

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

(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
(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
(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	試験条件の検討	2
2.1.2	試験装置	6
2.1.3	試験操作	11
2.1.4	特性評価手法	18
2.1.5	試験結果	20
2.2	毛管圧力の測定評価	58
2.2.1	試験方法	58
2.2.2	試験結果	64
2.3	結論	72
2.3.1	ガス透過試験	72
2.3.2	毛管圧力の測定評価	72
2.3.3	今後の課題	73
3	おわりに	74
	参考文献	75

目 次

図 2-1	処分場でバリア材に作用する力の概念	4
図 2-2	装置フローシート	8
図 2-3	ガス透過試験装置全景	9
図 2-4	制御 / 記録用 PC 及びポンプコントローラ	9
図 2-5	弁操作 / 圧力表示盤	10
図 2-6	試験容器 / アキュムレータ	10
図 2-7	シリンジポンプ	11
図 2-8	予測される圧力, 累積排水量, 排出ガスの時間変化	13
図 2-9	試験手順	16
図 2-10	試験時の圧力载荷概念	17
図 2-11	飽和前期過程における注入圧力の経時変化(供試体 3)	21
図 2-12	飽和前期過程における注入ポンプ吐出量の経時変化(供試体 3)	21
図 2-13	飽和過程後期における注入圧力の経時変化(供試体 3)	23
図 2-14	飽和過程後期における累積排水量の経時変化(供試体 3)	23
図 2-15	飽和試料の透過係数の評価(供試体 3)	24
図 2-16	ガス押し過程における注入圧力の系時変化(供試体 3)	27
図 2-17	ガス押し過程におけるガス排出速度の系時変化(供試体 3)	27
図 2-18	ガス押し過程における累積排水量の系時変化(供試体 3)	28
図 2-19	ガス透過時における水の透過係数の変化(供試体 3)	31
図 2-20	ガス透過時におけるガスの透過係数の変化(供試体 3)	31
図 2-21	乾燥試料に対するガス注入圧力の変化(供試体 3)	34
図 2-22	乾燥試料に対するガス排出速度の変化(供試体 3)	34
図 2-23	乾燥試料に対するガスの透過係数の変化(供試体 3)	35
図 2-24	Klinkenberg 透過係数の評価(供試体 3)	35
図 2-25	試験後の供試体(供試体 3)	37
図 2-26	飽和前期過程における注入圧力の経時変化(供試体 4)	39
図 2-27	飽和前期過程における注入ポンプ吐出量の経時変化(供試体 4)	39

JNC TJ8400 2003-060

図 2-28	飽和過程後期における注入圧力の経時変化(供試体 4)	41
図 2-29	飽和過程後期における累積排水量の経時変化(供試体 4)	41
図 2-30	飽和試料の透過係数の評価(供試体 4)	42
図 2-31	ガス押し過程における注入圧力の系時変化(供試体 4)	45
図 2-32	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)	45
図 2-33	ガス押し過程における累積排水量の系時変化(供試体 4)	46
図 2-34	ガス透過時における水の透過係数の変化 (供試体 4)	49
図 2-35	ガス透過時におけるガスの透過係数の変化 (供試体 4)	49
図 2-36	乾燥試料に対するガス注入圧力の変化 (供試体 4)	52
図 2-37	乾燥試料に対するガス排出速度の変化(供試体 4)	52
図 2-38	乾燥試料に対するガスの透過係数の変化 (供試体 4)	53
図 2-39	Klinkenberg 透過係数の評価 (供試体 4)	53
図 2-40	試験後の供試体 (供試体 4)	55
図 2-41	遠心分離法による毛管圧力測定装置概念	61
図 2-42	軽石凝灰岩の間隙径分布	66
図 2-43	軽石凝灰岩の毛管圧力と飽和度との関係 (水銀圧入法)	67
図 2-44	軽石凝灰岩の毛管圧力と飽和度との関係 (遠心法)	70

表 目 次

表 2-1	セメント系供試体材料の物理的強度	3
表 2-2	試験ケース	6
表 2-3	粘土系材料における注入圧力上昇速度	15
表 2-4	間隙率，乾燥密度の算定方法	17
表 2-5	各方法の比較	18
表 2-6	飽和試料の透過係数の算定(供試体 3)	25
表 2-7	排出水量より求めた試験終了後の間隙水飽和度(供試体 3)	29
表 2-8	重量測定より求めた試験終了後の間隙水飽和度(供試体 3)	30
表 2-9	N ₂ ガスの平均自由行程	33
表 2-10	軽石凝灰岩供試体 3 の試験結果	36
表 2-11	飽和試料の透過係数の算定(供試体 4)	43
表 2-12	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)	47
表 2-13	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)	48
表 2-14	軽石凝灰岩供試体 4 の試験結果	54
表 2-15	各供試体の基本物性及び透過特性	57
表 2-16	水銀圧入法における使用パラメータ	60
表 2-17	測定方法による特性値の比較	71

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¹⁾、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。また、TRU 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 TRU 廃棄物分科会が、平成 3 年 7 月に「TRU 核種を含む放射性廃棄物の処分について」³⁾をとりまとめ、TRU 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「TRU 廃棄物処分概念検討書」⁴⁾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 TRU 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

地質媒体として考慮されている岩盤には、明らかに適性の劣ると考えられる第四紀の未固結岩（砂礫層など）を除き、多様な岩盤が候補として考えられる。これらは軟岩系岩盤（堆積岩系岩盤）と硬岩系岩盤（結晶質岩系岩盤）に大別することができる。上述のように、本年度はこのうち軟岩系岩盤の中から我が国において広く分布する岩種の一つである凝灰岩を選択し、2 供試体に対して測定を行うものとした。

2.1.1 試験条件の検討

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。

(1) 試料調整パラメータ

試料調整に係る条件は以下の通りである。

材料

：凝灰岩（標本グレード）

標本名：軽石凝灰岩（日本地科学社 栃木県大谷産 平成 13 年 8 月切出し）

岩石標本として広く用いられている，新第三紀の栃木県大谷産の軽石凝灰岩に
対してガス透過試験を行なった。

供試体形状寸法

：円柱形：76.2 mm（3 inch） × 50 mmH を標準とした。

流体透過方向

供試体は円柱軸を層理面に対して直角方向となるようプラグコア整形を行った。

したがって，流体の透過方向は層理面に対して直角方向となる。

製作個数

試料表面状態，及び 3 軸拘束による破壊の可能性等を考慮し 7 体製作した。

なお，同一切出し時の試料により測定された一軸圧縮強度の測定結果を以下に示す。

表 2-1 セメント系供試体材料の物理的強度

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) 試験条件パラメータ

以下に 3 軸拘束型ガス透過試験装置による供試体調整方法，及びガス注入 / 排出流
体測定条件を記述する。

(a) 飽和手順

ここでは測定供試体をガス注入時初期飽和とする方法，及びその達成を確認する方
法について検討，設定した。入手した凝灰岩ブロックは，切出し後約 14 ヶ月の間屋
内に保存されていたものであり，風乾状態にあったと考えられる。したがって，試験
容器内設置時の供試体飽和度は数十％程度の乾燥状態であると予測されることから，
ベントナイト / 珪砂混合試料⁵⁾及びセメント系材料⁶⁾に対するガス透過試験と同様に，
供試体上流側及び下流側から同時に水を圧入する（飽和過程前期）工程，及び上流側
のみから一定圧力勾配で水を圧入，透過させる（飽和過程後期）工程の 2 段階からな

る操作を踏襲することとした。なお、注水前の真空ポンプによる減圧期間は 12 時間とした。

また、飽和の確認は、飽和過程後期に水の注入速度と排出速度がほぼ等しくなった時点で飽和が達成されたものとした。

(b) 応力条件

TRU 廃棄物処分概念検討書⁴⁾、及び高レベル放射性廃棄物に対する地層処分研究開発第 2 次取りまとめ²⁾では、地層処分場の対象岩盤として花崗岩等の硬岩系岩盤と、泥岩、凝灰岩等の軟岩系岩盤が想定されている。硬岩系、軟岩系の岩盤は基本物性、力学的特性に大きな差異があることから、処分場近傍岩盤に作用する岩盤圧力も大きく異なると予想される。

図 2-1 に硬岩系岩盤及び軟岩系岩盤内の処分空洞近傍及び空洞内部のバリア材に作用する力の概念を示した。軟岩系岩盤では、岩盤が変形することによって空洞が収縮し、内部に充填されたベントナイト系緩衝材は岩盤からの圧力が作用すると考えられる。これに対して、硬岩系岩盤中に処分場が建設される場合には、岩盤の変形による空洞の大きな収縮が生じる可能性はほとんどなく、内部に充填されたベントナイト系緩衝材等の人工バリアは岩盤からの圧力をほとんど受けないと考えられる。

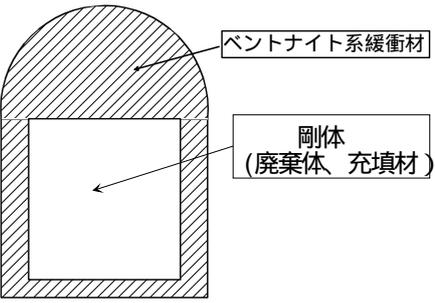
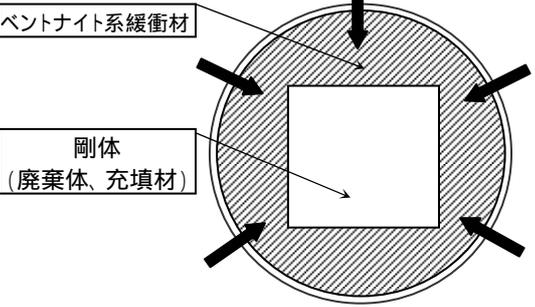
硬岩系岩盤条件 (本試験が対象)	軟岩系岩盤条件
 <p data-bbox="309 1664 699 1693">硬い岩盤のため変形が生じない場合</p>	 <p data-bbox="874 1664 1289 1693">軟らかい岩盤のため変形を生じる場合</p>
<p data-bbox="225 1697 778 1765">緩衝材は、岩盤圧力(土被り圧)を受けない。(この表記では膨潤圧の反力は除いた)</p>	<p data-bbox="807 1697 1358 1765">緩衝材は、岩盤圧力(土被り圧)を受ける。</p>

図 2-1 処分場でバリア材に作用する力の概念

ここで供試体に作用する応力を決定する背圧、拘束圧について、TRU 廃棄物処分概念検討書において考慮された軟岩系岩盤での処分環境条件を模擬することの合理性について検討した。軟岩系岩盤内の処分場条件を模擬する場合、原則として以下の圧力を負荷する必要がある。

- ・背圧：地下 500 m での地下水圧相当の 5 MPa で一定とする。
- ・拘束圧：軟岩系岩盤（真密度：2,700 kg/m³，間隙率：0.2）の深度 500 m における上載荷重相当の地圧が作用するものと仮定すれば，11.8 MPa を載荷することが必要となる。

背圧については処分深度における地下水圧であり，特に大きな被圧地下水層を考慮しない限り深度相当の水頭圧を考慮することでよいと考えられる。

一方，今回測定対象とした軽石凝灰岩試料の平均一軸圧縮強度は，表 2-1 に示されているように 6.5 MPa である。これは上記の背圧，拘束圧を載荷した条件下における有効応力 6.8 MPa を下回る値である。なお，第 2 次とりまとめにおいて代表的特性のひとつとして記載されている軟岩（飽和密度 = 2.23E+03 kg/m³：新第三紀体積岩(泥質/凝灰岩)平均値）の場合，深度 500 m における上載荷重相当の地圧は約 11 MPa となる。ガス透過試験は三軸拘束で行うため破壊の生じる圧力はより高いことが考えられるが，本試料は目視によっても鉱物組成，粒子分布の不均一性が観察されることから，特に端面部付近を発端とした応力の集中によって破壊が生じることが懸念された。また，本試料のような固結した岩盤では，粘土系材料とは異なり圧縮応力下においてもごく短期間での変形による間隙構造の変化は生じることはないと考えられた。したがって，本試験においては拘束圧について，岩盤コア試料の透気特性測定に対する試験装置メーカーの推奨値である（ガス注入圧力 < 3.5 MPa）の関係に従って設定するものとした。

(c) ガス注入条件

これまでの試験における注入圧力昇圧条件の例，及び試料のブレイクスルー圧に対する予測値を参考として，2.1.3(2) 試験手順に示すようにガス注入圧力の昇圧速度を設定した。

表 2-2 に本年度実施するガス透過試験ケースを示す。

表 2-2 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	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 注入圧力 + 3.5MPaの 拘束圧	厚さ 50mm 直径 76mm	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/ 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				

2.1.2 試験装置

(1) 装置構成

主たる試験装置構成を以下に示す。

試験容器

円柱形状供試体 (76.2 mm × 50 mm 厚) に対してガス/水の注入圧力, 及び背圧を最大 35,000 kPa まで, 側面及び端面から拘束圧を最大 35,000 kPa まで載荷可能なステンレス鋼製容器である。軸方向拘束圧はエンドプレートにより直接供試体の端面に, また周方向拘束圧は Viton 製スリーブを介して供試体側面に伝達される。

流体供給系/拘束圧系/背圧系

ISCO 社製シリンジポンプを用いて, 供試体へのガス及び水の定流量, 及び定圧送り出しが可能なシステムである。試験容器上流側には 2 基のアクキュムレータ (ガス系, ガス, 水兼用 (容量: 各 1L)), 及び加湿器が設置されている。流体注入ポンプについては, $6 \times 10^{-2} \text{ dm}^3/\text{s} \sim 6 \times 10^8 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($10^{-3} \text{ ml}/\text{min} \sim 10^7 \text{ ml}/\text{min}$) の流量範囲, 及び $0 \sim 35,000 \text{ kPa}$ の圧力範囲で注入が可能である。拘束圧ポンプについては $6 \times 10^{-2} \text{ dm}^3/\text{s} \sim 3.6 \times 10^3 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($10^{-3} \text{ ml}/\text{min} \sim 60 \text{ ml}/\text{min}$) の流量範囲, $0 \sim 35,000 \text{ kPa}$ の圧力範囲での運転が可能である。

また, 背圧については背圧ポンプにより, 上記拘束圧ポンプと同一流量/圧力範囲

で背圧レギュレータを介して供試体下流の流体に対して載荷可能である。

排水・排出ガス捕集測定系

累積排水量の測定には Lucite セパレータ内に捕集された水を、電子天秤（精度 0.001 g）型積算排水量計により測定する。また、排出ガスの流速測定には、熱線コイルを用いた低流速（ $0 \sim 6 \times 10^2 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($0 \sim 10 \text{ ml/min}$)), 中流速（ $6 \times 10^2 \text{ dm}^3/\text{s} \sim 6 \times 10^4 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($10 \sim 100 \text{ ml/min}$)) あるいは高流速（ $6 \times 10^2 \text{ dm}^4/\text{s} \sim 6 \times 10^5 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($100 \sim 1,000 \text{ ml/min}$)) ガス流量計を使用して測定した。

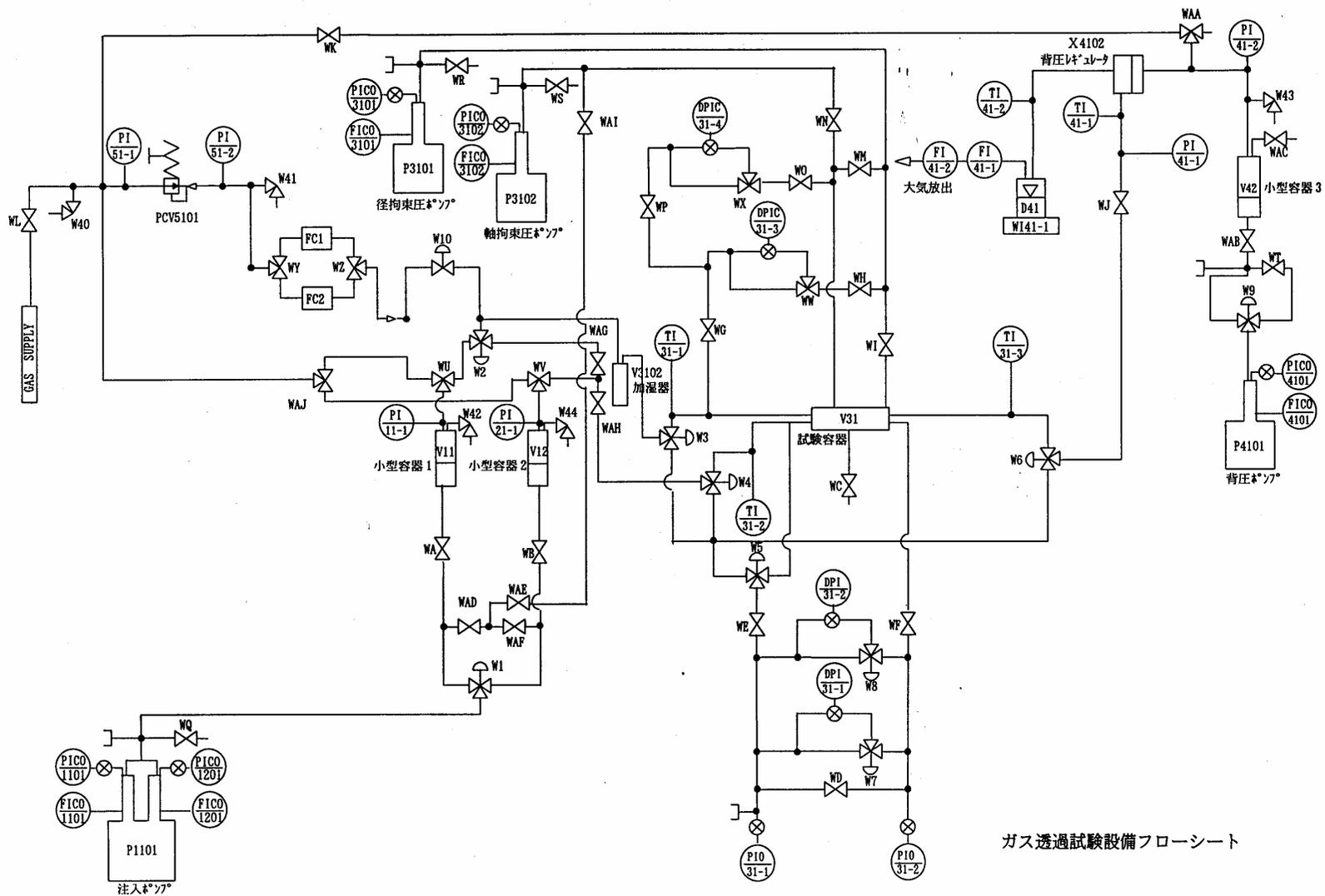
制御系

自動制御によるガス、水の注入圧力の設定、拘束圧の設定、排出速度、各部における圧力及び温度等の経時変化のデータ収集が可能である。計測データはモニタ画面にリアルタイムで表示され、得られたデータは自動的に記録及びバックアップされる。

