

TRU廃棄物処分システムの 性能評価手法の検討 (III)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1995年3月

東洋エンジニアリング株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては複製、転載、引用等を絶対に行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒 319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 33
動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所
技術開発推進部・技術管理室

要 旨

TRU廃棄物処分システムの性能評価手法の検討（Ⅲ）

藤田 義夫*
山本 幹彦**
佐原 聡**
寺村 政浩***

要 旨

再処理事業等の本格化に伴って、今後 α 核種等の長寿命核種を有意に含むTRU廃棄物の発生量増大が予想される。このため原子力委員会においてもその処分方策について検討が行われ、1990年代後半までに処分方法の目処を得るよう勧告がなされている。TRU廃棄物の処分方法を具体化する上では処分の長期安全性の評価が不可欠であり、このためには、考慮すべき現象の摘出、評価モデルの開発とデータの収集、モデルの妥当性の検証等からなる研究開発によって、処分後長期の安全性に影響する主要な現象を評価可能とする総合的安全評価手法の構築が必要である。

そこで、本研究は上記の考え方にに基づき、総合的性能評価手法の構築に必要な基礎データと各現象の重要度の指標を与えると共に、研究開発課題の明確化を目的として以下の範囲について調査、検討を実施するものである。

- (1) 各種バリア構成物質に対する2相流データの収集
- (2) バリア構成物質に対する不飽和透過特性試験
- (3) 処分場ガスの蓄積、及び不飽和移行に対する評価

以上の調査検討により、TRU廃棄物処分への適用が考慮される代表的なバリア材料に対する2相流パラメータの一部についてデータを取得することができた。また、これらのデータを用いて2相流移行解析を実施し、ガスの種類による移行、蓄積挙動の相違を明かにした。

本報告書は、東洋エンジニアリング株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の内容である。

契約番号：060D0250

事業団担当部課室及び担当者：環境技術開発部 地層処分開発室 間野 正

* 原子力・電力事業本部

** 原子力・電力事業本部 原子力・電力エンジニアリング部

*** 原子力・電力事業本部 原子力・電力プロジェクト部

Performance Assessment Method for Transuranic Waste
Isolation System and Development Plan (Ⅲ)

Yoshio Fujita*
Mikihiko Yamamoto**
Satoshi Sahara**
Masahiro Teramura***

Abstract

At the present time, almost all radioactive wastes contaminated by transuranic elements (Transuranic waste) are generated at a reprocessing plant and a MOX fuel fabrication plant operated by PNC. But it is expected that the volume of transuranic waste will increasingly accumulate in the near future, after the start of operating commercial fuel cycle facilities. In the circumstances more comprehensive and reasonable programme for disposal of transuranic waste is required. We started this study from 1990 for the purpose structuring a basic concept to ensure a safety geological disposal of transuranic wastes.

In 1994, the subjects listed below were investigated for those purposes.

- (1) Accumulation of 2 phase flow parameters of potential barrier materials
- (2) Measurement of relative permeability and capillary pressure for potential barrier materials
- (3) Simulation of gas migration and accumulation in deep geological disposal site

From these investigations, 2 phase parameters such as relative permeability and capillary pressure have been measured for some potential barrier materials which would be applied to transuranic waste repository. And migration and accumulation of some kinds of gases in deep repository was analyzed by use of measured 2 phase flow parameters. Different migration behavior between air, hydrogen, and carbon dioxide was estimated and discussed.

Work performed by Toyo Engineering Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Isolation System Research Program (Tadashi Mano)

* Nuclear and Electric Power Div.

** Nuclear and Electric Power Div. Engineering Dept.

*** Nuclear and Electric Power Div. Project Dept.

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、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実施主体設立の準備が行われている。一方、技術開発に関しては重点的な開発項目とその進め方が示され研究開発が実施されているところである。

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月より放射性廃棄物対策専門部会の下にTRU廃棄物分科会を設置して鋭意審議検討が実施され、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」をとりまとめ、TRU廃棄物の区分目安値(全 α 核種：約1GBq/t)を示すと共に、処分方法の見通しを1990年代後半までに得ることを勧告している。さらに、諸外国における α 廃棄物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 α 廃棄物またはILWの処分を実施するとしているイギリス、スイス等の国も多く、我が国においても早急に区分に応じた適切な処分方法を確立する必要がある。

