックから作成された軽石凝灰岩供試体によって得られた透水係数値、約 $1.6 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ($1.56 \times 10^{-18} \text{ m}^2$) とよく一致している。

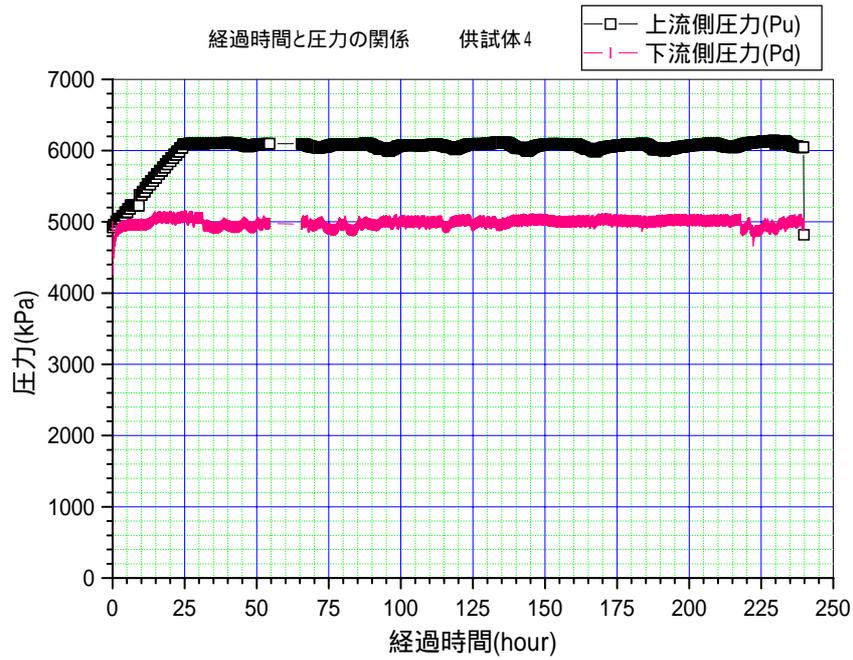


図 2-2 飽和過程後期における注入圧力の経時変化(供試体 4)

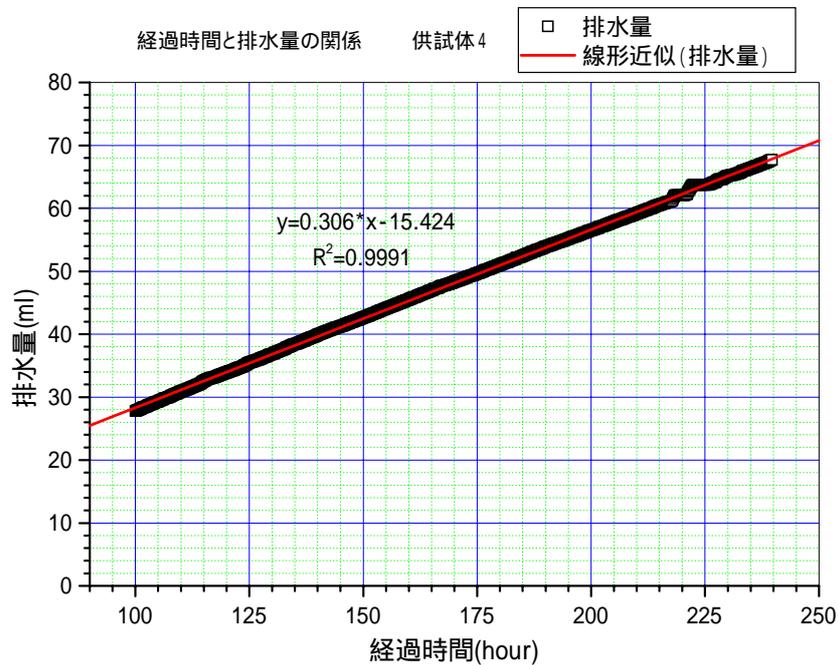


図 2-3 飽和試料の透過係数の評価(供試体 4)

表 2-3 飽和試料の透過係数の算定(供試体 4)

	水の粘性係数	Pa·s	1.002E-03
d	試料の直径	m	7.617E-02
L	試料の長さ	m	5.130E-02
Q	排出水速度	m ³ /s	8.500E-11
P2	下流側圧力	Pa	1.075E+06
Kw	水の透過係数	m ²	8.922E-19

Qの算出

a	勾配		3.060E-01
Q	排出水速度	m ³ /s	8.500E-11

2.3.2 ガス押し過程

供試体 4 に対するガス押し過程における注入ガス圧力と背圧、ガス排出速度、及び累積排出水量の経時変化を図 2-4～図 2-5に示した。

注入流体を N₂ ガスに切り替えて、注入ガス圧力を 5,050 kPa から 10 kPa/1 時間でステップ状に昇圧した。注入圧力はブレイクスルーが検出されれば昇圧を停止し、その時点以降一定圧となるように設定した。