注入圧力、及び拘束圧のステップ状の昇圧（ ~ 100 ステップ/回、 ~ 24 時間/ステップ）、threshold（ガスの供試体内への侵入）検出以降、及びブレイクスルー検出以降のデータサンプリング間隔の変更（秒単位で設定可能）、ブレイクスルー発生を検出した場合の圧力一定維持が自動的に可能である。

(2) 装置全体構成

図 2-2に装置のプロセスフローシートを、また図 2-3～図 2-7には試験装置の各部外観を示す。



ガス透過試験設備フローシート

図 2-2 装置フローシート



図 2-3 ガス透過試験装置全景

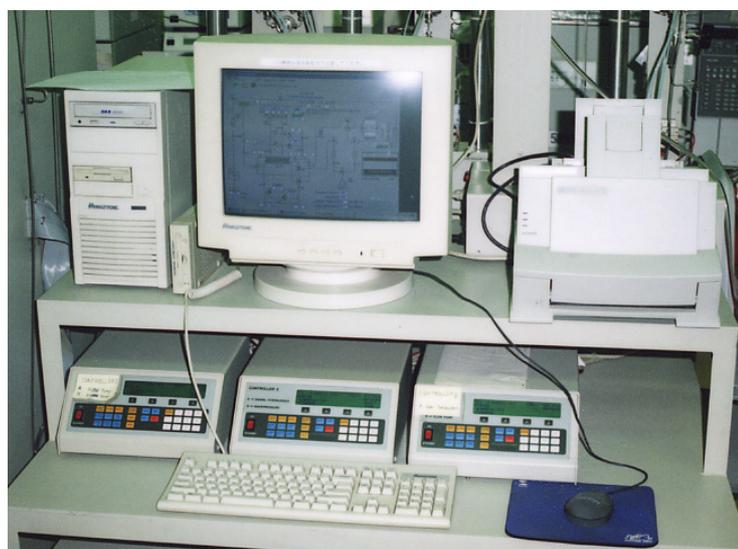


図 2-4 制御／記録用 PC 及びポンプコントローラ



図 2-5 弁操作／圧力表示盤



図 2-6 試験容器／アキュムレータ



図 2-7 シリンジポンプ

2.1.3 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プラグコア試料の中から、両端面及び側面に欠損、凹凸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、フェルルール、ラムチップ等の蓋閉め部に設置する部品を取り付け、容器を密封する。

以下に本試験で用いる用語の定義、及び試験の操作手順を記述した。

(1) 本試験における用語の定義

本試験において使用した主な用語の定義を以下に示す。

①threshold 圧

(初動圧、ガスエントリ圧 (ガス侵入圧) ともいう、以降は「threshold 圧」で統一して記載する。)

: ガスが飽和供試体に侵入する圧力である。なお、実際にガスが侵入する時点とその

時の注入ガス圧力、累積排出水量を厳密に把握することは困難である。したがって、ここでは便宜上供試体下流側からの排水量に着目し、10秒ごとのデータサンプリングによって供試体上流側管路内の残留水量に相当する0.32 ml以上の累積排出水量に達した時点でガスエントリが生じたものとし、その時点の供試体上流側圧力 P_u 及び下流側圧力 P_d の差圧 ($P_u - P_d$) をもって、「計測上の threshold 圧」と定義した。

ブレイクスルー圧

ガスが供試体に侵入した後、飽和供試体を透過して下流側に最初にガスが放出された時の圧力である。供試体の下流側にフィルタ、配管等の空隙（内容積約7.3ml）が存在することから、供試体のブレイクスルー発現時点より遅延して試験装置からのガスの排出が検出されるため、ガスが供試体から排出された時点を厳密に特定することは困難である。このため、計測上は排出ガス速度に着目し、10秒ごとのデータサンプリングによって連続3回続けて1.0 ml/min以上のガス流速が検出された時点を計測上ブレイクスルーが発生した時点とみなし、その時点での供試体上流側圧力 P_u と下流側圧力 P_d の差圧 ($P_u - P_d$) を便宜上「計測上のブレイクスルー圧」とした。

飽和

供試体中の間隙が水によって実質的に満たされた状態である。供試体の飽和度を試験前に直接評価することは困難であるため、本試験では以下の挙動を示した供試体は飽和に到達したものとみなした。

飽和過程は、試験容器内に供試体を設置し12時間以上真空ポンプで減圧した後、供試体両端面から5,000 kPaで加圧注水する過程（「飽和過程前期」と称する）。さらに、下流側端面は5,000 kPaの背圧とし、上流側端面から数千 kPa程度の動水勾配となるように加圧注水する過程（「飽和過程後期」と称する）からなる。この飽和過程後期で、下流側端面からの排水速度が注水速度と一致した時点で「飽和」とみなすこととした。

(2) 試験手順

凝灰岩試料のガス透過試験における各部圧力、排出水量、及び排出ガス予測されるフラックスの経時変化を、模式的に図2-8に示す。

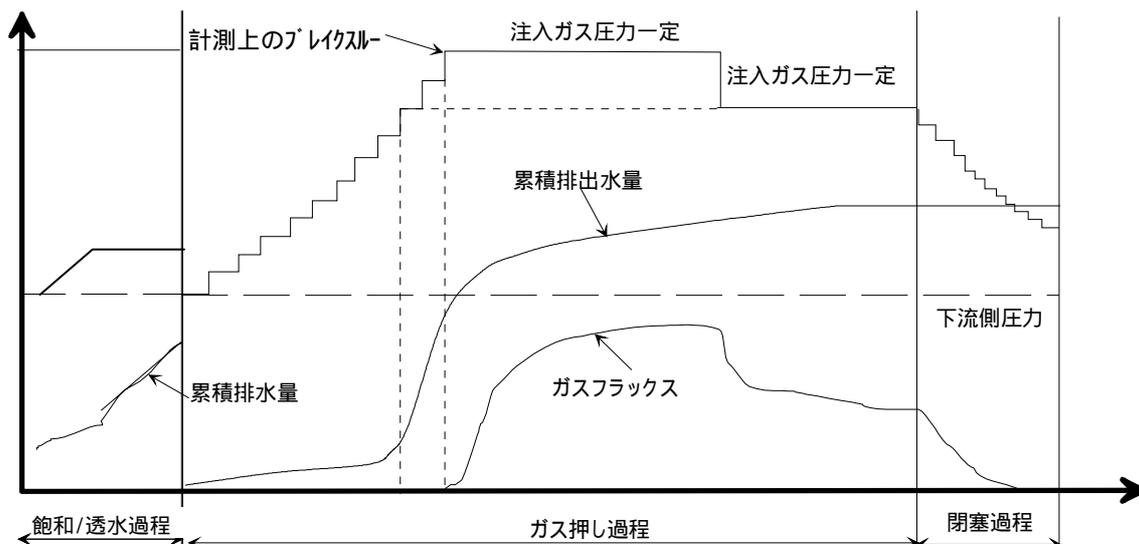


図 2-8 予測される圧力，累積排水量，排出ガスの時間変化

上記予測挙動に基づいて設定した試験手順を以下に記述する。

脱気純水により供試体を飽和させる。

(飽和過程)

供試体を試験容器内に挿入し，ガス透過試験装置に接続する。

アキュムレータ（小型容器 2）に脱気処理した純水を充填し，試験容器内及び周辺配管内を真空ポンプを用いて 12 時間以上脱気減圧する。その後供試体の両端から脱気純水を注入する。このとき昇圧速度は 100 kPa/hr 程度とし，約 50 時間で約 5,000k Pa まで昇圧した後，水の注入がほぼ停止するまで圧力を一定に保持する。

(飽和過程前期)

水の注入がほぼ停止した後，下流側圧力（背圧）を 5,000 kPa に維持したまま上流側圧力を上昇させて脱気純水を供試体に加圧通水させる。下流側圧力（背圧）は 5,000 kPa で一定として，軽石凝灰岩試料の透過係数が 10^{-18} m^2 程度であることから，50 kPa/hr 程度で 6,000k Pa 程度まで昇圧して，排水速度が一定となり水の注入速度と排水速度がほぼ一定になるまで通水する。

(飽和過程後期)

なお、この過程においては供試体の透過係数に従って測定可能な適切な排水量を得るために、適宜注入圧力を設定する。

飽和供試体の水透過係数を測定する。

飽和過程後期の最終段階で、上記の条件を満たして供試体が飽和に達したとみなされたら、注入圧力を 6,000 kPa 程度以上、背圧を 5,000 kPa に保ち、排出水量の経時変化を測定して水による透過係数の算定を行う。

注入する流体を脱気純水から N₂ ガスに切り替え、ガス及び水の排出量、排出速度を測定することにより、threshold 圧、ブレイクスルー圧を検出する。

(ガス押し過程)

飽和過程終了後、注入圧力を再び 5,000 kPa まで低下させてから、アキュムレータ(小型容器 1)に N₂ ガスを充填し、ガスの注入を開始する。セメント系材料の透過係数とブレイクスルー圧との関係等から、軽石凝灰岩のブレイクスルー圧は 1 MPa 程度にあると予測されたことから、注入圧力の昇圧パターンを 50 kPa/hr 程度としてブレイクスルーが検出されるまで注入圧力を上昇させる。

なお、参考とした粘土系材料及びセメント系材料に対する既往のガス透過試験において適用された昇圧速度の例を表 2-3 に示した。

threshold、及び特にブレイクスルーの検出後は流体の移行が急速となるため、データ記録のインターバルを 10 分から 2 分、数十秒と段階的に短縮して、ガス押し過程の間ガス及び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は、ガス注入圧力をブレイクスルー時の圧力で一定に保持し、ガス排出速度がほぼ一定になるまでガス、及び水の排出量の経時変化を測定、記録する。

(フラックス一定過程)

ガス注入圧力を背圧(5,000 kPa)まで低下させ、ガスの透過を終了した後、さらに拘束圧力及び試験容器内を減圧して供試体を取り出す。取り出した供試体は速やかに試験後の重量を測定し、飽和度の算定に資する。

供試体を乾燥機内で 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することにより、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。

乾燥、重量測定後の供試体をデシケータ内で室温まで冷却した後、試験容器内に挿

入，設置する。背圧を大気圧として，ガス注入圧力を背圧と同一圧力から昇圧し，数十～300 kPa までの範囲で段階的にガスの排出速度を測定することにより，乾燥供試体のガスによる透過係数，及び圧縮性流体の透過係数への圧力による影響を排除した Klinkenberg 透過係数を算定する。

表 2-3 粘土系材料における注入圧力上昇速度

報告例	試料	試験条件	平均上昇速度
Horseman ら ⁷⁾	MX-80/Boom Clay	静水圧/軸方向流	23(kPa/Hr)
Horseman ら ⁸⁾	MX-80	定容積/半径方向流	150(kPa/Hr)
Horseman ら ⁸⁾	MX-80	定応力/軸方向流	20(kPa/Hr)
JNC-2000 ⁵⁾	クゲル V1 70/30	定容積/軸方向流	25(kPa/Hr)
JNC-2001 ⁶⁾	JIS 珪砂，セメントペースト	定応力/軸方向流	25～50(kPa/Hr)

図 2-9，及び図 2-10には，それぞれ試験手順フロー図，及び試験の際の各部圧力载荷概念を示した。

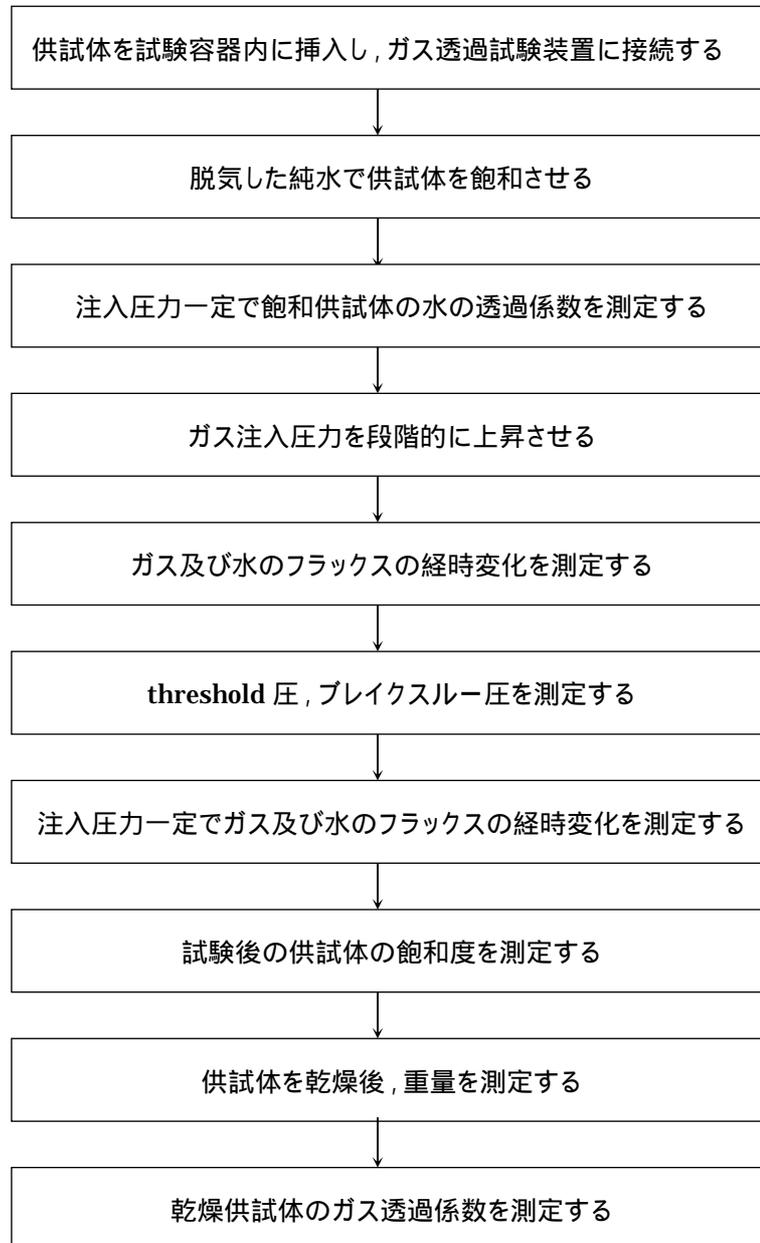


図 2-9 試験手順

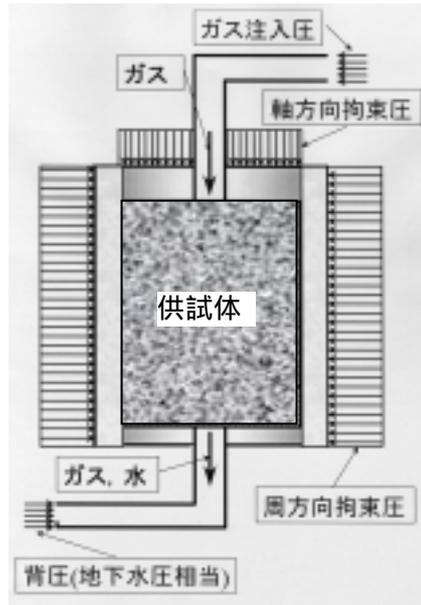


図 2-10 試験時の圧力载荷概念

(3) 間隙率: e , 乾燥密度: d の測定方法

供試体寸法 (直径 ϕ , 軸方向長さ L), 体積 V , 間隙率 e , 及び乾燥密度 d は, それぞれ表 2-4 に示す方法により求める。

表 2-4 間隙率, 乾燥密度の算定方法

測定項目		測定方法
寸法	ϕ, L	ノギスを用いて供試体の直径, 及び軸方向長さを, 各 3 箇所測定し平均する
体積	V	測定された寸法より円柱体として体積を算定する
湿潤密度	w	(湿潤時の供試体重量 / V) として算定する
乾燥密度	d	(乾燥供試体重量 / V) として算定する
間隙率		He 圧入法, 水銀圧入法により評価

2.1.4 特性評価手法

ここでは本研究で実施した以下の特性，状態量の評価方法について述べる。

間隙水飽和度は，前述の測定方法により得られた試験前後の供試体の寸法，重量，乾燥密度，間隙率より評価する。また，飽和後供試体の通水により得られた排出水流速より水の透過係数を算出する。さらに，飽和後供試体のガス押し過程における水，及びガスに対する実効（見かけの）透過係数，及び乾燥供試体に対するガスの透過係数については，間隙水の累積排出量，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評価する。

(1) 飽和度

ガス押し過程開始時に供試体が完全に飽和していると仮定して，ガス押し過程終了時における供試体の間隙水飽和度 $S(-)$ を以下の方法により算定した。

(a) 累積排出水量の経時変化から求める方法

$$S = \frac{\text{供試体間隙体積} - (\text{試験終了時の累積排出量} - \text{配管内残留水量})}{\text{供試体間隙体積}} \quad \text{式 2-1}$$

(b) 試験終了後に測定した供試体の重量から求める方法

$$S = \frac{(\text{試験終了時の供試体重量} - \text{乾燥後供試体重量}) / \text{水の密度}}{\text{供試体間隙体積}} \quad \text{式 2-2}$$

表 2-5 に，上記(a)及び(b)に示した手法による間隙水飽和度算定方法の特徴について示す。

表 2-5 各方法の比較

評価方法	長 所	問題点
供試体重量から算定	・ 残留水を直接測定する	・ 供試体取出し時に試験容器内残留水の付着の可能性がある
累積排出水量から算定	・ 人的操作(供試体取出し)がない	・ 供試体初期飽和度に対する設定値の影響を受ける

ここでは，上記 2 種類の方法で飽和度を算出し比較した。

(2) 水の透過係数

水の透過係数については下式を用いて算出する。

$$k_w = \frac{\eta QL}{A(P_1 - P_2)} \quad \text{式 2-3}$$

ここで，

k_w ：水の透過係数　：　（ m^2 ）

　：水の粘性係数　：　 1.002×10^{-3} （ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ at 1atm）

A：供試体の断面積　：　（ m^2 ）　　L：供試体の長さ　：　（ m ）

Q：排出水速度　　：　（ m^3/s ）　　P₁：上流側圧力　　：　（Pa）

P₂：下流側圧力　　：　（Pa）

ここで排出水速度は，飽和過程後期（片面押し）において飽和が達成されたとみなされた後の累積排出水量の経時変化データを基に，最小二乗法によって求めることとした。

(3) ガスの透過係数

ガスの透過係数の算定については下式を用いるものとする。

$$k_g = \frac{2\eta QLP_N}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad \text{式 2-4}$$

ここで，

k_g ：ガスの透過係数　：　（ m^2 ）

　：N₂の粘性係数　：　 17.6×10^{-6} （ $\text{Pa} \cdot \text{s}$: at 1atm）

A：供試体の断面積　：　（ m^2 ）　　L：供試体の長さ　：　（ m ）

Q：排出ガス速度　　：　（ m^3/s ）　　P₁：上流側圧力　　：　（Pa）

P₂：下流側圧力　　：　（Pa）　　P_N：大気圧　　：　 1.01×10^5 （Pa）

2.1.5 試験結果

以下にガス透過試験において得られた結果を示す。なお、ここでは試験を行った供試体のうち、ガスの透過挙動の測定にまで至った供試体 2 体に対してのみ試験結果を記載するものとし、供試体の擾乱、機器の不調等によりガス注入あるいはブレイクスルーに至らなかった供試体については、飽和過程に対する試験結果の記述についても省略するものとした。