本研究はこのような状況を踏まえ、処分方法を具体化する上で不可欠となる長期の安全評価手法の確立に資することを目的として、TRU廃棄物の処分に対する性能評価において評価対象とすべき固有、重要な現象の抽出とその評価手法について調査検討を行うと共に、必要となる研究課題を明らかにしようとするものである。

本年度は、性能評価対象とすべき基本シナリオに含まれる主要な現象のうち、代表的なものとしてガス発生による影響について着目し、各種バリア材料に対してガスの移行の評価に必要なデータを得るため特性試験を開始すると共に、2相流解析コードによりこれまでの調査結果と今回の特性試験で得られたデータを用いてガス発生の影響評価を行った。

目次

目 次

1. 各種バリア構成物質に対する2相流データの調査	1
1.1 2相流パラメータの調査	1
1.1.1 地層	2
1.1.2 粘土物質	14
1.1.3 セメント/コンクリート	17
1.2 パラメータ値の検討	20
1.3 まとめと今後の課題	25
2. バリア構成物質に対する不飽和透過性試験	27
2.1 測定, 評価手法の検討	27
2.1.1 油層評価におけるコア試験の概要	27
2.1.2 試料の調整	35
2.1.3 透過特性測定方法	36
2.2 土質工学分野における測定, 評価手法の検討	50
2.2.1 pF試験の概要	51
2.2.2 pF値と適切な試験法	51
2.2.3 pF試験法	52
2.3 不飽和透過特性試験	54
2.3.1 地層	54
2.3.2 粘土材料	64
2.3.3 充填材	65
2.4 毛管圧特性試験	68
2.4.1 地層	68
2.4.2 充填材	70
2.5 まとめと今後の課題	71

3. 処分場ガスの蓄積, 及び不飽和移行に対する評価	73
3.1 評価条件の設定	73
3.1.1 幾何モデル	73
3.1.2 パラメータの設定	78
3.2 ガスの蓄積, 移行に対する評価	91
3.2.1 解析結果	91
3.3 まとめと今後の課題	156
4. まとめ	161
参考文献	165

表 リ ス ト

表 リ ス ト

表1.1-1	調査対象データ	2
表1.1.2-1	3軸拘束による透過係数試験結果	16
表1.1.3-1	モルタルの組成	17
表1.1.3-2	コンクリート組成	18
表1.2-1	母岩の特性値	21
表1.2-2	緩衝材, 粘土物質の特性値	23
表1.2-3	セメント, コンクリートの特性値	24
表2.2.3-1	各種飽和溶液の相対湿度とpF	53
表2.2.3-2	硫酸水溶液上空気相の相対湿度	53
表2.3.1-1	相浦砂岩の定常法測定による透過係数	56
表2.3.1-2	三池砂岩の定常法測定による透過係数	56
表2.3.1-3	東濃凝灰岩の定常法測定による透過係数	57
表2.3.1-4	相浦砂岩のトランジェントパルス法による透過係数	61
表2.3.1-5	三池砂岩のトランジェントパルス法による透過係数	61
表2.3.1-6	東濃凝灰岩のトランジェントパルス法による透過係数	62
表2.3.1-7	各試料の基礎物性	62
表2.3.2-1	ベントナイト/砂混合材料の定常法測定による透過係数	64
表2.3.2-2	ベントナイト/砂混合材料の トランジェントパルス法による透過係数	64
表2.3.3-1	ポーラスコンクリート試料の基礎物性	66
表3.1.2-1	2相流解析ケース	88
表3.2.1-1	TOUGH2による解析結果一覧表	154
表3.3-1	気体の粘性係数と溶解度	156