ガス押し過程初期の累積排出水量が間欠的に生じたため、累積排出水量が供試体上流側配管内残留水量の 0.32 ml を超えた時点は明確に把握できなかった。このため供試体にガスが侵入した threshold 圧は、累積排出水量が 1.05 ml を示した 229 kPa 以下となるが、これは後段で記述する毛管圧の測定試験より得られた threshold 圧（高速遠心法：10～20 kPa、水銀圧入法：50 kPa）に比較して高い値である。

供試体へのガスの侵入開始後排出水量は徐々に増加し、ガス押し過程開始後約 84 時間のガス排出を検出し始めた時点（計測上のブレイクスルー）で 12.6 ml に達している。この値は、粘土系材料（ベントナイト/珪砂：70/30）の 1～4 ml、JIS モルタルの 3 ml に比較して多く、W/C = 0.85 のセメントペーストで観測された 6～7 ml をも上回る値である。これは間隙率が平均で 0.357 と大きく、Macro pore 及び Meso pore の占める間隙率が 0.23 と、JIS モルタルの 0.05、W/C = 0.85 のセメントペーストの 0.1 以下と比較して大きいことから、低圧力勾配においてガスと置換する間隙水量の多いことが説明できる。

ガス押し過程開始後約 84 時間のガス排出を検出し始めた時点(計測上のブレイクスルー) からからガス注入圧力を約 5,700 kPa で約 202 時間保持した。この間ガス排出速度は供試体 3 と同様に緩やかに上昇を続け、ガス排出速度の 100 区間移動平均値はガス押し過程開始後 250 時間付近で 12~13 Nml/min でほぼ一定となっている。また、図 2-5に示すようにガス注入ポンプの吐出量から評価した供試体へのガス注入速度の平均値は、ガスフローメータの測定値に基づくガス排出速度の平均値に非常によく一致している。

試験装置からの累積排水量は、ガス押し過程開始後ほぼ 250 時間以降では増加を示さず、試験終了時点で 24.4 ml であった。しかしながら、供試体 3 と同様に試験終了後供試体下流側配管の減圧の過程で約 9 ml の水が排出され、合計 33.7 ml となった。これは平均約 12~13 Nml/min 程度の微小なガス流量では排出されなかった水が、配管内に残留していた可能性を示すものと考えられる。

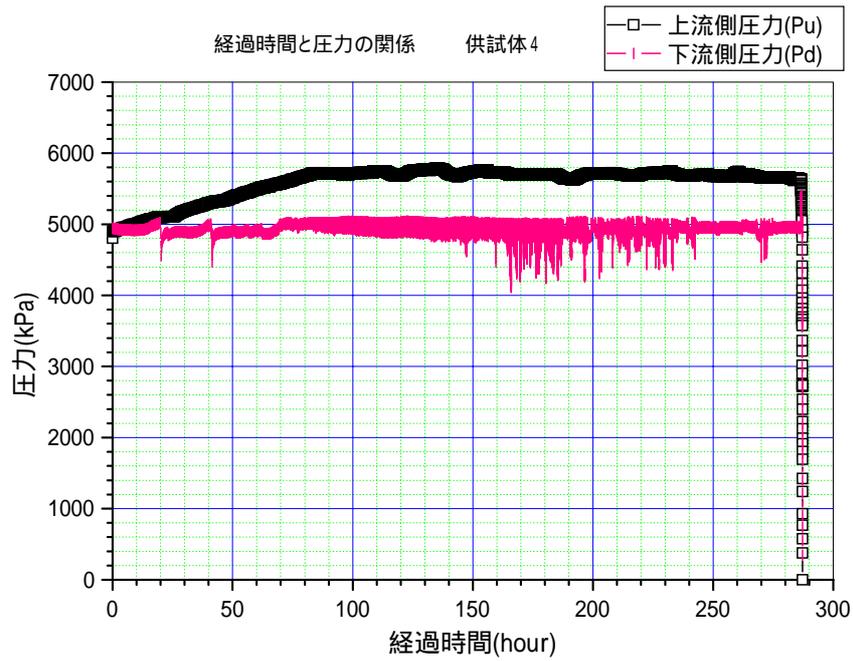


図 2-4 ガス押し過程における注入圧力の系時変化(供試体 4)