(1) 軽石凝灰岩供試体 3

(a) 飽和過程前期

図 2-11 ~ 図 2-12 に飽和過程前期（供試体両端から加圧注水）における注入圧力の経時変化、及び注入ポンプ吐出水量の経時変化を示す。

真空ポンプで試験容器及び周辺配管内を 12 時間以上減圧脱気させた後、供試体上下流側両端から脱気した純水を注入した。注入圧力を 75 kPa/hr でステップ状に昇圧させ約 5,000 kPa まで昇圧した後、注入圧力を 5,000 kPa 付近で約 90 時間維持して注水を継続した。試験操作開始後のポンプの吐出量は 122.1 ml であるが、供試体中に注入された量はアキュムレータの昇圧と、管路内に急速に注入された容量との合計の約 63 ml を除いた、約 59 ml であると考えられた。

試験開始後ほぼ 100 時間付近から水の注入はほとんど停止している。

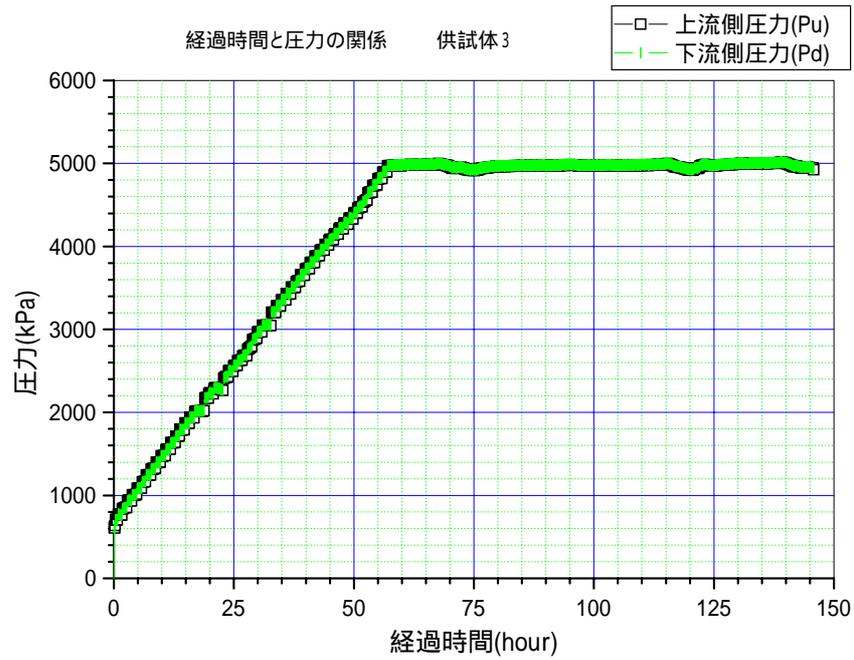


図 2-11 飽和前期過程における注入圧力の経時変化(供試体 3)

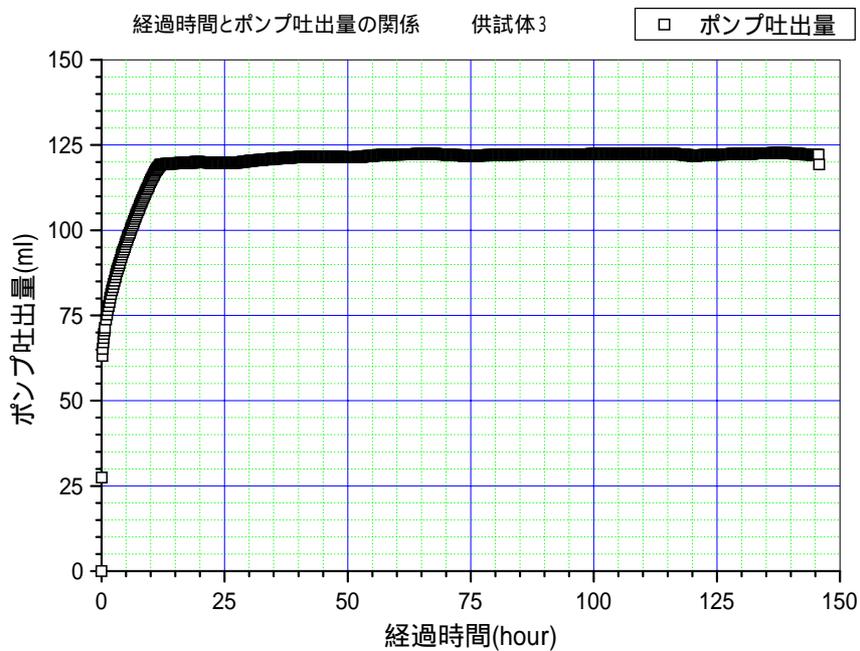


図 2-12 飽和前期過程における注入ポンプ吐出量の経時変化(供試体 3)

(b) 飽和過程後期

図 2-13 ~ 図 2-14 に飽和過程後期（供試体上流側から注水し、排出水量を測定）における注入圧力の経時変化、及び累積排出水量と累積注入水量の経時変化を示した。

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、当該試料の透過係数が大きい場合には 10^{-15}m^2 の桁にあることも予想されたことから初期に 5 kPa/hr のきわめて緩慢な速度でステップ状に昇圧させた。200 kPa 昇圧した時点の排水速度が透水性評価上極めて少ないことが確認されたため、その後は 75 kPa/hr でステップ昇圧させ、6,150 kPa まで昇圧して約 104 時間保持した。

圧力の経時変化については、注水開始直後に背圧が 1,500 kPa ほど低下しているが、これは初期の圧力勾配が極めて小さい状態で、供試体下流側の背圧レギュレータ内のダイヤフラムスピンドルの摩擦抵抗によって、ダイヤフラム開閉の追従特性が低下することによって生じたものと考えられ、圧力勾配が増加して供試体を透過する水量が有意な量に達することで回復している。この変動は供試体の飽和達成や透水性の評価結果に影響を及ぼすものではない。

昇圧開始後の供試体からの排出水量は 34.6 ml であったが、飽和過程後期に供試体内に注入された水は注入ポンプの吐出量が 40.0 ml であることから、この過程で供試体内に注入された水量は約 5.4 ml であると考えられる。以上より、飽和過程前後期を通して供試体内に注入された水量は合計約 64 ml となる。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 100 時間以降ではほぼ一定であり、注入速度と排水速度がほぼ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。

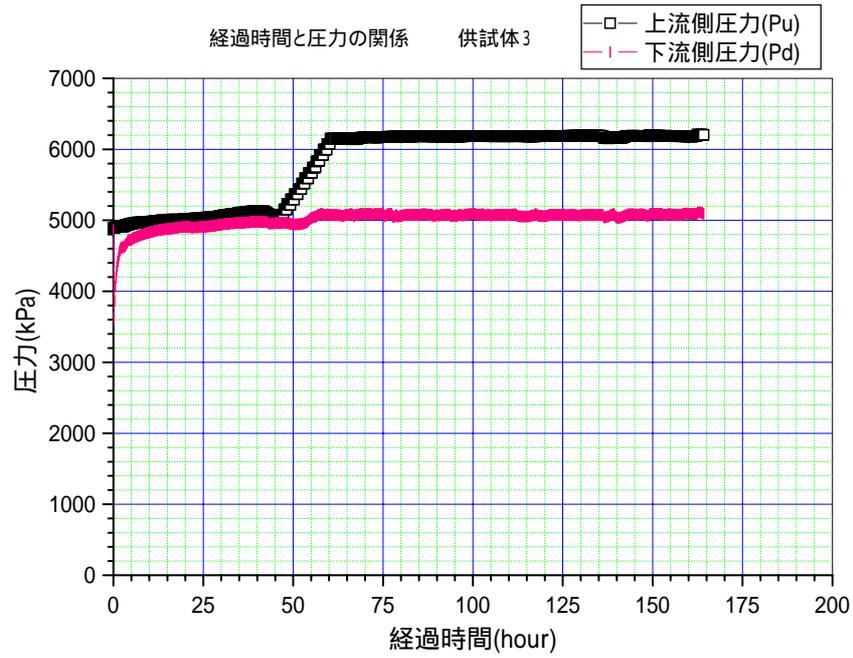


図 2-13 飽和過程後期における注入圧力の経時変化(供試体 3)

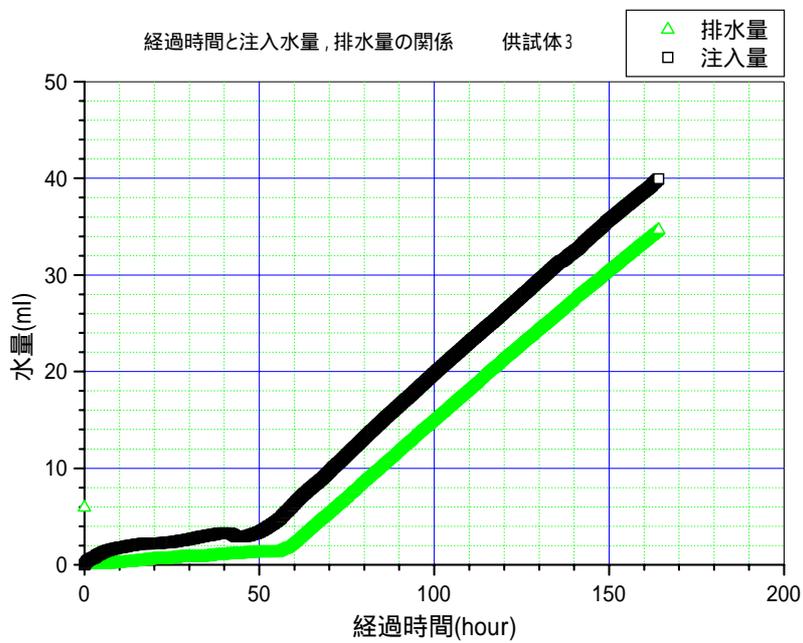


図 2-14 飽和過程後期における累積排水量の経時変化(供試体 3)

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 2-15 に、透過係数の算定結果を表 2-6 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でき、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、 $8.45 \times 10^{-19} \text{m}^2$ であった。

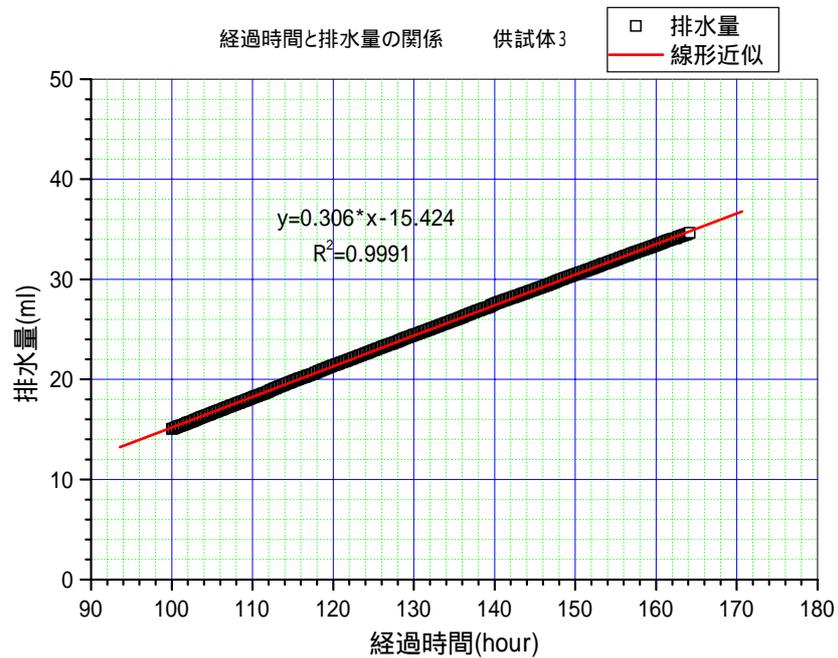


図 2-15 飽和試料の透過係数の評価(供試体 3)

表 2-6 飽和試料の透過係数の算定(供試体 3)

	水の粘性係数	Pa·s	1.002E-03
d	試料の直径	m	7.620E-02
L	試料の長さ	m	5.017E-02
Q	排出水速度	m ³ /s	8.500E-11
P2	下流側圧力	Pa	1.109E+06
Kw	水の透過係数	m ²	8.448E-19

Qの算出

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

(c) ガス押し過程

図 2-16 ~ 図 2-18 に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 5,000 kPa から 50 kPa/hr 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。

ガス押し過程開始後約 10 時間後に累積排出推量が供試体上流側配管内残留水量の 0.32 ml を超えたことから，供試体にガスが侵入した threshold 圧は，350 ~ 370 kPa 付近で検出された。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）に比較して相当程度高い値となっているが，これは背圧レギュレータを通過した排出水が気液分離ポッド内に滴下するまでの時間遅れによるものと考えられる。

排出水量は供試体へのガスの侵入開始後徐々に増加し，ガス押し過程開始後約 37 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，14.5 ml に達している。これは粘土系材料（ベントナイト / 珪砂：70/30）の 1 ~ 4 ml⁵⁾，JIS モルタルの 3 ml⁶⁾ 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 ml⁶⁾ をも上回る値である。これは後述する毛管圧の測定試験で得られた，平均間隙率が 0.357 と大きく，間隙径分布データにおいて 1 ~ 2 μm に区分間隙率分布のピークが存在し，Macro 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、軽石凝灰岩が相対的に低いガス注入圧力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 37 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、注入圧力を約 6,800 kPa で約 37 時間保持した。この間ガス排出速度はベントナイト系材料、セメント系材料に比較して緩やかに上昇を続け、50 時間以降からガスフローメータの測定限界を超えるフラックスが観察され始めた。このため、ガス押し開始後約 69 時間後の時点で段階的にガス注入圧力を減少させ、最終的に約 5,600 kPa としてさらに 65 時間維持した。注入圧力の減圧後、ガス排出速度は 1/3 以下に減少してほぼ一定で推移した。測定限界を超える測定点が平均フラックスの評価値に及ぼす影響については、図 2-17 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が、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。このことから、排出ガス速度の平均値に対する測定限界を超える測定点の影響は、無視しうるものであることが明らかである。

試験装置からの累積排出水量はガス注入圧力を減圧した時点以降増加を示さず、試験終了時点で 26.5ml であった。しかしながら、試験終了後供試体下流側配管の減圧の過程で約 8 ml の水が排出され、合計で 34.7 ml となった。これは平均約 8 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。

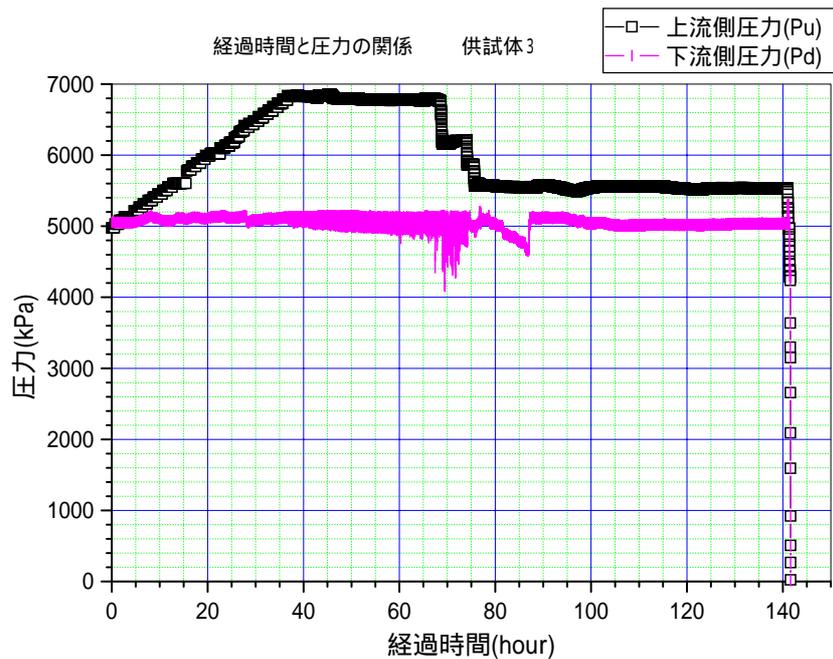


図 2-16 ガス押し過程における注入圧力の系時変化(供試体 3)

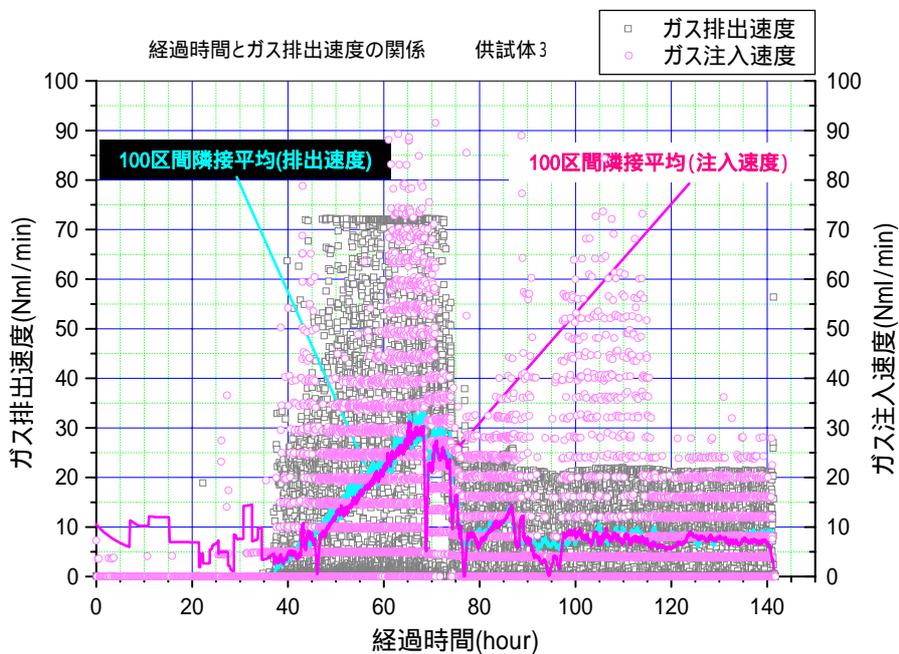


図 2-17 ガス押し過程におけるガス排出速度の系時変化(供試体 3)