図 リ ス ト

図 リ ス ト

図1.1.1-1	ベレア砂岩の相対透過係数(1)	4
図1.1.1-2	ベレア砂岩の相対透過係数(2)	5
図1.1.1-3	ベレア砂岩の遠心分離法毛細管圧力測定結果(1)	7
図1.1.1-4	ベレア砂岩の遠心分離法毛細管圧力測定結果(2)	8
図1.1.1-5	ベレア砂岩の遠心分離法毛細管圧力測定結果(3)	9
図1.1.1-6	ベレア砂岩の水銀圧入法による毛細管圧力測定結果	10
図1.1.1-7	凝灰質砂岩の相対透過係数	12
図1.1.1-8	頁岩の水銀圧入法による毛細管圧力測定結果	13
図1.1.2-1	透過性試験装置概念図	15
図1.1.3-1	コンクリート透過性試験装置概念図	18
図1.1.3-2	モルタルのガスによる透過性試験結果	19
図2.1.1-1	通常コア試験法のフローシート	28
図2.1.1-2	ホールコア試験法のフローシート	29
図2.1.3-1	ダルシー則による透過モデル	37
図2.1.3-2	表面張力と毛管圧力	45
図2.2.2-1	pF試験法とpF値との対応	51
図2.3.1-1	透過性試験装置概念図	54
図2.3.1-2	トランジェントパルス/定圧測定装置外観	55
図2.3.1-3	トランジェントパルス法の測定原理	58
図2.3.1-4	Brace3の岩石モデル	59
図2.3.1-5	相対透過係数モデル	63
図2.3.1-6	東濃凝灰岩の相対透過係数	63
図2.3.2-1	ベントナイト/砂の相対透過係数	65
図2.3.3-1	相対浸透率測定装置	67
図2.3.3-2	ポーラスコンクリート試料	67

図2.3.3-3	ポーラスコンクリートの相対透過係数	68
図2.4.1-1	水銀圧入法による毛管圧測定装置	69
図2.4.1-2	毛管圧モデル	69
図2.4.1-3	凝灰岩の毛管圧	70
図2.4.2-1	ポーラスコンクリートの毛管圧	71
図3.1-1	TOUGH2基本モデル	74
図3.1.1-1	廃棄体概念図	74
図3.1.1-2	ボールドタイプ処分施設概念	75
図3.1.1-3	ボールドタイプ処分施設概略寸法	75
図3.1.1-4	ボールドタイプ施設解析モデル	77
図3.2.1-1	ガス飽和度 (H_2 : 基本ケース)	94
図3.2.1-2	ガス飽和度分布-230年度 (H_2 : 基本ケース)	95
図3.2.1-3	ガス飽和度分布-430年度 (H_2 : 基本ケース)	96
図3.2.1-4	ガス飽和度分布-800年度 (H_2 : 基本ケース)	97
図3.2.1-5	ガス飽和度分布-10,000年度 (H_2 : 基本ケース)	98
図3.2.1-6	間隙圧力 (H_2 : 基本ケース)	99
図3.2.1-7	間隙圧力分布-4年後 (H_2 : 基本ケース)	100
図3.2.1-8	間隙圧力分布-230年後 (H_2 : 基本ケース)	101
図3.2.1-9	間隙圧力分布-800年後 (H_2 : 基本ケース)	102
図3.2.1-10	間隙圧力分布-10,000年後 (H_2 : 基本ケース)	103
図3.2.1-11	間隙水流速 (H_2 : 基本ケース)	104
図3.2.1-12	間隙水流速ベクトル-150年後 (H_2 : 基本ケース)	105
図3.2.1-13	間隙水流速ベクトル-500年後 (H_2 : 基本ケース)	106
図3.2.1-14	間隙水流速ベクトル-2,700年後 (H_2 : 基本ケース)	107
図3.2.1-15	ガス流速 (H_2 : 基本ケース)	108
図3.2.1-16	ガス流速ベクトル-240年後 (H_2 : 基本ケース)	109
図3.2.1-17	ガス流速ベクトル-260年後 (H_2 : 基本ケース)	110
図3.2.1-18	ガス流速ベクトル-1,010年後 (H_2 : 基本ケース)	111