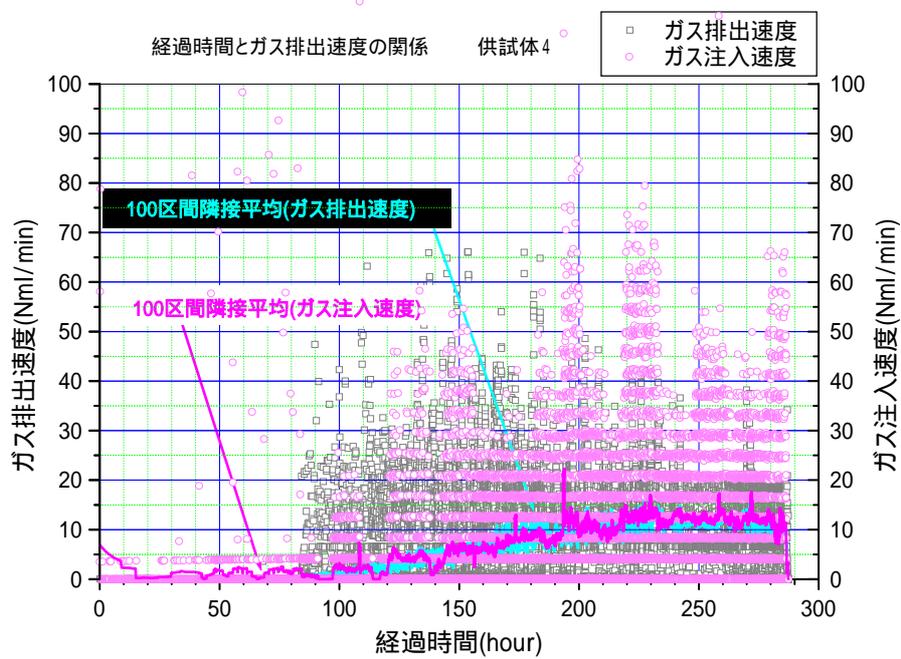


図 2-5 ガス押し過程におけるガス排出速度の系時変化(供試体 4)

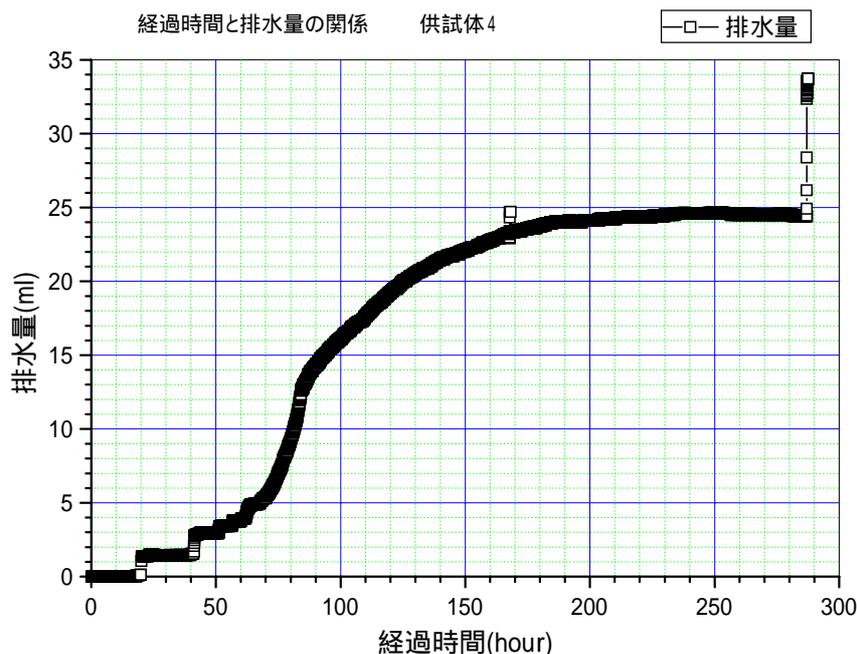


図 2-6 ガス押し過程における累積排水量の系時変化(供試体 4)

(1) 飽和度の変化

ガス押し開始時点で供試体の飽和度が 1.0 に達していたと仮定して、試験装置からの排水量より算定した試験後の供試体内の平均飽和度を表 2-4 に示した。また、ガス押し過程終了後、及び 110 にて 48 時間乾燥した後の供試体重量と、毛管圧測定試験で得られた間隙率から算定した平均間隙水飽和度を表 2-5 に示した。

排水量から評価した平均飽和度は試験終了後減圧前の値として 0.80、減圧後の排水量を加えた場合には 0.69 と算出された。これは、上述のように水銀圧入法で得られた間隙径分布特性では 0.5 μm 以上の間隙径が 23 % を占める (JIS モルタル : 5 % , W/C = 0.85 のセメントペースト : 0.5 %) ことから、相対的にごく低い圧力でガスが侵入し水との置換が進行する特性になるものと予測できる。また、高速遠心法で得られた毛管圧力と間隙水飽和度との関係 (retention curve) では、ガス押し過程において載荷した最大の差圧である約 850 kPa に相当する間隙水飽和度は 0.70 であり、減圧後の排水量を加えた場合の飽和度算定値に近い値となった。

一方、各工程の重量測定結果より評価した供試体内の平均飽和度は、飽和過程開

始前では 0.26 であり，粘土系材料の風乾状態での飽和度に近い値を示したが，ガス押し過程終了後に関しては 0.90 と大きい値を示している。これについては，供試体 3 と同様に供試体内間隙水の排出量が約 7.9 ml と過少であることから，減圧時あるいは試験容器から供試体を取り出す際に，計測用配管内，周方向拘束ジャケット内等の水との接触が生じたことにより，水が供試体に含浸したものと考えられる。