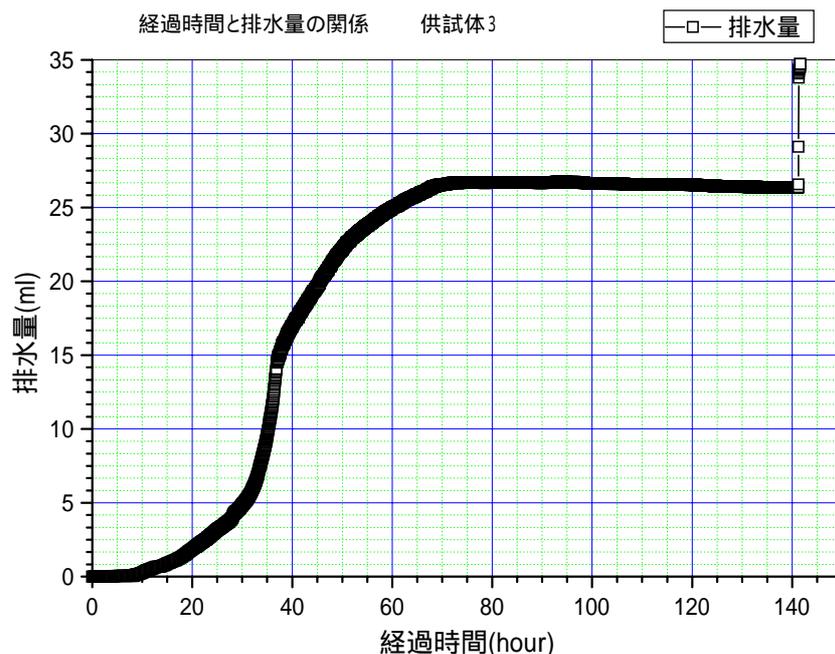


図 2-18 ガス押し過程における累積排水量の系時変化(供試体 3)

(7) 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、排水量から算定した試験後の供試体内の平均飽和度を表 2-7に示した。また、飽和過程開始前、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 2-8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 0.77、減圧後の排水量を加えるた場合には 0.67 と算出されており、いずれも粘土系材料(ベントナイト/珪砂：70/30)の 0.8~0.9、JIS モルタルの 0.87~0.89、W/C = 0.85 のセメントペーストで得られた 0.82~0.83 と比較して大きい。これらはそれぞれのガス透過圧力条件、供試体の間隙構造及び構成鉱物による固液間の物理・化学的相互作用によって決定されるものであり、直接の比較はできないが、軽石凝灰岩に対して水銀圧入法で得られた間隙径分布特性で間隙径 0.5 μm 以上の間隙容積が 23 % を占めることから (JIS モルタル：5 %、W/C = 0.85 のセメントペースト：0.5 %)、相対的により低い圧力でガスが侵入し水との置換が進行する特性を示すものと予測

できる。

また、後述する毛管圧力測定結果との対応では、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）は、ガス押し過程において載荷した最大の差圧である約 1,800 kPa に対応する間隙水飽和度が 0.63 を示しており、減圧後の排出水量を加えた場合の飽和度算定値に近い値となっているが、供試体内の圧力勾配を考慮した場合、供試体全体の平均飽和度の値はこれより大きくなることから、詳細には別途、X線 CT スキャを用いて含水量分布を測定する等によって確認する必要がある。

また、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、飽和工程開始前は 0.31 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。この場合、未飽和の間隙体積は 56.4 ml となり、飽和工程において供試体内に注入されたと考えられた水の体積 64 ml に近い値となっている。一方、ガス押し過程終了後の間隙水飽和度は 0.92 と大きい値を示している。この場合の供試体内の未飽和間隙体積は約 6.4 ml と過少となる。これについては、減圧時の計測用配管内からの水の移行、あるいは試験容器から供試体を取り出す際に周方向拘束ジャケット内の水との接触が生じたこと等によって水が供試体に含浸したことにより、間隙水飽和度が増加したものと考えられる。

表 2-7 排出水量より求めた試験終了後の間隙水飽和度（供試体 3）

(1)減圧前の排出量に基づく場合

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	228.79	0.357	81.68	19.12	0.77
下流側配管	7.30	1.00	7.30	7.30	0.00
合計	236.41			26.74	

(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	228.79	0.357	81.68	27.08	0.67
下流側配管	7.30	1.00	7.30	7.30	0.00
合計	236.41			34.70	

表 2-8 重量測定より求めた試験終了後の間隙水飽和度（供試体 3）

名称	重量(g)	飽和度()
試験前重量	350.38	0.31
試験後重量	400.10	0.92
乾燥後重量	324.89	0.00
ガス押し後残留水量	75.21	

(1) 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 2-19、図 2-20に示した。

水の透過係数の変化はセメント系材料と基本的に同様の挙動を示した。すなわち、ガス押し過程開始後約 10 時間後の threshold 圧（約 350～370 kPa）に達するまでは、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 $10^{-19} \sim 2 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ の範囲の値を間欠的に示す。約 10 時間後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見かけの透過係数は、ブレイクスルー直前のほぼ 30 時間後まで $8 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 前後の透過係数を示した。次に、ブレイクスルーによる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、放出後の急激な下降が、ガス押し過程開始約 37 時間後の計測上のブレイクスルー時点をピークとして約 10 時間にわたって観測され、見かけの透過係数は最大で $6 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 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 $3 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ に低下した。さらに、その後のガス注入圧力の減圧により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 37 時間後（注入圧力：約 6,800 kPa）以降、供試体内の間隙水飽和度の低下に従って増加し、ガス注入圧力の減圧直前の時点で $1.2 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ に達した。ガス押し過程開始約 69 時間後のガス注入圧力の減圧操作を行った時点で、見かけの透過係数の僅かな減少を示すが、その後は 5,600 kPa の注入圧力に対して $8 \times 10^{-19} \text{ m}^2 \sim 1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ をガス注入停止まで維持する。これはガス注入圧力の減圧により間隙水の排出が停止、あるいはごく緩慢となり、供試体内の間隙水飽和度の変化がごく小さくなったことによるものと考えられる。

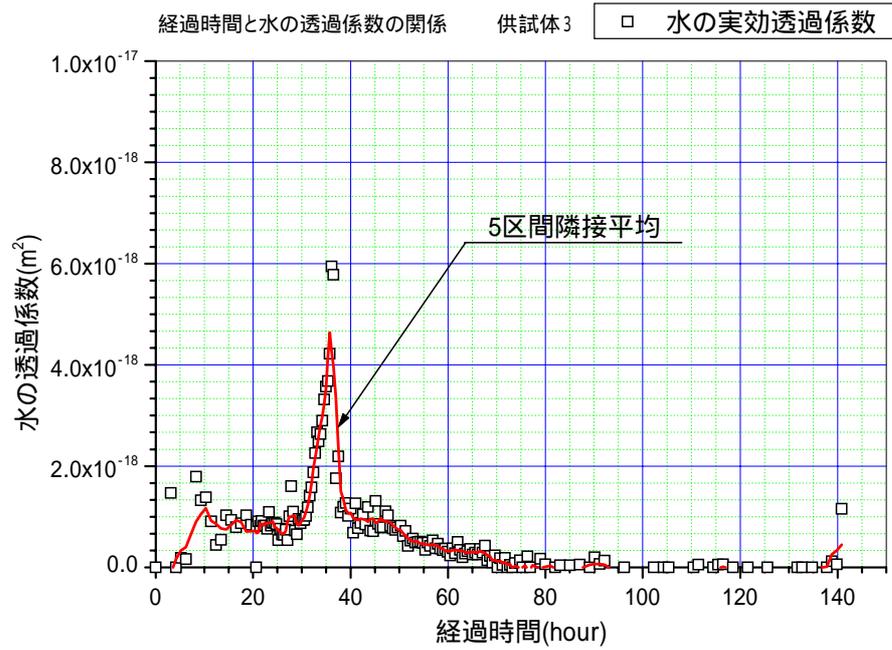


図 2-19 ガス透過時における水の透過係数の変化（供試体 3）

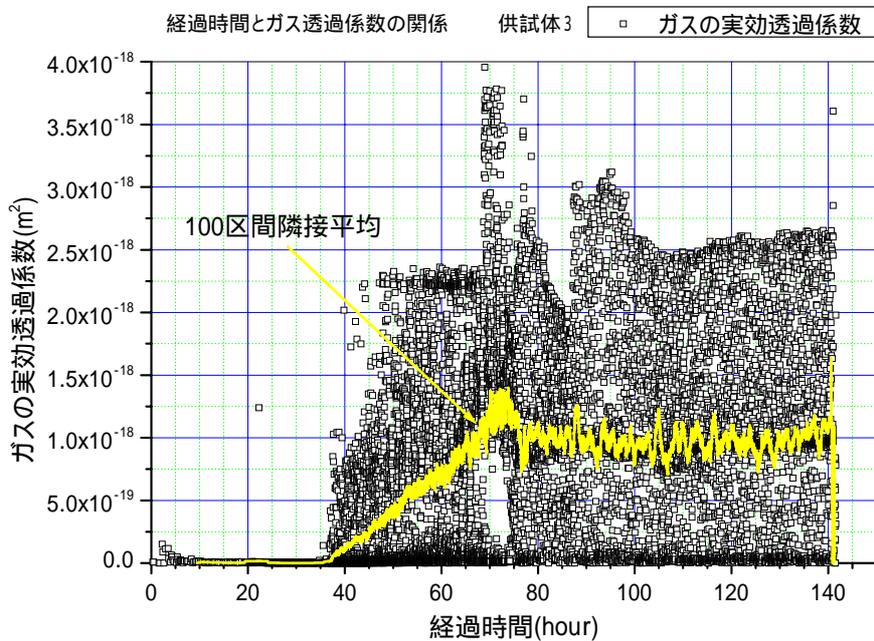


図 2-20 ガス透過時におけるガスの透過係数の変化（供試体 3）

(d) 乾燥試料に対するガスの透過係数

ガス押し過程終了後、乾燥機内において 110 にて 48 時間乾燥した供試体を、再度ガス透過試験装置内に設置して N_2 ガスを透過させることにより、乾燥試料に対するガスの透過係数を測定した。本供試体に対する測定条件は、背圧を載荷せず、拘束圧をガス注入圧力 + 3,500 kPa に維持するものとして実施した。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 2-21、図 2-22 に示した。また、これらの測定結果を基に算定されたガスの見かけの透過係数の経時変化を図 2-23 に示した。

ガス注入圧力を約 260 kPa、120 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。このように本試験ではガス注入圧力を 300 kPa 以下の低い圧力に設定しているが、この場合本試験装置で採用されているアキュムレータを介した圧力制御では、低圧領域でのアキュムレータ内のフローティングピストンとアキュムレータ内壁との摩擦による圧力損失のため、アキュムレータ内の 2 次側圧力の応答性がやや低下するため、供試体上流側の圧力の安定に要する時間が長期化する影響が見られる。

試験結果より、ガス注入圧力の減少に従ってガス排出速度も減少していることがわかる。図 2-21 及び図 2-22 に示されたガス注入圧力値及びガス排出速度値を基に、圧力勾配を変化させて測定したガス排出速度に対して、ガスの透過係数の変化を算定した。その結果、図 2-23 に示すように供試体中の圧力勾配の増加による供試体内の平均間隙圧力の増加によって、見かけの透過係数が減少する傾向が現われている。この現象は、媒体の間隙径が気体分子の平均自由行程に匹敵、あるいはこれをを下回る場合に、壁面近傍の流速が相対的に上昇することによって生じる *slippage* 現象の発生、すなわち Knudsen 流への遷移による影響が現れたものであると考えられる。

ここで、 N_2 ガスの異なる圧力に対する平均自由行程について、式 2-59) に基づいて概算した結果を表 2-9 に示した。本試験の条件に近い大気圧付近での平均自由行程は $0.1 \mu\text{m}$ の桁である。後述する間隙径分布測定結果 (図 2-42) では、径が $1 \mu\text{m}$ 以下の間隙は全間隙体積の 80% 以上、径が $0.1 \mu\text{m}$ 以下の間隙は全間隙体積の 65% を占めている。また、圧力が 5 MPa の場合は、平均自由行程は $0.001 \mu\text{m}$ の桁となり、軽石凝灰岩の $0.01 \mu\text{m}$ 以下の径の間隙体積は 25% 以下、 $0.002 \mu\text{m}$ 以下の間隙は 2% 以下であることから、Knudsen 流の影響はほとんど生じないと考えられ

る。

$$l = \frac{2.02\eta}{\sqrt{P\rho}} \quad \text{式 2-5}$$

ここで、

l : ガスの平均自由行程 : (m) : N_2 の粘性係数 : (Pa·s)

P : N_2 の圧力 : (Pa) : N_2 の密度 : (kg/m³)

表 2-9 N_2 ガスの平均自由行程

物性値	圧力(kPa) at 300 K			
	100	2,000	5,000	10,000
粘度 (Pa·s)	1.78E-05	1.82E-05	1.87E-05	1.98E-05
密度 (kg/m ³)	1.14E+00	2.28E+01	5.69E+01	1.14E+02
平均自由行程 (m)	1.07E-07	5.43E-09	2.24E-09	1.19E-09

平均間隙圧力の変化による透過係数への影響を図 2-24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。この関係は Klinkenberg 効果と称され、この関係を用いて slippage 現象の影響を排除することにより、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 透過係数を評価する手法が存在する。Klinkenberg 透過係数はガス圧力が無限大となったときの透過係数として評価され、図 2-24の X 軸切片として示される。本供試体に対して評価された Klinkenberg 透過係数は、 $2.52 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ であった。

なお、この手法によって評価される Klinkenberg 透過係数は、流体と移行媒体固相との間に物理・化学的相互作用のない液体の透過係数に相当するとされ、鉱物油類等に対する透過係数の評価には有効とされるが、粘土鉱物と水のように強い相互作用を生じる場合には、水の透過に係る絶対透過係数として適用すべきでないと考えられる。

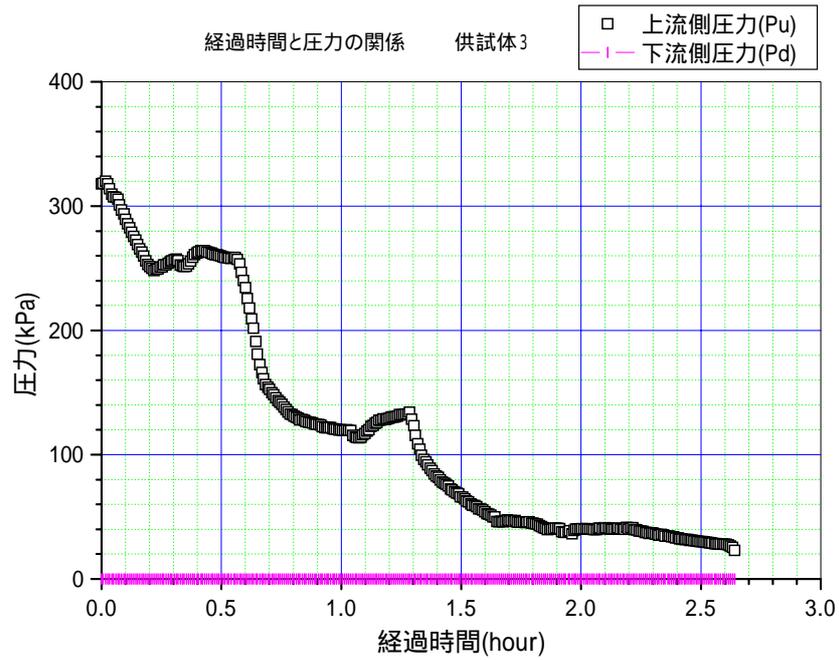


図 2-21 乾燥試料に対するガス注入圧力の変化 (供試体 3)

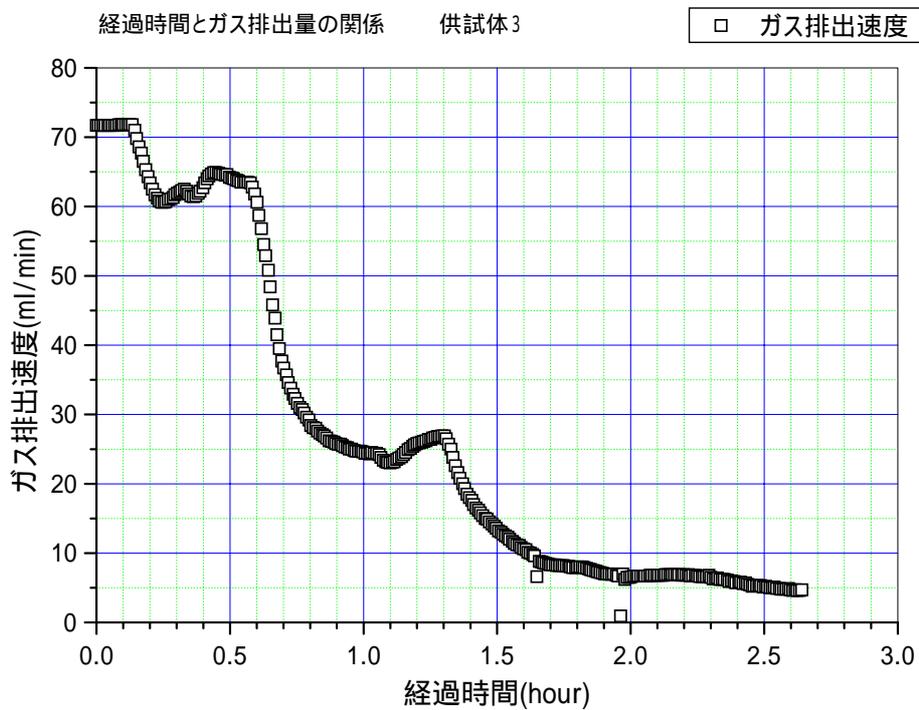


図 2-22 乾燥試料に対するガス排出速度の変化 (供試体 3)

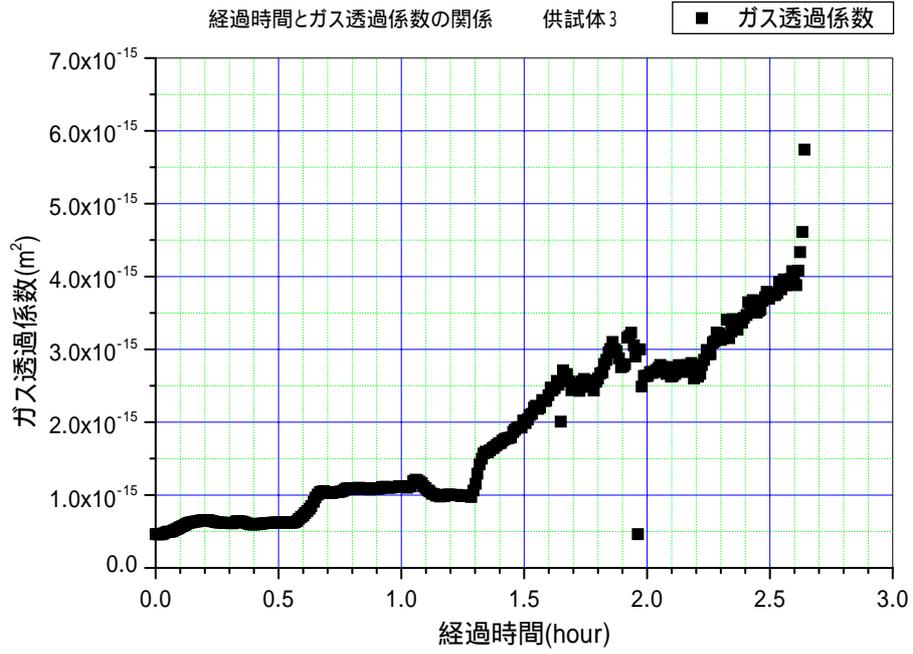


図 2-23 乾燥試料に対するガスの透過係数の変化 (供試体 3)