図3.2.1-19	ガス飽和度（空気：基本ケース）	114
図3.2.1-20	間隙圧力（空気：基本ケース）	115
図3.2.1-21	ガス飽和度（CO ₂ ：基本ケース）	118
図3.2.1-22	間隙圧力（CO ₂ ：基本ケース）	119
図3.2.1-23	間隙水流速（CO ₂ ：基本ケース）	120
図3.2.1-24	ガス流速（CO ₂ ：基本ケース）	121
図3.2.1-25	ガス飽和度分布-1,990年度（CO ₂ ：基本ケース）	222
図3.2.1-26	ガス飽和度（H ₂ ：ポーラスコンクリート）	125
図3.2.1-27	間隙圧力（H ₂ ：ポーラスコンクリート）	126
図3.2.1-28	間隙水流速（H ₂ ：ポーラスコンクリート）	127
図3.2.1-29	ガス流速（H ₂ ：ポーラスコンクリート）	128
図3.2.1-30	ガス飽和度分布-800年度（H ₂ ：ポーラスコンクリート）	129
図3.2.1-31	間隙圧力（CO ₂ ：ポーラスコンクリート）	132
図3.2.1-32	ガス飽和度（H ₂ ：凝灰岩）	135
図3.2.1-33	間隙圧力（H ₂ ：凝灰岩）	136
図3.2.1-34	間隙水流速（H ₂ ：凝灰岩）	137
図3.2.1-35	ガス流速（H ₂ ：凝灰岩）	138
図3.2.1-36	ガス飽和度分布-450年度（H ₂ ：凝灰岩）	139
図3.2.1-37	ガス飽和度分布-800年度（H ₂ ：凝灰岩）	140
図3.2.1-38	ガス飽和度（CO ₂ ：凝灰岩）	142
図3.2.1-39	間隙圧力（CO ₂ ：凝灰岩）	143
図3.2.1-40	ガス飽和度（ベントナイト／砂：H ₂ ）	145
図3.2.1-41	間隙圧力（ベントナイト／砂：H ₂ ）	146
図3.2.1-42	間隙水流速（ベントナイト／砂：H ₂ ）	147
図3.2.1-43	ガス流速（ベントナイト／砂：H ₂ ）	148
図3.2.1-44	ガス飽和度（ベントナイト／砂：CO ₂ ）	150
図3.2.1-45	間隙圧力（ベントナイト／砂：CO ₂ ）	151
図3.2.1-46	間隙水流速（ベントナイト／砂：CO ₂ ）	152

図3.2.1-47	ガス流速（ベントナイト／砂：CO ₂）	.....	153
図3.3-1	ガスの溶解度	.....	158
図3.3-2	間隙水放出フラックス累積値－施設上面（H ₂ ：基本ケース）	.....	159
図3.3-3	間隙水放出フラックス累積値－施設側面（H ₂ ：基本ケース）	.....	159
図3.3-4	間隙水放出フラックス累積値－施設底面（H ₂ ：基本ケース）	.....	159
図3.3-5	ガス放出フラックス累積値－施設上面（H ₂ ：基本ケース）	.....	160
図3.3-6	ガス放出フラックス累積値－施設側面（H ₂ ：基本ケース）	.....	160
図3.3-7	ガス放出フラックス累積値－施設底面（H ₂ ：基本ケース）	.....	160

第 1 章

1. 各種バリア構成物質に対する2相流データの調査

平成5年度はこれまでに試験、評価が行われているセメント、粘土物質、地層物質等に対する絶対透過係数、ガス及び水の相対透過係数と間隙中の水の飽和度との関係などについて予備的な調査を行った。その結果、2相流あるいは3相流の解析評価に関する手法及びデータは、石油開発、ガス貯溜等の資源開発関連分野に相当の蓄積が見られることが明かになった。しかしながら、同分野で解析対象とする地層条件は油層等の比較的透過性の高い地層に対するものであることから、本研究において検討対象とする低透水性の岩盤、粘土層等に対する特性データはこれまでほとんど収集されていないことが判明した。

平成6年度はTRU廃棄物の処分場への適用が検討されている各種のバリア構成物質に対し、相対透過係数の間隙水飽和度による変化、毛管圧の間隙水飽和度による変化とそれらを記述するモデル、及びこれらモデルに用いられるパラメータについて定量的データの収集を行うため、これまでの試験研究例について調査を行った。また、調査結果を基に各バリア構成物質についてガス発生の影響に係わる性能評価で用いるパラメータがとるべき値の範囲等について検討した。

1.1 2相流パラメータの調査

昨年度の調査結果より低透水性岩盤に対する2相流データの収集は極めて困難と予想されたことから、本節では天然バリアとして低透水性の岩盤に限定せず、広い範囲の岩盤、地層を対象として2相流解析に必要なデータを収集することとした。さらに、現在TRU廃棄物の処分場に人工バリアとして適用が検討されているコンクリート、粘土物質等のバリア構成物質について、各構成物質ごとに2相流解析に必要なデータを収集することとし、国内外の文献調査を行った。