表 2-4 排出水量より求めた試験終了後の間隙水飽和度（供試体 4）

(1)減圧前の排出量に表 水の排出量(最終過程) (試料4)

名称	体積(cm ³)	間隙率()	間隙容積(cm ³)	排出水容積(cm ³)	試験後飽和度()
上流側配管	0.32	1.00	0.32	0.32	0.00
試料	233.76	0.357	83.45	16.81	0.80
下流側配管	7.30	1.00	7.30	7.30	0.00
合計	241.38			24.43	

(2)減圧後の排出量を加えた場合

名称	体積(cm ³)	間隙率()	間隙容積(cm ³)	排出水容積(cm ³)	試験後飽和度()
上流側配管	0.32	1.00	0.32	0.32	0.00
試料	233.76	0.357	83.45	26.10	0.69
下流側配管	7.30	1.00	7.30	7.30	0.00
合計	241.38			33.72	

表 2-5 重量測定より求めた試験終了後の間隙水飽和度（供試体 4）

名称	重量(g)	飽和度()
試験前重量	361.44	0.26
試験後重量	415.20	0.90
乾燥後重量	339.69	0.00
ガス押し後残留水量	75.51	

(2) ガス透過時の透過係数の変化

ガス押し工程における水及びガスに対する見かけの透過係数の変化を，それぞれ図 2-7，及び図 2-8に示した。

水の見かけの透過係数の変化は，ガス押し過程開始後 20 時間以前にあると考えら

れる threshold 圧 (<229 kPa) に達するまでは、初期の排水が間欠的に生じたため供試体上流側配管内の残留水の注入によると考えられる透過係数の変動が大きいが、平均値は 10^{-19} m^2 の桁にあると考えられる。約 20 時間以降、供試体内にガスが侵入した後の水 / ガスの置換過程における水の透過係数も同じ理由で変動が大きいが、上記と同様の範囲にあると考えられる。次に、ガス押し過程開始約 84 時間後の計測上のブレイクスルー時点をピークとして、ブレイクスルーに伴う下流側配管内の残留水の放出によると考えられる、急激な透過係数の上昇と下降が約 20 時間にわたって生じ、最大で $6 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ を示した。供試体下流側残留水の排出後、見かけの透過係数は $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ から間隙水飽和度の低下に伴って 10^{-19} m^2 の桁に低下し、ガス押し過程開始後 250 時間以降では水の排出はほとんど停止した。

ガスの透過係数は、ガスの排出が検出され始めるガス押し過程開始約 84 時間後(注入圧力：約 5,700 kPa)以降、供試体内の間隙水飽和度の低下に従って増加し、試験終了時点で $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ に達し、さらにごく緩やかに上昇中であった。

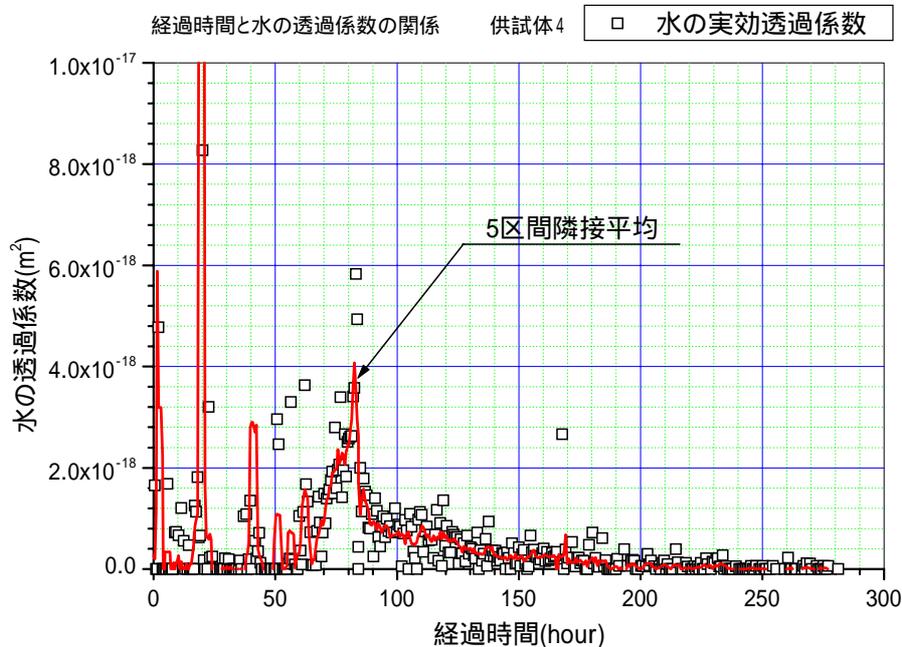


図 2-7 ガス透過時における水の透過係数の変化 (供試体 4)