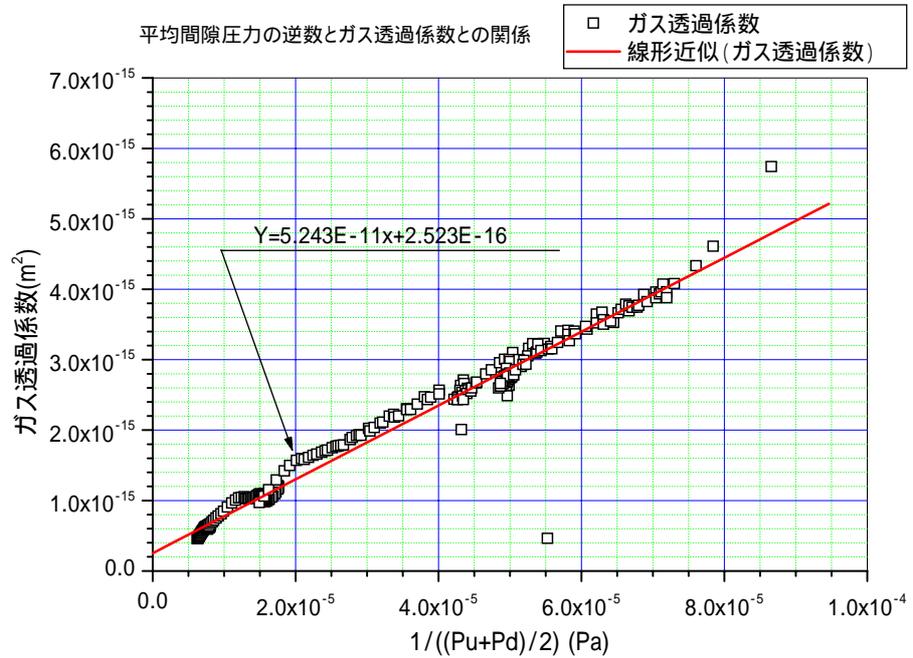


図 2-24 Klinkenberg 透過係数の評価 (供試体 3)

(e) 試験前後における供試体の諸物性

軽石凝灰岩供試体 3 に対する試験結果を表 2-10 に示す。また、試験開始前の試料の写真を図 2-25 に示す。

表 2-10 軽石凝灰岩供試体 3 の試験結果

No.	軽石凝灰岩供試体 3			
試験温度	18 ~ 21			
仕様 / 特性	軽石凝灰岩	栃木県大谷産，平成 13 年 8 月切出し		
	寸法	直径 7.620 cm，厚さ 5.017 cm		
	乾燥条件	炉乾燥	105 ~ 110 で 48 時間以上	
			開始時	終了時
	試料重量(g)	350.38	400.10	324.89
	乾燥密度(g/cm ³)			1.42
	湿潤密度(g/cm ³)	1.53	1.75	
	間隙率(%)	35.7		
	間隙体積(ml)	81.68		
液体	純水の粘性係数	1.002 × 10 ⁻³ Pa·s (101,325Pa, 20)		
液体	飽和試料の水の係数	8.45 × 10 ⁻¹⁹ m ²		
気体	窒素ガスの粘性係数	1.760 × 10 ⁻⁵ Pa·s (101,325Pa, 20)		
気体	Klinkenberg 透過係数	2.52 × 10 ⁻¹⁶ m ²		
計測上の threshold 圧(kPa)		365	試料上流側圧力(kPa)	5,451
			注入ポンプ圧(kPa)	5,500
			試料下流側背圧(kPa)	5,086
			背圧ポンプ圧(kPa)	5,000
計測上のブレイクスルー圧(kPa)		1,739	試料上流側圧力(kPa)	6,827
			注入ポンプ圧(kPa)	6,850
			試料下流側背圧(kPa)	5,087
			背圧ポンプ圧(kPa)	5,000

注 1) 試験前試料下流側残留水は 7.30ml

注 2) 試験前上流側残留水は 0.32ml

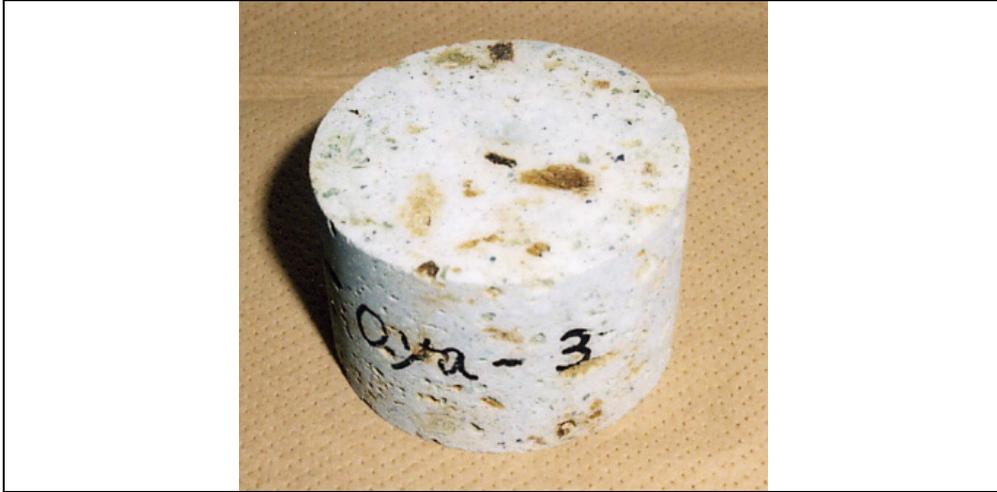


図 2-25 試験後の供試体（供試体3）

- (2) 軽石凝灰岩供試体 4
- (a) 飽和過程前期

図 2-26 ~ 図 2-27 に飽和過程前期（供試体両端から加圧注水）における注入圧力の経時変化，及び注入ポンプ吐出水量の経時変化を示す。

真空ポンプで試験容器及び周辺配管内を 12 時間以上減圧脱気させた後，供試体上下流側両端から脱気した純水を注入した。注入圧力を 75 kPa/hr でステップ状に昇圧させ約 2,800 kPa まで昇圧した時点で制御プログラムが停止し，注入圧力の昇圧とデータ記録が停止したが系の状態は維持された。したがって，注入圧力は 2,800 kPa 付近で約 61 時間保持され注水が継続された。その後，注入圧力を 75 kPa/hr でステップ状に昇圧することにより約 4,850 kPa まで昇圧させた後，注入圧力を 4,850 kPa 付近で約 74 時間維持して注水を継続した。その後飽和過程開始 164 時間後に試験容器内を約 4,850 kPa に保持した状態で試験容器を隔離し，約 230 時間その状態を維持した。飽和過程開始後約 407 時間後に試験容器内の圧力は約 4,000 kPa まで低下していたが，これは停止期間中の温度を約 15 に設定していたことによるものと考えられ，4,850 kPa に復帰させた際の注入ポンプの吐出量は 0.6 ml 程度であり，供試体の飽和に必要な加圧条件は十分に維持されたものと考えられる。

試験操作開始後のポンプの吐出量は最終的に 129.9 ml であるが，供試体中に注入された量はアキュムレータの昇圧と，管路内に急速に注入された容量との合計である約 76.0 ml を除いた，約 54 ml であると考えられた。

供試体 3 と同様に，試験開始後ほぼ 110 時間付近から水の注入はほとんど停止している。

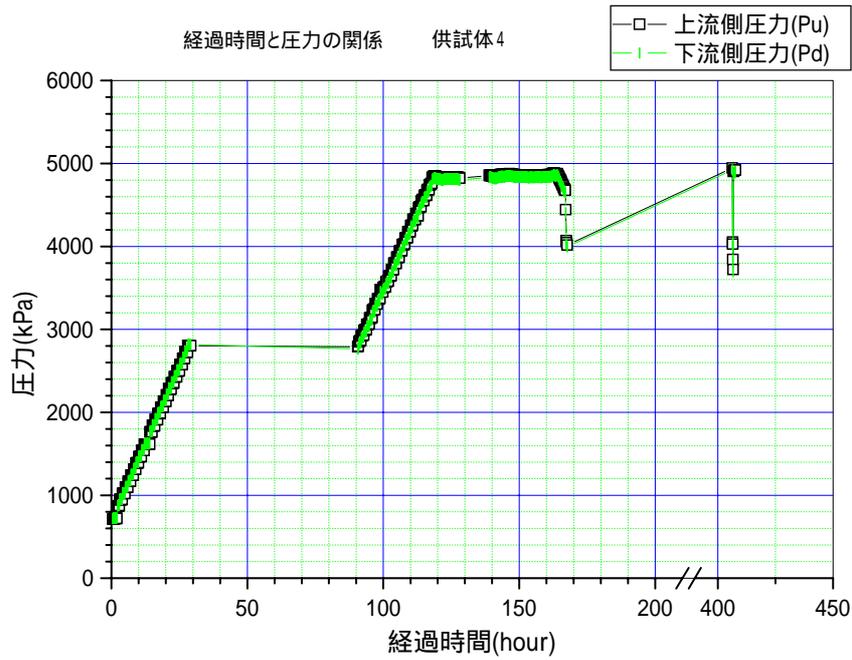


図 2-26 飽和前期過程における注入圧力の経時変化(供試体4)

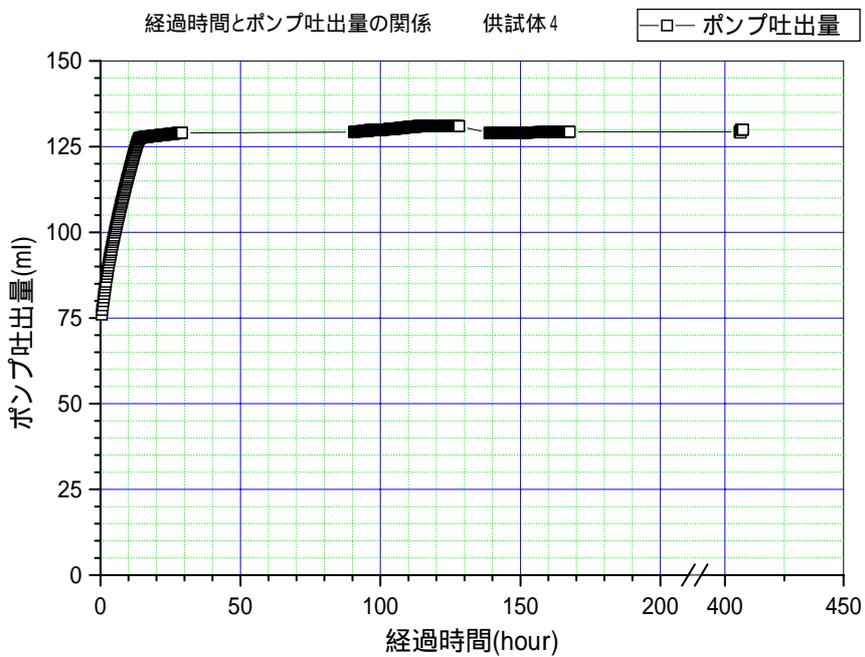


図 2-27 飽和前期過程における注入ポンプ吐出量の経時変化(供試体4)

(b) 飽和過程後期

図 2-28 ~ 図 2-29 に飽和過程後期（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，及び累積排出水量と累積注入水量の経時変化を示した。

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。注入圧力は供試体 3 に対する試験条件を踏まえ，これと同程度の 50 kPa/hr でステップ状に昇圧し，6,100 kPa まで昇圧させて約 215 時間保持した。注水開始直後に背圧が 600 kPa ほど低下しているが，これは供試体 3 と同じく初期の圧力勾配が極めて小さい状態で，供試体下流側の背圧レギュレータ内のダイヤフラムスピンドルの摩擦抵抗によって，ダイヤフラム開閉の追従特性が低下することによって生じたものと考えられ，圧力勾配が増加して供試体を透過する水量が有意な量に達することで回復している。この変動は供試体の飽和達成や透水性の評価結果に影響を及ぼすものではない。

昇圧開始後の供試体からの排出水量は 67.7 ml であったが，飽和過程後期に供試体内に注入された水は注入ポンプの吐出量が 71.2 ml であることから，この過程で供試体内に注入された水量は約 3.5 ml であると考えられた。以上より，飽和過程前後期を通して供試体内に注入された水量は合計約 58 ml となる。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であり，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。

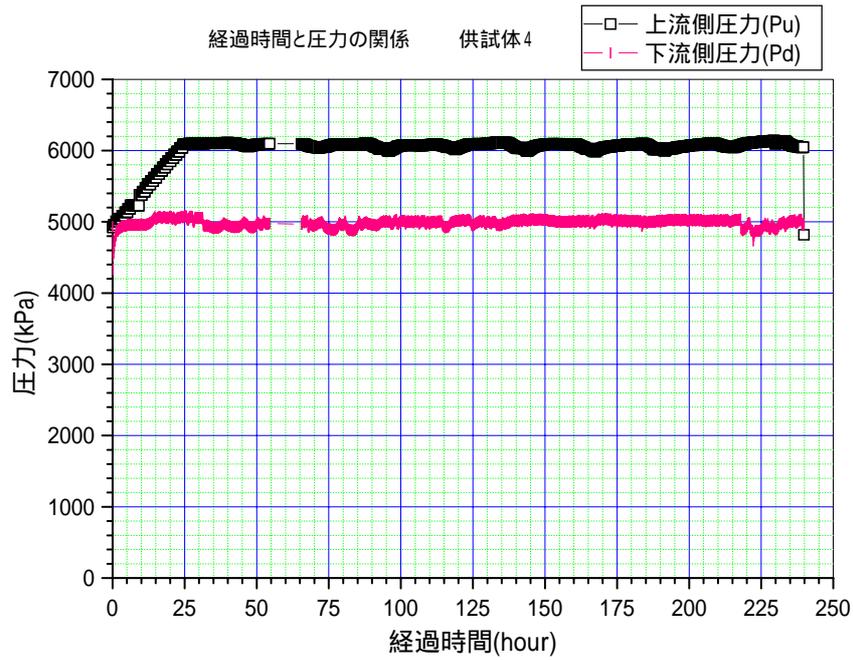


図 2-28 飽和過程後期における注入圧力の経時変化(供試体4)

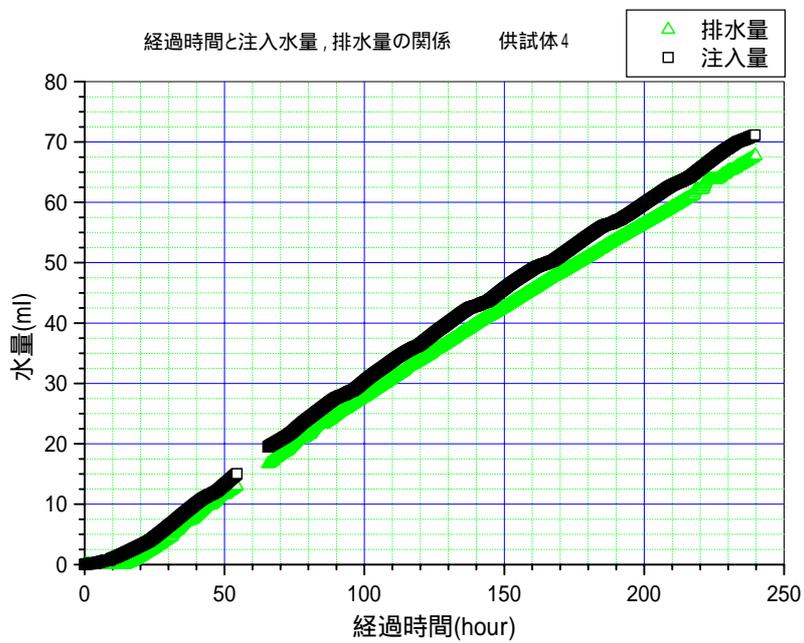
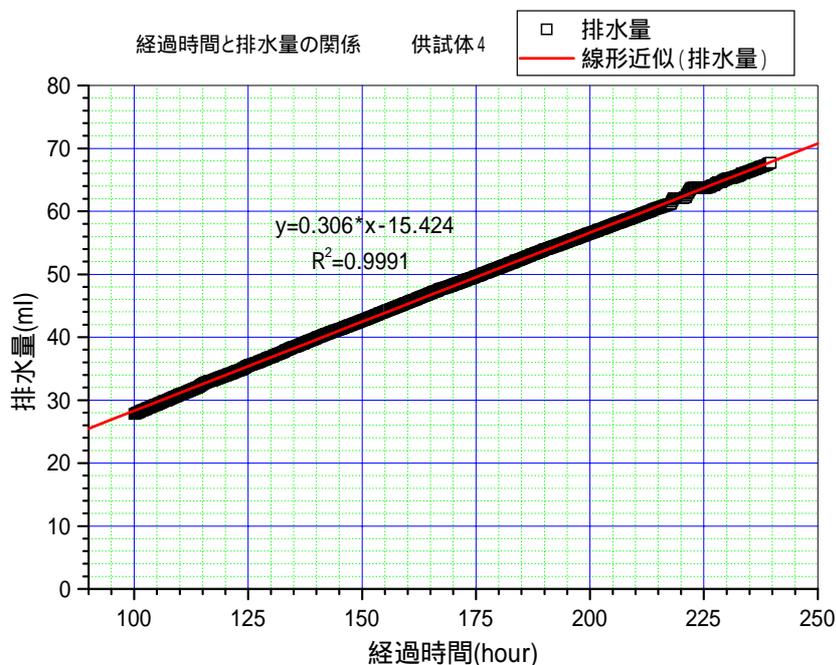


図 2-29 飽和過程後期における累積排水量の経時変化(供試体4)

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 2-30に、透過係数の算定結果を表 2-11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でき、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 $1.6 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ($1.56 \times 10^{-18} \text{ m}^2$) と近い値を示している。



85

図 2-30 飽和試料の透過係数の評価(供試体 4)

表 2-11 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

(c) ガス押し過程

図 2-31 ~ 図 2-32 に、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示した。

注入流体を N₂ ガスに切り替えて、背圧の低下を避けるため注入ガス圧力を 5,050 kPa から昇圧を開始した。また、供試体 3 ではブレイクスルー後の排出ガスフラックスがガス流量計の測定範囲を超える場合が見られたため、昇圧速度を小さく設定することとし、10 kPa/hr 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、その時点以降は一定の注入圧力を維持するように設定した。

ガス押し過程初期の試験装置からの水の排出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。供試体にガスが侵入した threshold 圧は、ガス押し過程開始時の 50 kPa 付近から累積排出水量が 1.05 ml を示した 229 kPa 以下である。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）に比較して相当程度高い値であるが、供試体 3 で得られた値よりは小さい値となっている。

供試体へのガスの侵入開始後、排出水量は徐々に増加して、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。これは供試体 3 で得られた 14.5 ml と近い値であり、粘土系材料（ベ

ントナイト/珪砂：70/30)の1~4 ml⁵⁾，JISモルタルの3 ml⁶⁾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 ml⁶⁾をも上回る値である。これは供試体3においても述べたように，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，注入圧力を約5,700 kPaとして約202時間保持した。ブレイクスルーを検出した圧力は供試体3では約6,800 kPaであり，これはガス注入圧力の昇圧速度が本供試体では10 kPa/hrであったのに対して，供試体3では75 kPa/hrと大きく設定されていたことによると考えられる。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た。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。これは供試体3について注入圧力減圧後に得られた移動平均値の1/2程度である。また供試体3と同じく，図2-32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24.4ml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。