Jeffriesら¹⁾は地層中のガス移行に対する影響因子のうち、移行媒体に係わる項目として表1.1-1に示す因子を摘出している。これらのパラメータは総て本研究で2相流解析に適用する解析コード"TOUGH2"の入力データとして必要であるが、ここでは熱の移行に係るデータ項目を除き、表1.1-1で○印を付した項目を調査対象とした。

表1.1-1 調査対象データ

	データ項目	被影響因子	取得状況*	調査対象
移行媒体特性	・密度	熱移行	多い	
	・間隙率	圧力, 移行速度	多い	○
	・比熱	熱移行	多い	
	・熱伝導度	熱移行	多い	
	・絶対透過係数	移行速度, 圧力	少ない	○
	・相対透過係数	移行速度, 圧力	極めて少ない	○
	・水の残留飽和度	相対透過係数	極めて少ない	○
	・ガス残留飽和度	相対透過係数	極めて少ない	○
	・間隙径分布係数	相対透過係数, 毛管圧	極めて少ない	○
	・毛管圧	圧力	極めて少ない	○
	・毛管排除圧 (ブレイクスルー圧) (臨界圧) (敷居圧)	毛管圧	極めて少ない	○
	・屈曲度	拡散係数	極めて少ない	
	・熱膨張係数	間隙構造, 透過係数	多い	
	・圧縮特性	間隙構造, 透過係数	少ない	
	・亀裂密度等 亀裂特性	間隙構造, 透過係数	極めて少ない	

* ; 処分場候補となり得る岩盤, 人工バリア材候補として考慮されている材料について

1.1.1 地層

本年度は岩石中の2相流特性についての知見を深めるため, 石油公団石油開発技術センターの協力を得て堆積岩系について2相流特性データを収集した²⁾。現時点では岩石の種類による相対透過係数, あるいは毛管圧の挙動に相関を設定することはできないため, 間接的にも結晶質岩, 低透水性岩盤の特性を予測評価することはできないが, 多孔質媒体中の2相流に係わる現象を理解するうえで貴重なデータを得ることができたと考えられる。

なお, ここで採用されている各種特性データの測定評価方法については, 2.1節において詳細に解

説を行う。

(1) ベレア砂岩

多孔質岩盤の透過性研究に標準的に用いられる、アメリカ合衆国ベレア産の砂岩については、ガス、水、オイルに対する2相流データが比較的豊富に得られている。

以下に示すようにベレア砂岩の浸透率は80~90[m darcy] (透水係数として $8 \times 10^{-7} \sim 9 \times 10^{-7}$ [m/s]) であり、比較的透過性が大きいことから、処分対象地層として相応しいかどうかについては議論の余地がある。ここでは評価対象地層に対して得るべきデータ形態の例を示すことを目的として、当該岩盤に対する測定結果を示した。

(i) 相対透過係数及び関連パラメータ²⁾

ベレア砂岩に対する空気/水、及びオイル/水の2相系における相対透過係数の変化を図1.1.1-1~2に示す。

(a) 空気/水系における相対透過係数

空気/水系における相対透過係数の間隙水飽和度に対する変化を図1.1.1-1に示す。

(b) 空気/オイル系における相対透過係数

空気/オイル系における相対透過係数の間隙水飽和度に対する変化を図1.1.1-2に示す。

試料No.V-14 (空気/水系) は試料No.M-02 (空気/オイル系) と水によって測定された絶対透過係数、及び間隙率はほぼ等しいものの、空気によって測定された絶対透過係数が約2倍の相違があり、間隙構造に若干の違いがあることが予測されるが、その差は大きなものではないと考えられる。ここで水とオイルとでは粘性係数、比重が異なるが、空気との2相系における相対透過係数の変化としては水と非常に類似した挙動を示している。

RELATIVE PERMEABILITY (gas-water)

Page _____ of _____

File _____

Well		K(air)	224.0	md
Sample No.	V-14	K(water)	91.6	md
Depth	(m)	Porosity	18	%
Lithology	ベレア砂岩			