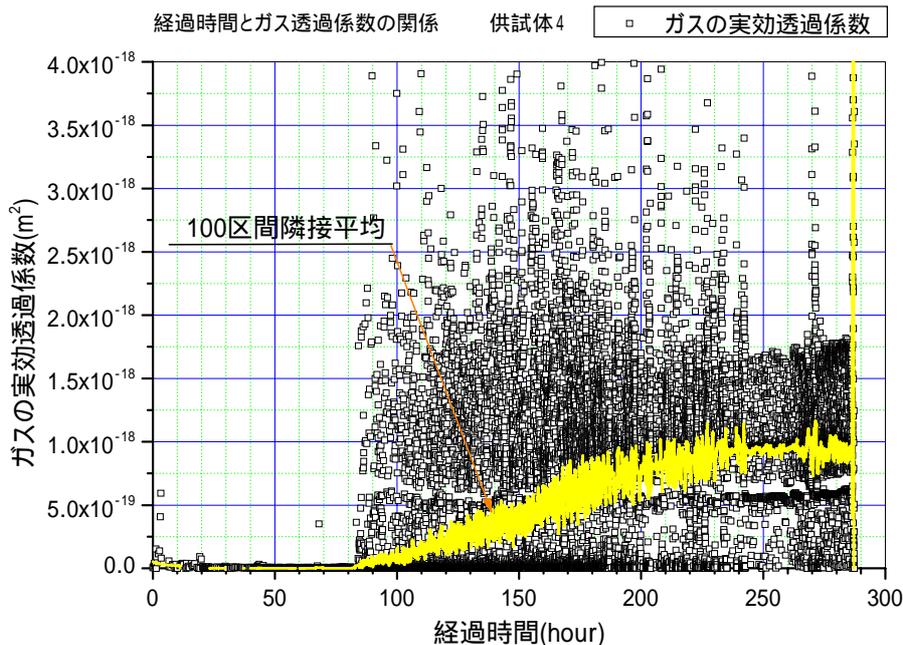


図 2-8 ガス透過時におけるガスの透過係数の変化（供試体 4）

2.3.3 乾燥試料に対するガスの透過係数

ガス押し過程終了後 110 で 48 時間乾燥させた供試体を用いて、乾燥試料に対するガスの透過係数を測定した。背圧は载荷せず拘束圧をガス注入圧力 + 3,500 kPa に維持して測定された、ガス注入圧力の経時変化、及びガス排出速度の経時変化を、それぞれ図 2-9、図 2-10に示した。

ガス注入圧力を約 170 kPa、90 kPa、40 kPa の 3 段階に変化させてガス排出速度の変化を測定した。ガス排出速度はガス注入圧力の増減に従って増減することが示されている。圧力勾配を変化させて測定したガス排出速度に対して算定されたガスの透過係数には、供試体中の圧力勾配の減少により見かけの透過係数が増加する挙動が現われている。平均間隙圧力の変化による透過係数への影響を図 2-11に示した。

平均間隙圧力（供試体上流側圧力(ガス注入圧力) P_u と供試体下流側圧力(背圧) P_d の平均値とした）の逆数と、見かけの透過係数が直線関係にあることが明らかである。この関係から Knudsen 流の影響を排除し、ガスの透過係数を基に非圧縮性流体（液体）の絶対透過係数：Klinkenberg 透過係数を評価した。これはガス圧力を無限大としたときの透過係数として評価され、本供試体では $2.38 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ であった。

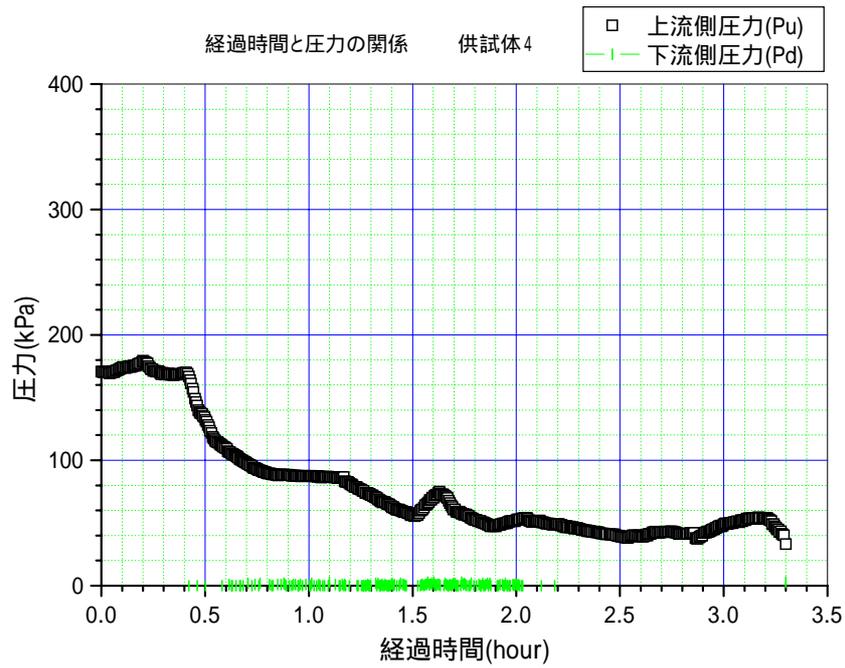


図 2-9 乾燥試料に対するガス注入圧力の変化 (供試体 4)