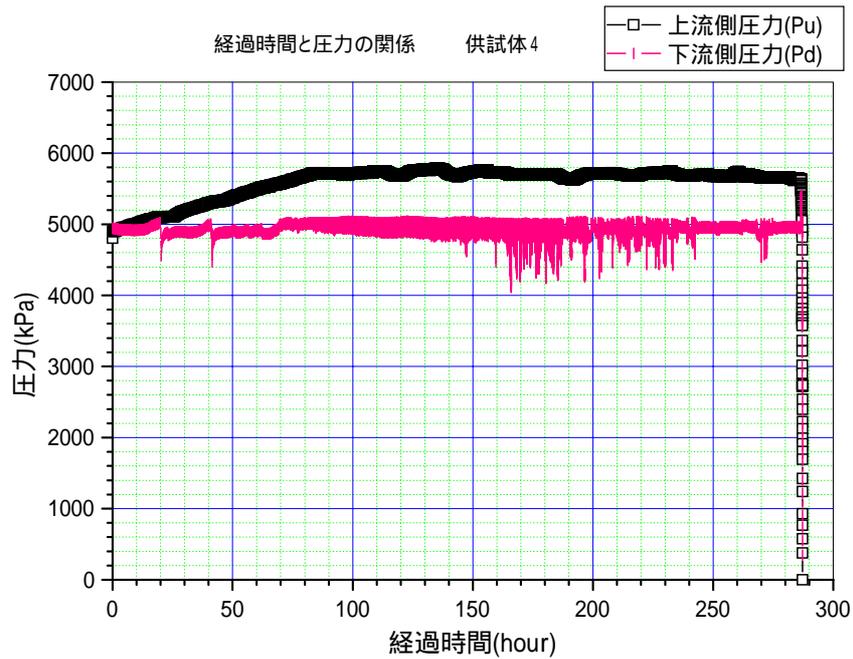


図 2-31 ガス押し過程における注入圧力の系時変化(供試体 4)

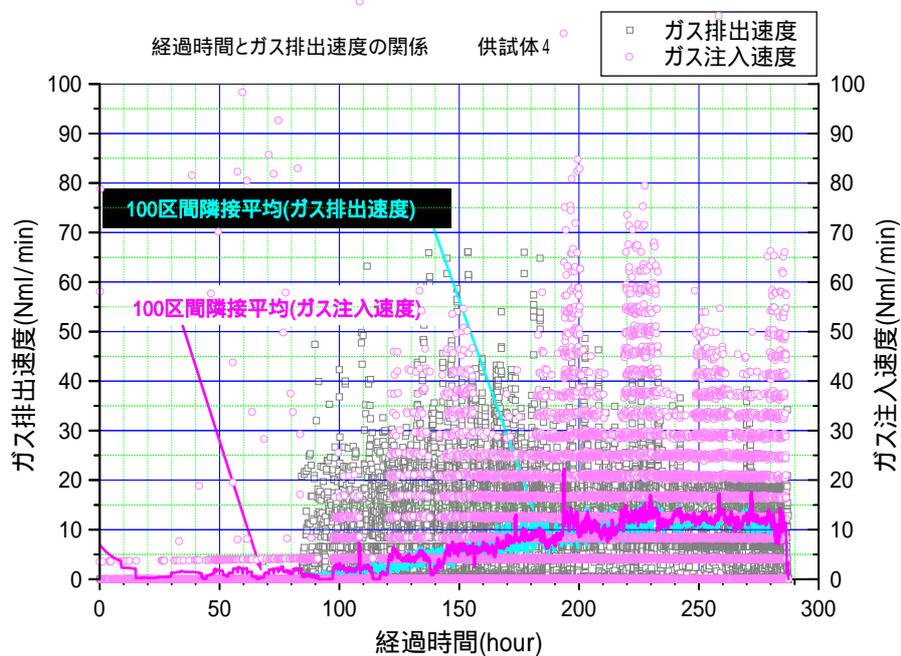


図 2-32 ガス押し過程におけるガス排出速度の系時変化(供試体 4)

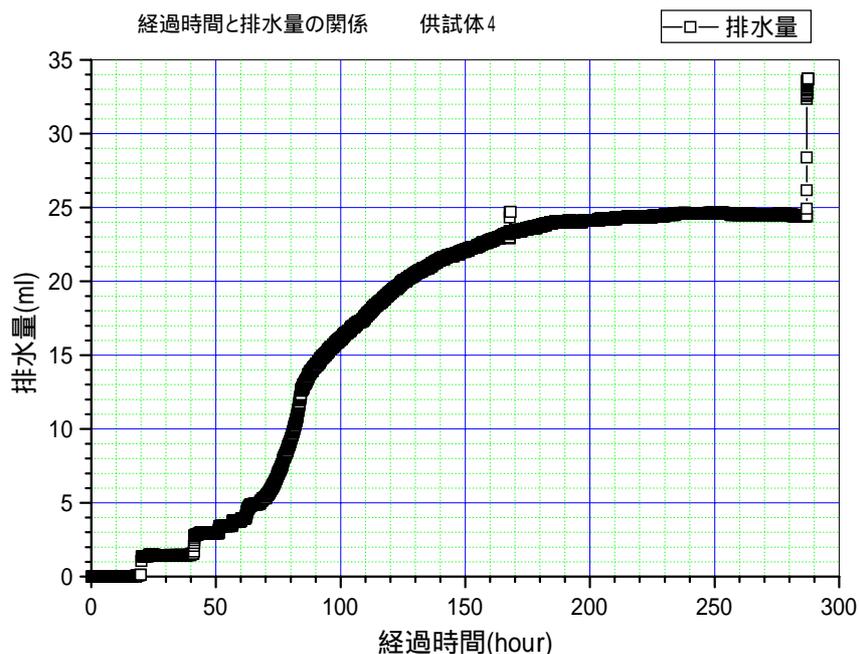


図 2-33 ガス押し過程における累積排水量の系時変化(供試体4)

(7) 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 2-12 に示した。また、飽和過程開始前、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 2-13 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 と算出されており、供試体 3 で得られたそれぞれの値である 0.77、0.67 と非常に近い値となった。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 % を占めることから (JIS モルタル : 5 % , W/C = 0.85 のセメントペースト : 0.5 %)、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を有するものと予測できる。

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，供試体 3 と同じく減圧後の排出量を加えた場合の飽和度算定値に近い値となっているが，供試体内の圧力勾配を考慮した場合，供試体全体の平均飽和度の値はこれより大きくなることから，詳細には別途，X 線 CT スキャを用いて含水量分布を測定する等によって確認する必要があると考えられる。

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，飽和工程開始前では 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。この場合，未飽和の間隙体積は 60.7 ml となり，飽和工程において供試体内に注入されたと考えられた水の体積 58 ml に非常に近い値となっている。一方でガス押し過程終了後が 0.90 と大きい値を示しているが，これについては供試体 3 と同様に，飽和度から算定される供試体内からの間隙水の排出量が約 7.9 ml と過少であることから，減圧時の計測用配管内からの水の移行，あるいは試験容器から供試体を取り出す際に周方向拘束ジャケット内の水との接触が生じたこと等により，水が供試体に含浸したものと考えられる。

表 2-12 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 2-13 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	

(1) 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 2-34、及び図 2-35に示した。

水の透過係数の変化は、初期の排水が間欠的に生じたためブレイクスルー以前の透過係数値の振れが大きいですが、供試体 3 と基本的に同様の挙動を示した。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、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は、変動が大きく明確ではないものの平均値は 10^{-19} m^2 の桁にあると考えられる。ガス押し過程開始約 20 時間後以降、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見かけの透過係数も変動が大きいですが、同様の範囲にあると考えられる。次に、ブレイクスルーによる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、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 $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ に達して、さらにごく緩やかに上昇中であった。この値は供試体 3 で観測された、ガス注入圧力を約 6,800 kPa で保持した期間の最大値 $1.2 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ に比較して小さく、5,600 kPa に減圧後に観測された $8.0 \times 10^{-19} \text{ m}^2 \sim 1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ の間にある。

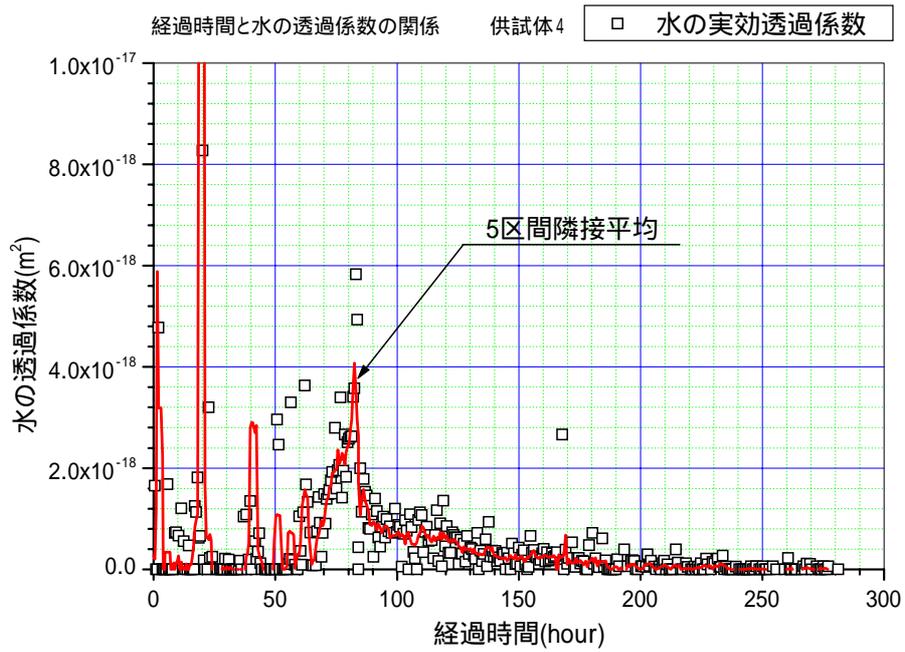


図 2-34 ガス透過時における水の透過係数の変化（供試体 4）

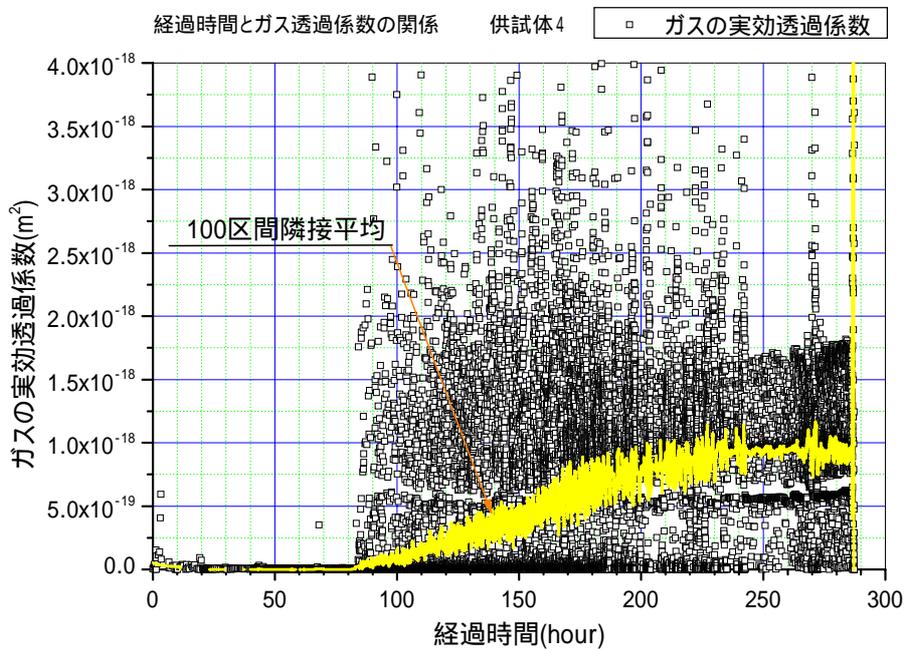


図 2-35 ガス透過時におけるガスの透過係数の変化（供試体 4）

(d) 乾燥試料に対するガスの透過係数

ガス押し過程終了後乾燥機内において 110 にて 48 時間乾燥した供試体を，再度ガス透過試験装置内に設置して N₂ ガスを透過させることにより，乾燥試料に対するガスの透過係数を測定した。本供試体に対する測定条件は，供試体 3 と同じく背圧は載荷せず，拘束圧をガス注入圧力 + 3,500 kPa に維持するものとして実施した。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 2-36，図 2-37 に示した。また，これらの測定結果を基に算定されたガスの見かけの透過係数の経時変化を図 2-38 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。このように，本供試体に対してもガス注入圧力を 300 kPa 以下の低い圧力に設定しているため，アキュムレータを介した圧力制御における低圧領域でのアキュムレータ内のフローティングピストンとアキュムレータ内壁との摩擦による圧力損失による影響，すなわち注入ポンプの吐出圧力に対するアキュムレータ内の 2 次側圧力の応答性の低下によって，供試体上流側の圧力の安定に要する時間が長期化する影響が見られる。

試験結果については，供試体 3 と同じくガス注入圧力の増減に従ってガス排出速度も増減することが示されている。図 2-36 及び図 2-37 に示されたガス注入圧力値，及びガス排出速度値を基に，圧力勾配を変化させて測定したガス排出速度に対するガスの透過係数の変化を算定した。その結果は，図 2-38 に示すように供試体 3 と同様に供試体中の圧力勾配の減少，すなわち供試体内の平均間隙圧力の減少により見かけの透過係数が増加する，Knudsen 流の形成によると考えられる挙動が現われている。

さらに，図 2-39 に示した平均間隙圧力の変化による透過係数への影響からは，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となった。供試体 3 と同じくこの Klinkenberg 効果を利用して，slippage 現象の影響を排除し，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。前述のように Klinkenberg 透過係数はガス圧力が無限大となったときの透過係数として評価され，したがって図 2-39 では X 軸切片として現れる。以上の手法により，本供試体に対して評価された Klinkenberg 透過係数は $2.38 \times 10^{-16} \text{ m}^2$

であり、供試体 3 に対して得られた $2.52 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ と非常に良い一致を示している。
なお、前述のようにこの手法によって評価される Klinkenberg 透過係数は、流体と移行媒体固相との間に物理・化学的相互作用の無い鉍物油等の液体の透過係数に相当するものであることに留意すべきである。

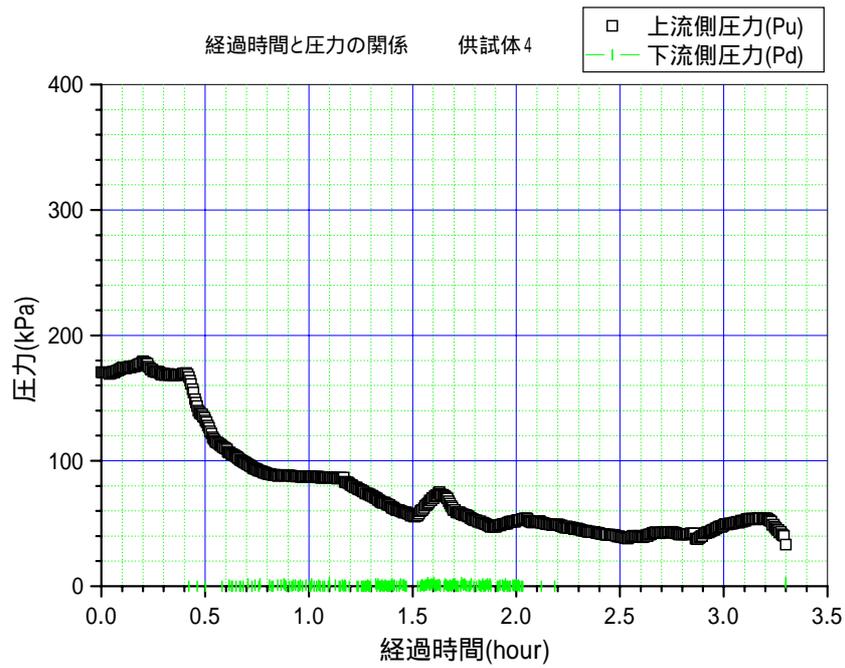


図 2-36 乾燥試料に対するガス注入圧力の変化 (供試体 4)

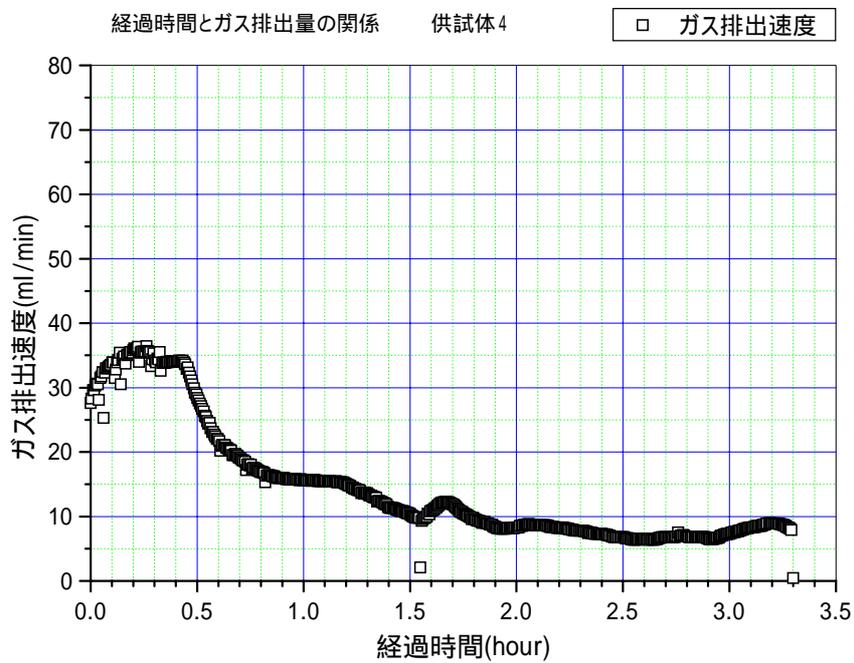


図 2-37 乾燥試料に対するガス排出速度の変化(供試体 4)