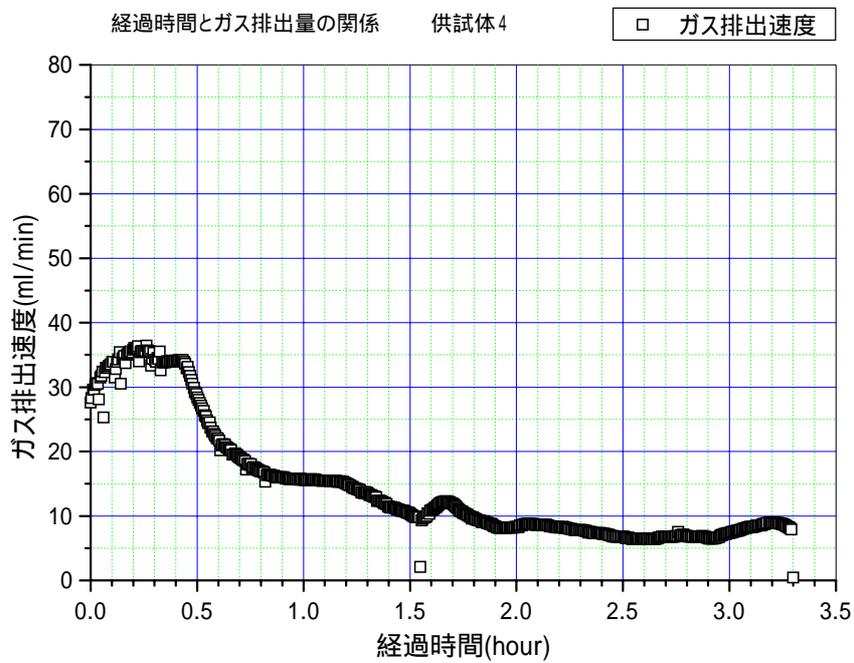


図 2-10 乾燥試料に対するガス排出速度の変化 (供試体 4)

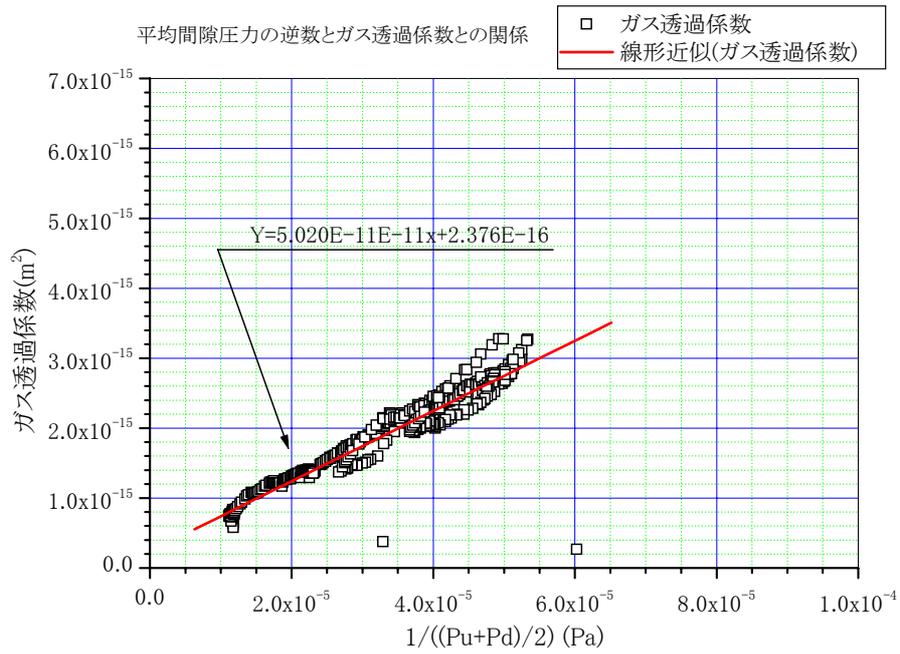


図 2-11 Klinkenberg 透過係数の評価 (供試体 4)

試験開始前の供試体 4 の写真を図 2-12に示した。



図 2-12 試験後の供試体 (供試体 4)

本研究においてガス透過試験に用いられた各供試体の諸元 ,及び得られた特性値を ,
表 2-6にまとめて示した。

表 2-6 各供試体の基本物性及び透過特性

材 料	軽石凝灰岩		備 考
	供試体 3	供試体 4	
供試体No.			
厚さ (cm)	5.017	5.130	
直径 (cm)	7.620	7.617	
乾燥密度 (g/cm ³)	1.42	1.45	
間隙率 (-)	0.357		
絶対透過係数 (m ²) 飽和試料 / 水	8.45E-19	8.92E-19	透水係数
Klinkenberg透過係数 (m ²) 乾燥試料 / ガス	2.52E-16	2.34E-16	透気係数
終了時飽和度 (-)	0.67 ~ 0.77	0.69 ~ 0.80	排出水量より
	0.92	0.90	重量測定より
計測上の threshold値 (kPa)	365	<229	一定排出水量検出時
計測上の ブレイクスル値 (kPa)	1,739	718	一定ガス排出速度検出時