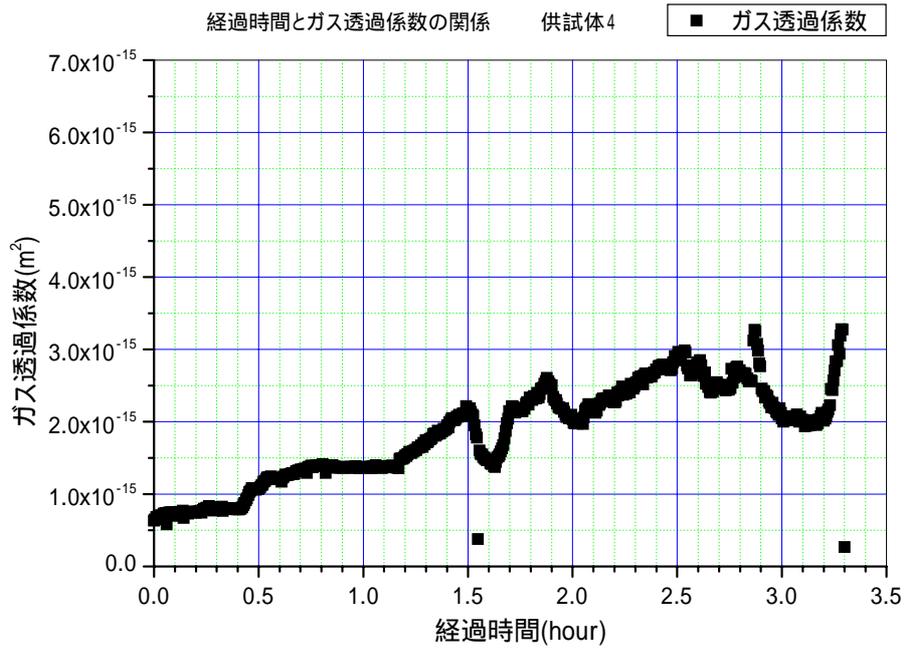


図 2-38 乾燥試料に対するガスの透過係数の変化 (供試体 4)

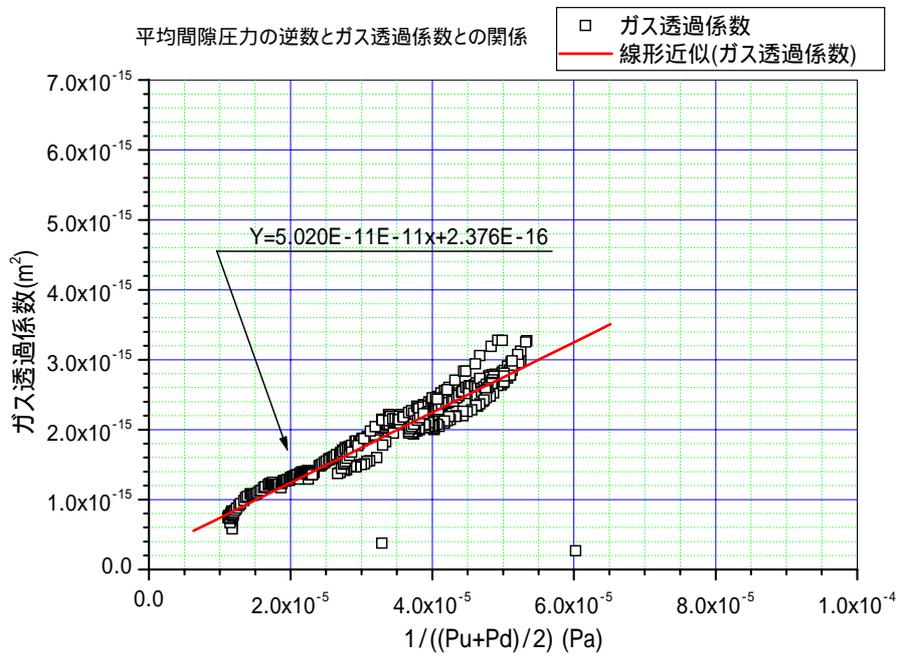


図 2-39 Klinkenberg 透過係数の評価 (供試体 4)

(e) 試験前後における供試体の諸物性

軽石凝灰岩供試体 4 に対する試験結果を表 2-14 に示す。また、試験開始前の試料の写真を図 2-40 に示す。

表 2-14 軽石凝灰岩供試体 4 の試験結果

No.	軽石凝灰岩供試体 4				
試験温度	18 ~ 21				
仕様 / 特性	軽石凝灰岩	栃木県大谷産，平成 13 年 8 月切出し			
	寸法	直径 7.617 cm，厚さ 5.130 cm			
	乾燥条件	炉乾燥	105 ~ 110 で 48 時間以上		
			開始時	終了時	乾燥後
	試料重量(g)		361.44	415.20	339.69
	乾燥密度(g/cm ³)				1.45
	湿潤密度(g/cm ³)		1.55	1.77	
	間隙率(%)		35.7		
	間隙体積(ml)		83.45		
液体	純水の粘性係数	1.002 × 10 ⁻³ Pa·s (101,325Pa, 20)			
液体	飽和試料の水の係数	8.45 × 10 ⁻¹⁹ m ²			
気体	窒素ガスの粘性係数	1.760 × 10 ⁻⁵ Pa·s (101,325Pa, 20)			
気体	Klinkenberg 透過係数	2.38 × 10 ⁻¹⁶ m ²			
計測上の threshold 圧(kPa)		<229	試料上流側圧力(kPa)	<5,102	
			注入ポンプ圧(kPa)	5,250	
			試料下流側背圧(kPa)	4,872	
			背圧ポンプ圧(kPa)	5,000	
計測上のブレイクスルー圧(kPa)		718	試料上流側圧力(kPa)	5,718	
			注入ポンプ圧(kPa)	5,889	
			試料下流側背圧(kPa)	5,000	
			背圧ポンプ圧(kPa)	4,999	

注 1) 試験前試料下流側残留水は 7.30ml

注 2) 試験前上流側残留水は 0.32ml



図 2-40 試験後の供試体（供試体 4）

以上のガス透過試験に用いられた供試体 3 , 及び 4 に対する諸元 , 並びに試験によって得られた特性値を , 表 2-15 にまとめて示した。

供試体 3 , 及び 4 に対して得られた水及びガスの透過係数はそれぞれよく一致しており , 計測上の threshold 値についても低い値にあることから , 双方の供試体に対する試験結果の信頼性は高いと判断される。

なお , 計測上のブレイクスルー圧力についてのみ約 1 MPa の相違があるが , 供試体 4 に設定されたガス注入圧力の昇圧速度が 10 kPa/hr であったのに対して , 供試体 3 に設定されたガス注入圧力の昇圧速度は 50 kPa/hr であり , 供試体 4 の 5 倍の速度で昇圧されていた。ガス侵入後 , 供試体 (厚さ 100mm) 中を気液界面先端が進展する速度は気液界面先端近傍の圧力勾配によって決定されると考えられ , 必ずしも昇圧速度に比例しない。このため , 気液界面が供試体下流端に到達するまでの間に供試体 3 の注入圧力がより高くなったものと考えられる。計測上のブレイクスルー圧力の差はガス注入圧力の昇圧速度が相違することによる影響が現れたものである。

また , 水による透過係数とガスによる透過係数 (Klinkenberg 透過係数) との間に 2 桁以上の相違があることについては , 以下の理由によるものと考えられる。すなわち , Klinkenberg 透過係数は気体による透過挙動を基礎として , Knudsen 流領域の透過特性から粘性流領域の透過特性を外挿により求める手法によって得られたものであることから , 流体が媒体中の間隙壁 (固相) との間に物理・化学的相互作用を生じることが想定されていない。したがって , たとえば炭化水素等の移行媒体固相表面との間に相互作用を生じない流体に対してのみ成立するものである。一方 , 特に粘土物質のように水と固相表面との間に物理・化学的相互作用を生じ , 固相近傍の流体分子が拘束されることによって見かけの粘度が増加するような現象が生じる場合には , 水による透過係数は気体によって測定される透過係数に比較して小さなものになる。このような現象については , 粘土系材料ばかりでなくセメント系材料においても水による透過係数とガスによる透過係数の間に , 1 桁から 2 桁以上の相違が観測されており^{6) 10)} , 凝灰岩においても同様の固液間の相互作用が生じているためと考えられる。

表 2-15 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No.	供試体 3	供試体 4	
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		水銀圧入法による
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

2.2 毛管圧力の測定評価

これまで処分場設置対象となりうる岩盤に対する毛管圧力定例は非常に少ない上、それらの多くは花崗岩等の結晶質岩に対するものであった。したがって、ここでは凝灰岩に対して毛管圧力の測定を実施し、ガス透過特性データベースに追加しその充実を図るとともに、2相流モデルによる適用性評価のためのシミュレーションに資するものとした。本試験で測定対象とした試料は凝灰岩の1例として選定された、標本材料として広く頒布されている栃木県大谷産の「軽石凝灰岩」である。

2.2.1 試験方法

飽和媒体中のガスの透過特性は、排水側の現象に対して測定を行う必要がある。これまでに、比較的低透水性の岩石に対する毛管圧力の評価に適用されている手法は、Mayerら¹⁰⁾がセメント系材料に対しても適用している水銀圧入法によるものが一般である。同手法は湿潤相を空気、非湿潤相を水銀として湿潤相の排出側の現象に対応しているが、固相と気液界面との接触角度を想定して湿潤相を水とした場合に換算する必要があることから、必ずしも実流体で測定された特性と同一とはならない場合がある。

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を忠実に再現可能と考えられる測定方法としては、吸引法、加圧法、遠心法がある。しかしながら、これらの測定方法のうち吸引法は約50 kPa以上の毛管圧力を示す媒体への適用は困難であるとされていることから、本試験では一般的にほぼ30 kPa～1,600 kPaの範囲の毛管圧力を示す媒体に適用可能であるとされる、遠心法により測定を行なうこととした。

また、軽石凝灰岩試料の主要物性のひとつとして、水銀圧入法による間隙径分布データの取得を行った。さらに、遠心法によって得られた毛管圧力データに対する対照用データとして、得られた間隙径分布データを用いて毛管圧力と間隙水飽和度との関係の評価についても併せて実施した。

(1) 水銀圧入法

(a) 試験装置

測定装置はMicromeritics社製のAutoPore II 9220を使用した。本装置は0 kPaから最大379 MPaまでの注入圧力が載荷可能である。

(b) 試験条件

水銀圧入法による測定条件、及び測定手順を以下に示した。また、水銀圧入法によ

る間隙径分布測定に先立って間隙率の測定を行なっていることから、これについても記述した。

(ア) 基礎物性測定

基礎物性としては、上述のように間隙率を測定、評価している。試験条件、測定手順は以下の通りである。

間隙率測定は Core Lab 社製 Auto Porosimeter を用いて以下の条件にて測定した。

- ・ 試験温度：室温
- ・ 使用ガス：He
- ・ 拘束圧力：無負荷

試験手順は遠心法の基礎物性取得において記述したものと同一である。

(イ) 間隙径分布測定

1.0 inch (約 25 mm) 供試体をステンレス鋼製シリンダに収納し、前処理及び間隙率測定のため、12 時間以上減圧した後、トルエンを圧入して供試体間隙を飽和させて注入量を測定する。さらに、104 にて 48 時間乾燥させてデシケータ内で冷却した後、秤量して重量を記録する。

主要な水銀圧入試験条件は以下の通りである

- ・ 試験温度：室温
- ・ 置換流体：水銀
- ・ 拘束圧力：無負荷

この供試体を Auto Porosimeter のペネトロメータ内に収納して秤量後、低圧測定系に接続する。試料チャンバ内を真空ポンプにて減圧した後水銀を注入し、注入圧力が大気圧をやや上回るまで上昇させる。平衡に達した後試料を収納したペネトロメータを秤量し、これを高圧測定系に接続する。平衡到達後注入圧力を段階的に 379MPa まで昇圧し、注入量を測定、記録する。減圧後試料を秤量し残留水銀量を測定、評価する。

水銀の注入量は Auto Porosimeter により温度、及び圧縮による影響を補正され、さらに、供試体の表面粗さに起因する補正を行い、飽和度を評価する。

各注入圧力に対する間隙径の評価は以下の式に従って算定する。

(2) 遠心法

(a) 試験装置

測定装置は Beckman 社製の High Speed Ultracentrifuge を使用した。本装置は供試体を収納した 3 個のコアホルダを装着するローターヘッドを有し、7 kPa から遠心法としては大きい値である、最大 7,600 kPa までの排水圧力の負荷が可能である。本測定装置の概念を図 2-41 に示す。

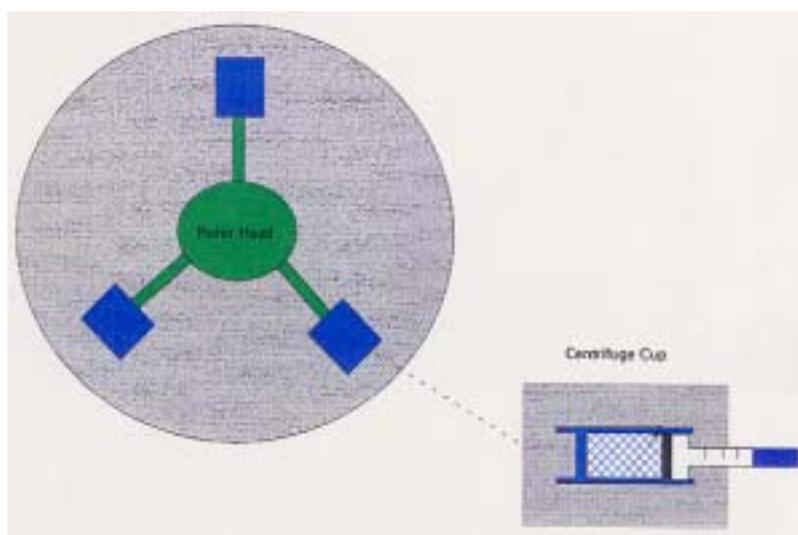


図 2-41 遠心分離法による毛管圧力測定装置概念

供試体より排出された液体は、コアホルダ先端に装着されたメスシリンダ内に蓄積され、ローターチャンバ内に設置された回転速度に同期するストロボによって排出液体量が読み取られ、記録される。

(b) 試験条件

遠心法による測定条件、及び測定手順を以下に示した。また、遠心法による毛管圧力測定に先立ち、間隙率、及び透過係数の測定を行っており、これについても記述した。

(f) 基礎物性測定

基礎物性としては、上述のように間隙率と透過係数(乾燥試料に対する He ガスによる測定)について測定、評価を実施している。試験条件、及び測定手順は以下の通りである。

(I) 間隙率

間隙率測定は Core Labo 社製 Auto Porosimeter を用いて、以下の条件にて測定した。

- ・試験温度：室温
- ・使用ガス：He
- ・拘束圧力：無負荷

1.5 inch (約 53 mm) 供試体を 104 にて乾燥させた後、デシケータ内で冷却し秤量する。この供試体を Auto Porosimeter のステンレス製マトリクスカップ内に収納して、所定体積、圧力の He ガスを注入することにより、系の圧力変化から間隙体積を評価した。

(II) 透過係数及び間隙率

透過係数測定及び間隙率について Core Lab 社製 CMS300 を用いて以下の条件にて測定した。

- ・試験温度：室温
- ・使用ガス：He
- ・拘束圧力：5,500 kPa 以上

1.5 inch(約 53 mm) の円柱形に整形された供試体を 104 にて乾燥させた後、デシケータ内で冷却し秤量する。この供試体を CSM300 のコアホルダ内に収納し、初期拘束圧を約 5,500 kPa 載荷して所定容積、圧力の He ガスを注入し、系内の圧力変化より間隙体積を評価した。その後 He ガスを一定速度で排出し、減圧過程で透過係数を算定することにより、Klinkenberg 透過係数を評価した。

ここで Klinkenberg 透過係数とは、2.1.5において記述したように、微小間隙径媒体、あるいは希薄流体の移行時に生じる間隙圧力変化による透過係数への影響を除き、固相との物理・化学的相互作用を生じない場合の粘性流場において得られる値に換算した透過係数を意味する。

透過係数が間隙圧力の影響を受けるのは以下の理由による。すなわち、流体分子の平均自由行程が間隙径相当、あるいはそれを上回る範囲では、流体分子と移行媒体壁との相互作用が著しく減少することによって媒体壁近傍での流速が 0 でなくなることから、いわゆる Knudsen 流 (石油資源開発分野では slip flow とも称する) を生じ、見かけ上透過係数が増加する減少が生じる。この影響は流体の平均自由行

程が増すほど、したがって間隙圧力が低下するほど大きくなるため、透過係数が間隙圧力の影響を受けることになる。Klinkenberg はこの現象を透過係数と平均間隙圧力の逆数との関係として表し、外挿によって求めた $P_{av} = 0$ ($1/P_{av} = 0$) での透過係数値が、液体炭化水素によって得られた透過係数に一致することを見出し¹¹⁾、以下に示す経験式を提唱したものである。

$$k_{\infty} = \frac{k_g}{\left(1 + \frac{b}{P_{av}}\right)} \quad \text{式 2-8}$$

k : Klinkenberg 透過係数(m^2) k_g : ガスの透過係数(m^2)
 b : Klinkenberg 定数(-) P_{av} : 平均間隙圧力(Pa)

ただし、前述のように Klinkenberg 透過係数はあくまで流体が媒体中の間隙壁(固相)と流体との間に相互作用が生じない炭化水素等に対してのみ成立するものであり、特に流体との相互作用により膨潤を生じる粘土等に対しては成立しないとされている¹²⁾ことに留意すべきである。

(4) 毛管圧力測定

1.5 inch (約 53 mm) の供試体を 104 にて乾燥させた後、デシケータ内で冷却し秤量する。この供試体を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にて減圧した後、蒸留水を 13.8 MPa で注入し約 6 時間保持することにより飽和試料を得た。飽和試料を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以下の条件により測定を実施した。

- ・ 試験温度：室温
- ・ 置換ガス：空気
- ・ 拘束圧力：無負荷

所定の加速度を与える回転数を 8 時間以上維持した後排水量を測定し、1 時間当りの排水速度が間隙体積の 0.1 % 以下となった時点で平衡に達したと見なし、段階的に回転数を上昇させた。各回転数において平衡状態への到達に要した時間は 24 ~ 48 時間であった。排水量測定終了後供試体を遠心機より取り出して秤量し、残留水量

を評価した。

毛管圧力と間隙水飽和度との関係は、供試体下流端の飽和度を 1.0 と仮定して平均飽和度から Hassler¹³⁾らの手法により求められた、供試体上流端の飽和度との関係として整理した。

2.2.2 試験結果

前節に記述した各測定手法を適用することにより測定、評価された基礎物性、間隙径分布、及び毛管圧力の結果を以下に示す。

(1) 水銀圧入法

軽石凝灰岩試料について水銀圧入法によって得られた間隙径分布、及びそれに先立って測定、評価された基礎物性を、図 2-42に示した。

AutoPorosimeter によって得られ、補助的にトルエン注入量によって確認された間隙率は 0.334 であった。また、水銀圧入時のデータを用いて Swanson らの手法¹⁴⁾により簡易的に透過係数 (Swanson 透過係数) を評価した。この結果はあくまで参考値であるが、 $1.75 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ と非常に大きい値となっている。

間隙径分布については、間隙径は約 $2 \mu\text{m}$ から $0.003 \mu\text{m}$ の範囲にあり、最頻値は $1.2 \mu\text{m}$ と $0.009 \mu\text{m}$ にほぼ等しいピークを有するほか、 $0.03 \sim 0.05 \mu\text{m}$ にもなだらかな極大地が存在し、やや複雑な間隙構造を示している。これは山口らによってほぼ対数正規分布を示す例が報告されている¹⁵⁾花崗岩とは異なり、Jacobs ら¹⁶⁾によってコンクリートについて得られた特性とも、複数のピークを有する点で類似しているが、材質が異なり径の分布が広範囲にわたる骨材を含有するコンクリートの方がピーク数が多く、間隙径の分布はさらに複雑である。また、軽石凝灰岩では $1 \sim 2 \mu\text{m}$ に区分間隙率分布の最頻度に匹敵するピークが存在し、Macro-及び Meso-pore の占める間隙率が 0.23 であり、JIS モルタルの 0.05、W/C = 0.85 のセメントペーストの 0.1 以下と比較しても非常に大きいことが特徴である。

以上の結果から軽石凝灰岩の毛管圧力と間隙水飽和度の関係は、threshold 値 (ガス侵入圧力) が小さく相対的に低間隙水飽和度領域での変化率が大きい傾向が予想された。

遠心法によって評価された毛管圧力特性に対する参考データとして、式 3-5 及び式 3-6 に示された関係を用いて間隙径分布から評価した毛管圧力と間隙水飽和度との関係を図 2-43に示した。

Macro -及び Meso - pore 領域のに含まれる間隙体積の全間隙体積に占める比率が高く、間隙径の小さい領域に区分間隙率の大きなピークが存在しないことを反映して、threshold 値が約 50 kPa と小さく、間隙水飽和度が 70 %に低下するまでに毛管圧力は 1 桁以上の増加を示し、70%から 10%の間の毛管圧力の増加は 2 桁未満となっている。

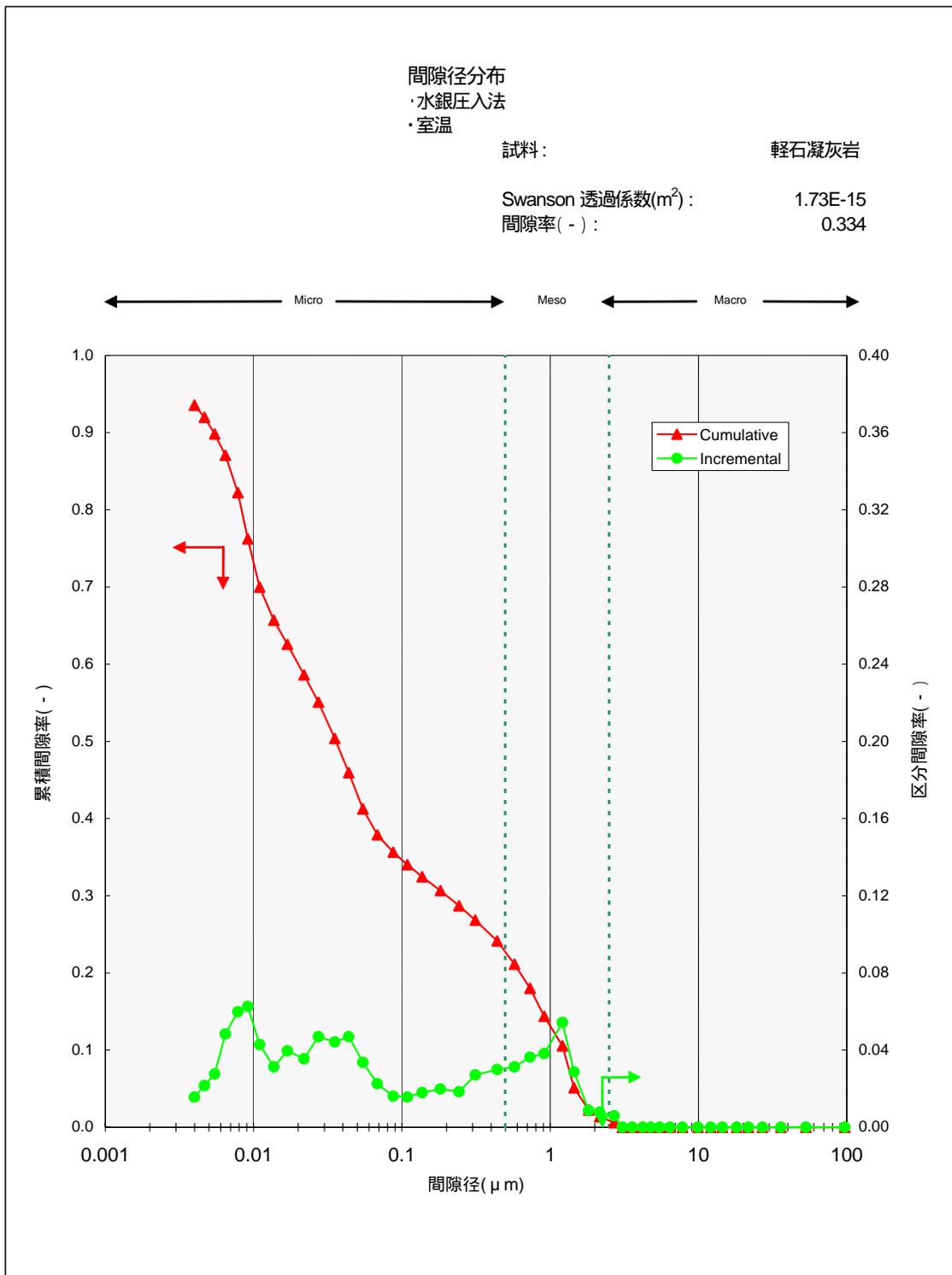


図 2-42 軽石凝灰岩の間隙径分布

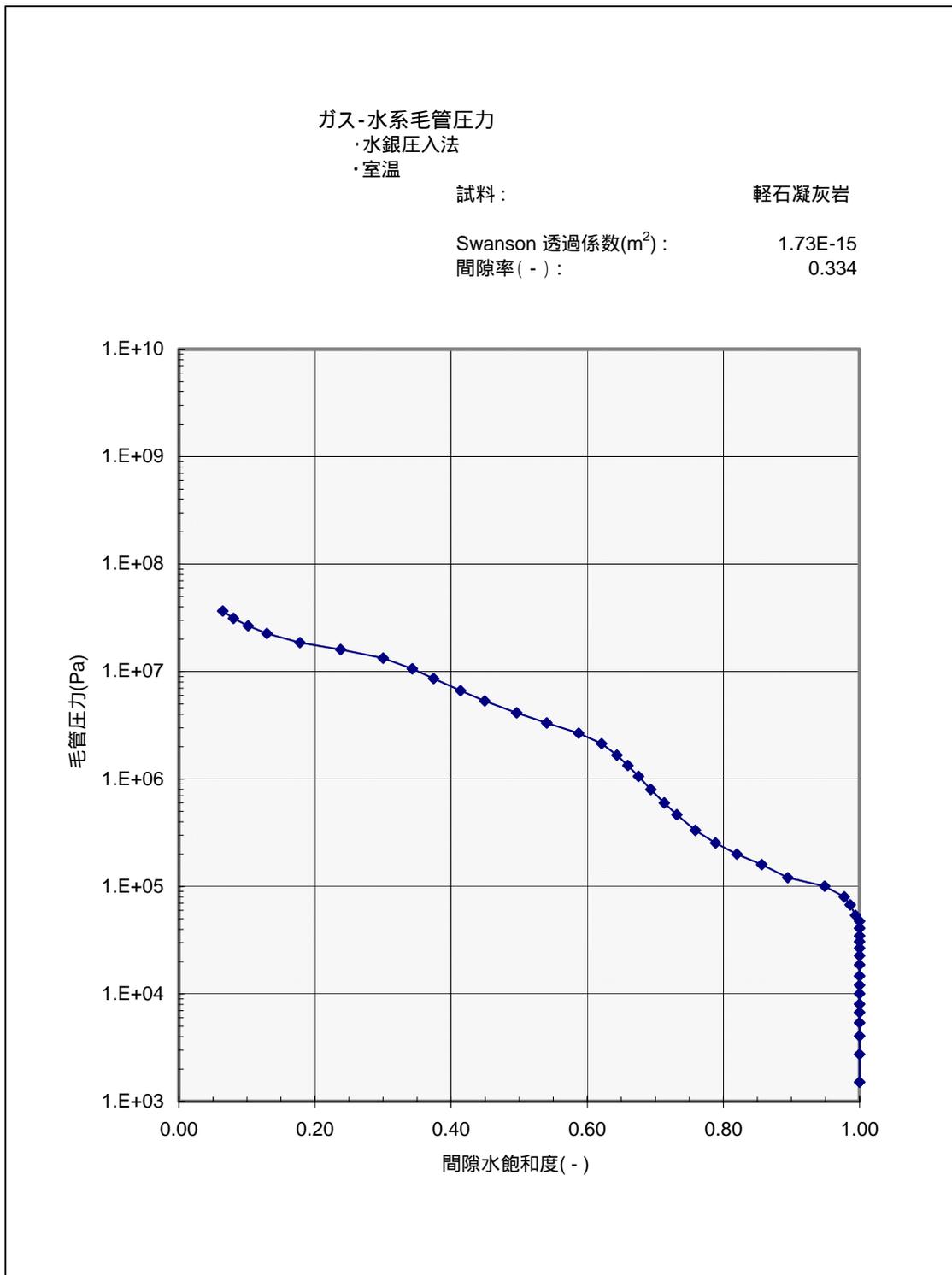


図 2-43 軽石凝灰岩の毛管圧力と飽和度との関係（水銀圧入法）

(2) 遠心法

軽石凝灰岩に対して遠心法によって得られた間隙径分布，及びそれに先立って測定，評価された基礎物性を図 2-44に示した。

Auto Porosimeter によって得られ，CMS300 によって補足的に値の確認が行われた間隙率は 0.380 であった。間隙率に関しては水銀圧入法による測定に供された試料から得られた値と良く一致している。また，CMS300 を用いて評価された Klinkenberg 透過係数は $3.45 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ であった。これはガス透過試験において評価された $2.3 \times 10^{-16} \sim 2.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ と良く一致する値である。一方，水銀圧入法に用いられた試料から得られた Swanson 透過係数は，ガス透過試験の飽和工程後期において測定評価された透過係数の $8.5 \times 10^{-19} \sim 8.9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ に比較して約 300 倍であり，非常に大きい値となっている。これは，Swanson 透過係数が不定形の試料に対して適用するための簡易的手法として，砂岩及び炭酸塩岩の測定値に基づいて提案された経験則であり，標準偏差が 1.7～2.6 程度で評価される透過係数の範囲としてほぼ $10^{-16} \text{ m}^2 \sim 10^{-13} \text{ m}^2$ を対象としたものであるが，今回測定対象とした軽石凝灰岩であることから間隙構造が異なり，また水の透過係数が $8.5 \times 10^{-19} \sim 8.9 \times 10^{-19}$ と評価対象範囲から大きく異なる試料であったことに起因する差異であると考えられる。

遠心法によって得られたデータは載荷可能な遠心力の値に制限があることから評価可能な範囲は 10^7 Pa 以下に止まるが，間隙水飽和度として飽和から 37%までのデータが得られており，飽和からの排水方向の挙動を解析するためのデータとしては十分な範囲が取得できている。

評価結果より遠心法によって得られた毛管圧力と間隙水飽和度との関係は，水銀圧入法による評価値と同様の傾向を示している。すなわち，threshold 値は水銀圧入法の約 50 kPa に対して約 10～20 kPa と約 1/2 以下であるが，間隙水飽和度が 0.8 における毛管圧力は，水銀圧入法の約 220 kPa に対して 230 kPa，間隙水飽和度が 0.5 においても水銀圧入法の約 4,000 kPa に対して遠心法による結果も約 4,000 kPa とほぼ一致している。

以上の測定，評価結果より，軽石凝灰岩の毛管圧力特性について以下の点が明らかである。

- ・毛管圧力と間隙水飽和度の関係が水銀圧入法と同一の傾向を示すことから，基本的に毛管圧力はスロ - ト部の間隙径によって支配されると考えられる。
- ・水銀圧入法による間隙径分布から評価された毛管圧力の値と遠心法による評価値が異なるのは，岩石鉱物の固相と間隙水との相互作用の影響を受ける界面の状態に対応した，正確な接触角度，界面張力等のパラメータが設定されていないこと，及び特に **threshold** 値については，供試体表面の粗さによる大径間隙体積に対する測定値への影響の差によるものと考えられる。

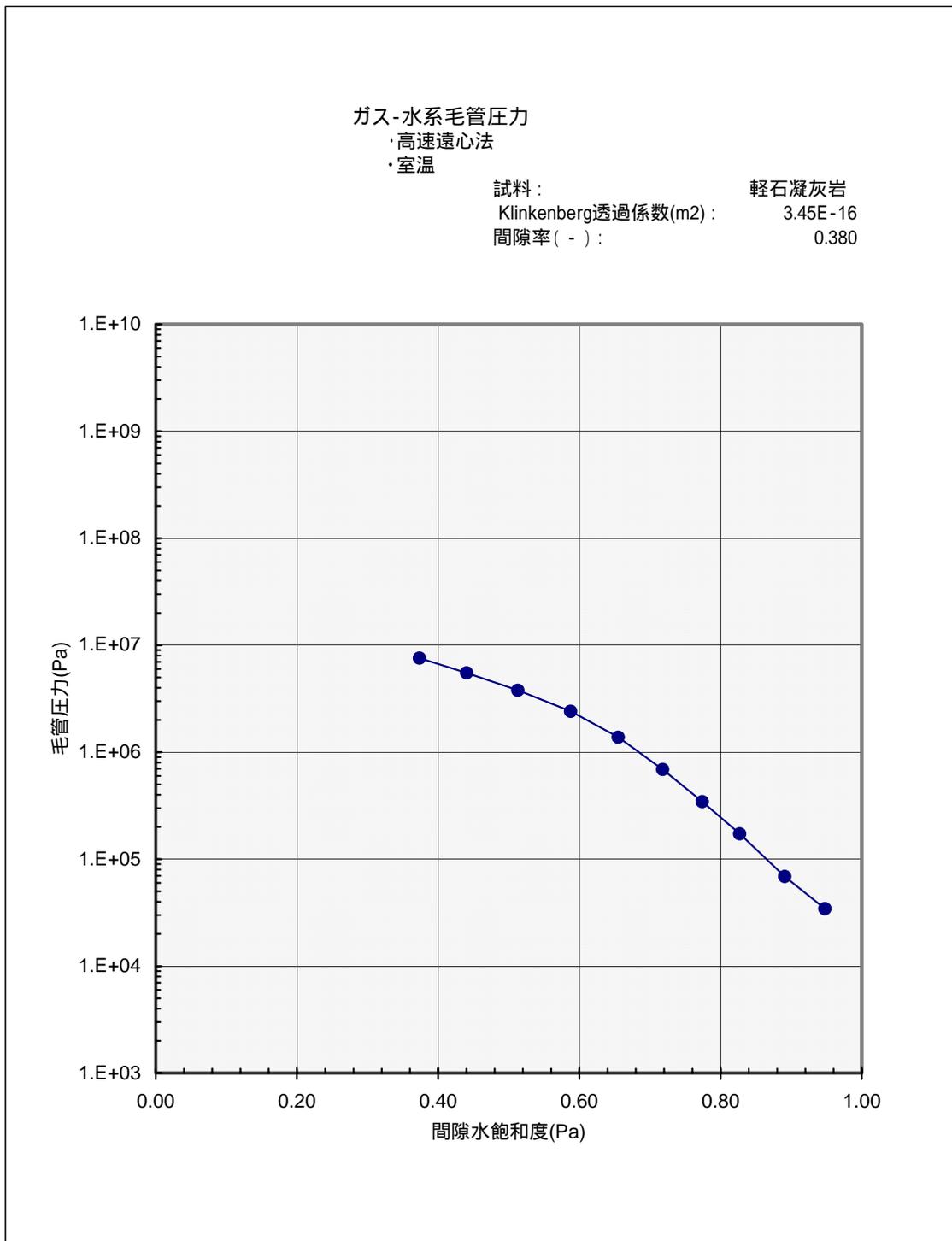


図 2-44 軽石凝灰岩の毛管圧力と飽和度との関係（遠心法）

水銀圧入法と遠心法とで測定した各供試体について，得られた特性値の比較を表 2-17にまとめて示した。

表 2-17 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

2.3 結論

2.3.1 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、Klinkenberg 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となる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。

2.3.2 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。

2.3.3 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、間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。

3 おわりに

地層処分環境下においては廃棄物収納容器，金属性廃棄物の腐食，微生物による有機物の分解によりガスが発生する。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による力学的影響，核種に汚染された間隙水の早期排出等の現象を誘発し，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。

本研究では，凝灰岩試料に対してガス透過試験，及び毛管圧力の測定試験，並びに間隙径分布測定試験を行ない，凝灰岩に対するガス移行評価への連続媒体に対する2相流モデルの適用性評価に必要な基礎データを取得した。

今後は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相流モデルによる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必要がある。さらに，複数産地の凝灰岩に対して試験を行うことにより移行特性データの信頼性向上を図るほか，凝灰岩以外の堆積岩系及び結晶質岩系の岩種に対しても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を取得するとともに，2相流モデルの適用性の評価，亀裂性岩盤に対するモデル開発と適用性の評価を行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会：“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”（1980）
- 2) 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 地層処分研究開発第2次取りまとめ”，JNC TN1400 99-020（1999）
- 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：“TRU核種を含む放射性廃棄物の処分について”（1991）
- 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：“TRU廃棄物処分概念検討書”，JNC TY1400 2000-001（2000）
- 5) 山本幹彦，他：“人工バリア中のガスの移動に関する研究（ ）” 核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書，JNC TJ8400 2000-032（2000）
- 6) 山本幹彦，他：“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”，核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書，JNC TJ8400 2002-046.
- 7) Horseman S. T. and Harrington J. F.：“Study of Gas Migration in Mx80 Buffer Bentonite, British Geological Survey Natural Environment Research Council”，NERC BGS Internal Report WE/97/7 to SKB（1997）
- 8) Swift B. T., Hoch A. R. and Rodwell W. R.：“Modelling Gas Migration in Compacted Bentonite: GAMBIT Club Phase 2 Final Report”，POSIVA report 2001-02（2001）
- 9) Crank, J.：“The Mathematics of diffusion”，Clarendon Press, Oxford（1956）
- 10) Mayer, G., Jacobs, F. and Wittmann, F. H.：“Experimental Determination and Numerical Simulation of the Permeability of Cementitious Materials”，Nuclear Engineering and Design, 138, pp.171-177（1992）
- 11) Klinkenberg, L. J.：“The Permeability of Porous Media to Fluid and Gases”，Aner. Petrol. Inst. Drilling Prod. Pract., pp.200-212（1941）
- 12) Corey, A. T.：“Mechanics of Immiscible Fluids in Porous Media”，Water Resources Publications（1994）
- 13) Hassler, G. L. and Brunner, E.：“Measurement of Capillary Pressures in Small Core Samples”，T.P. 1817, Petroleum Technology, pp.114-123, March（1945）
- 14) Swanson, B.F.：“A Simple Correlation Between Permeabilities and Mercury

Capillary Pressures”, Journal of Petroleum Technology, December (1981)

15) 山口徹治，磯部博志，中山真一，“花崗岩内の微小間隙構造の解析”，放射性廃棄物研究，vol.3, No.2 (1997)

16) Jacobs, F. and Wittmann, F. H.: “ Long term Behavior of Concrete in Nuclear Waste Repositories”, Nuclear Engineering and Design, Vol.138, pp.157-164 (1992)