2.4 毛管圧力の測定評価

軽石凝灰岩試料に対して高速遠心法による排水試験を実施し , 連続媒体 2 相流モデルによる解析に必要となる毛管圧力と間隙水飽和度との関係性を評価した。また , これに加えてガス透過特性を推定の上で参考となる間隙径分布について , 水銀圧入法による測定を実施した。ここでは主に高速遠心法による毛管圧力測定について述べる。

2.4.1 試験方法

湿潤相の排水側の挙動における飽和度と毛管圧力との関係性を , 忠実に再現可能と考えられる遠心法により測定を行なった。

(1) 試験装置

7 kPa から 7,600 kPa までの排水圧力の負荷が可能な Beckman 社製 High Speed Ultracentrifuge を使用した。排出された液体はコアホルダ先端に装着されたメスシ

リング内に蓄積し、回転速度に同期するストロボにより排出量を読み取る。

(2) 試験条件

1.5 inch (約 53 mm) の供試体を 104 で乾燥後、ステンレス製飽和セル内に収納し 12 時間以上真空ポンプで減圧後、蒸留水を 13.8 MPa で注入し約 6 時間保持して飽和試料を得た。秤量後測定用コアホルダに収納しロータヘッドに装着して、室温、拘束圧力無負荷、置換ガスを空気として測定した。所定の加速度を 8 時間以上維持して排水量を測定し、排水速度が一定以下となった時点で平衡と見なし、段階的に回転数を上昇させた。測定終了後供試体を秤量し残留水量を評価した。

2.4.2 試験結果

軽石凝灰岩に対して高速遠心法を適用することにより得られた毛管圧力特性を図 2-13 に示した。また、高速遠心法及び水銀圧入法によって測定された特性値の比較を表 2-7 にまとめて示した。

表 2-7 測定方法による特性値の比較

試料	基本物性		測定方法
	間隙率 (-)	透過係数 (m ²)	
軽石凝灰岩	0.334	1.75 × 10 ⁻¹⁵	Swanson 透過係数 (水銀圧入法)
	0.380	3.45 × 10 ⁻¹⁶	Klinkenberg 透過係数 (遠心法)
試料	毛管圧力 (kPa)		測定方法
	threshold	飽和度 0.5	
軽石凝灰岩	50	4,000	水銀圧入法
	10 ~ 20	4,000	遠心法

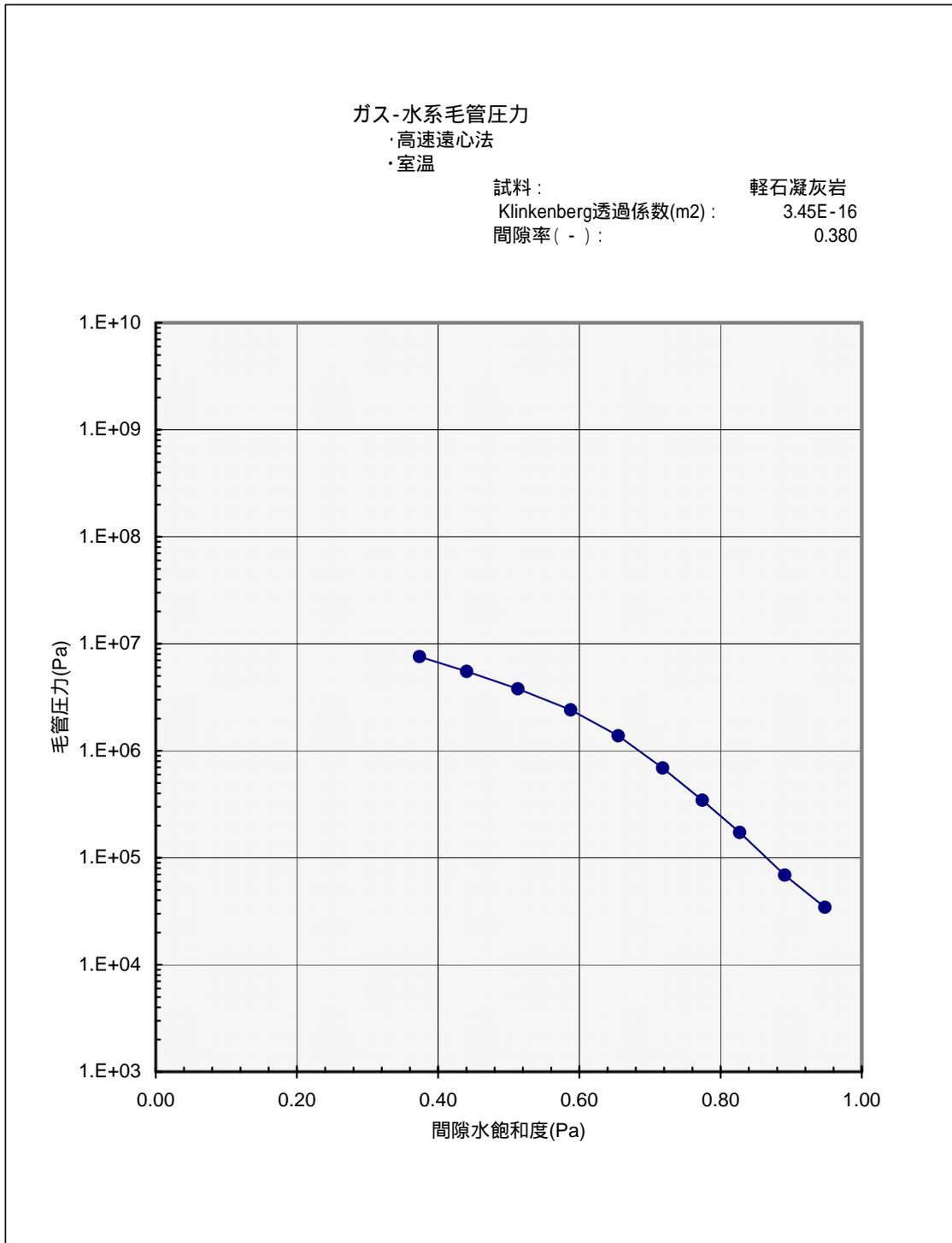


図 2-13 軽石凝灰岩の毛管圧力と飽和度との関係（遠心法）

2.5 結論

2.5.1 ガス透過試験

軽石凝灰岩試料について 2 供試体を測定対象として、試料を水により飽和させた後に 3 軸拘束・背圧載荷条件下において透水試験を行い、飽和試料の水による透過係数を評価した。また、水によって飽和した試料に対して、同様に 3 軸拘束・背圧載荷条件下においてガス透過試験を実施し、水及びガスの排出挙動を測定、記録することにより、Threshold 圧（ガス侵入圧）、ブレイクスルー圧等の検出を行い、飽和から不飽和状態へ遷移する過程での水及びガスの透過係数の変化を評価した。さらに、乾燥試料に対するガス透過試験を実施することにより、乾燥試料に対するガスの透過係数、及び圧力による透過係数への影響を評価し、Kozeny-Carman 透過係数を算定した。

これらの試験、評価により、連続媒体 2 相流モデルによるガス移行解析への適用性評価に必要なデータを収集することができた。

また、ガス透過時の水の排出挙動は、ガス侵入以降ブレイクスルーまでの期間の水の排出量が比較的多く、また、ブレイクスルー検出時の間隙水飽和度の値も粘土物質等に比較して小さいこと、さらに、ブレイクスルー後のガスの透過係数の増加が飽和度の低下に従って漸進的に進むことが観測されている。このことより、軽石凝灰岩については多孔質媒体に特徴的現象が現れていると考えられ、したがって移行挙動の評価には連続媒体 2 相流モデルの適用性が高いと予測できた。

2.5.2 毛管圧力の測定評価

軽石凝灰岩に対して、高速遠心法を適用することにより排水過程での毛管圧力と間隙水飽和度の関係を評価した。

また、水銀圧入法により間隙径分布を評価し、毛管圧データの裏付けを得るとともに、移行特性を推定する上での基礎データを得た。

これらのデータより、粘土物質に特徴的に見られるようなブレイクスルー後の急激なガスフラックスの増加と一定値への漸近を示す挙動とは異なり、threshold 値が相対的に小さく間隙水飽和近傍での毛管圧力も小さい値であることから、多孔性物質に特徴的な比較的低い圧力でガスが侵入し間隙水の排出量も多くなる移行特性が把握された。これより、軽石凝灰岩は連続媒体 2 相流モデルの適用性が高い特性を有すると考えられた。

2.5.3 今後の課題

本研究により得られたガス透過試験結果に対して連続媒体に対する2相流モデルを適用したシミュレーションを行い、当該モデルの適用性の確認を行うとともに、2相流パラメータを設定することによりガス移行特性データの整備、充実を行う必要がある。

また、今回選定した軽石凝灰岩は地層処分場サイトの母岩としては比較的透過性が高く、空隙率も大きいものであることから、さらに他産地の凝灰岩に対してもガス透過試験を行い、凝灰岩に対する移行特性データの信頼性向上を図るばかりでなく、凝灰岩以外の岩種に対しても、堆積岩系岩盤に止まらず結晶質岩系岩盤も含めて広くガス透過試験を行い、各岩種に対する移行特性データの取得と連続媒体中2相流モデルの適用性の評価、及び亀裂性岩盤に対する移行モデルの開発と適用性評価を行うとともに、これらに用いる評価データの整備を行う必要がある。