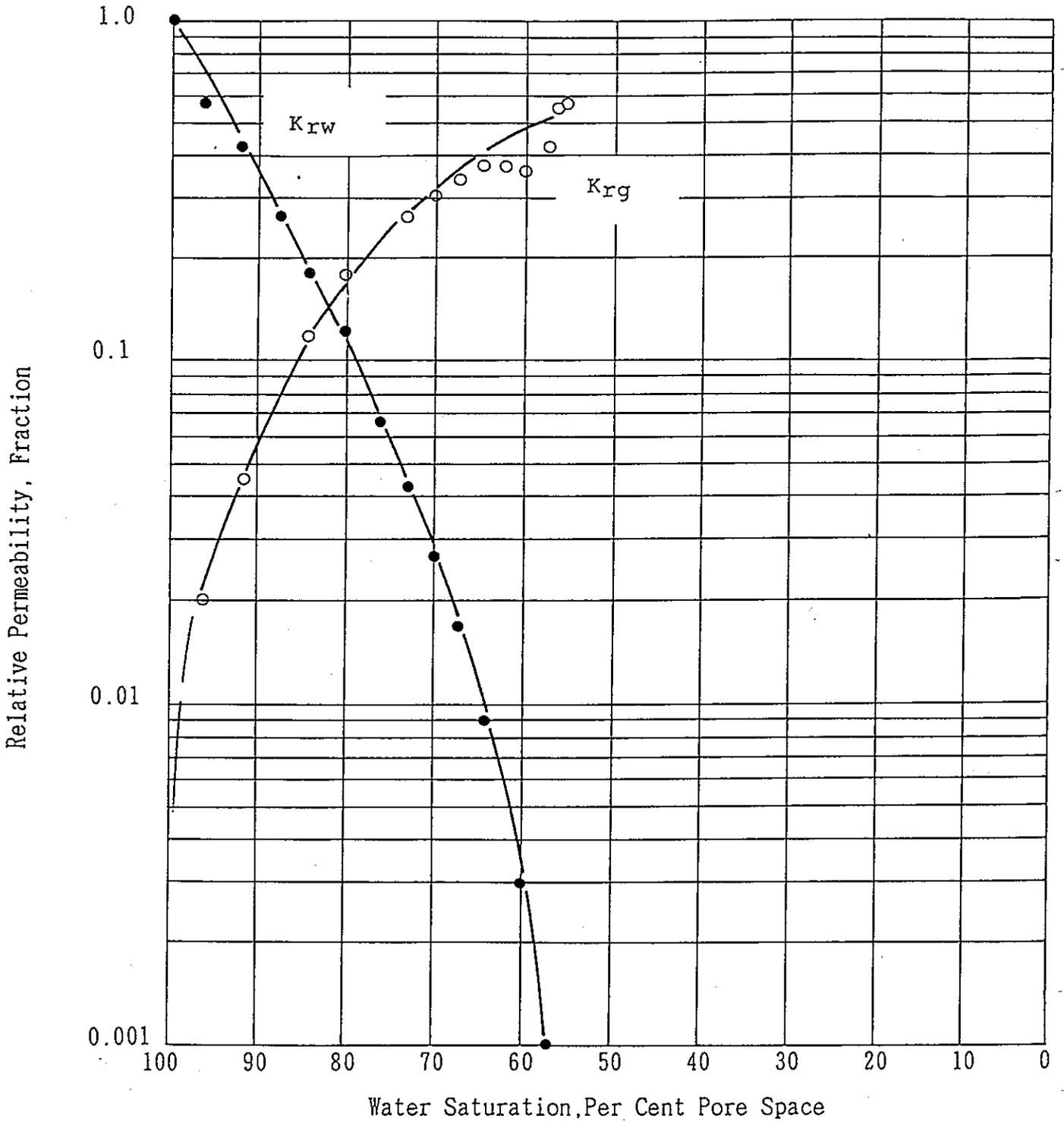


図1.1.1-1 ベレア砂岩の相対透過係数 (1)

RELATIVE PERMEABILITY (gas-oil)

Page _____ of _____

File _____

Well	
Sample No.	M-02
Depth	(m)
Lithology	ベレア砂岩

K(air)	105	md
K(w)	81.3	md
Oil Permeability at Initial Water Saturation	150.0	md
Porosity	18.14	%

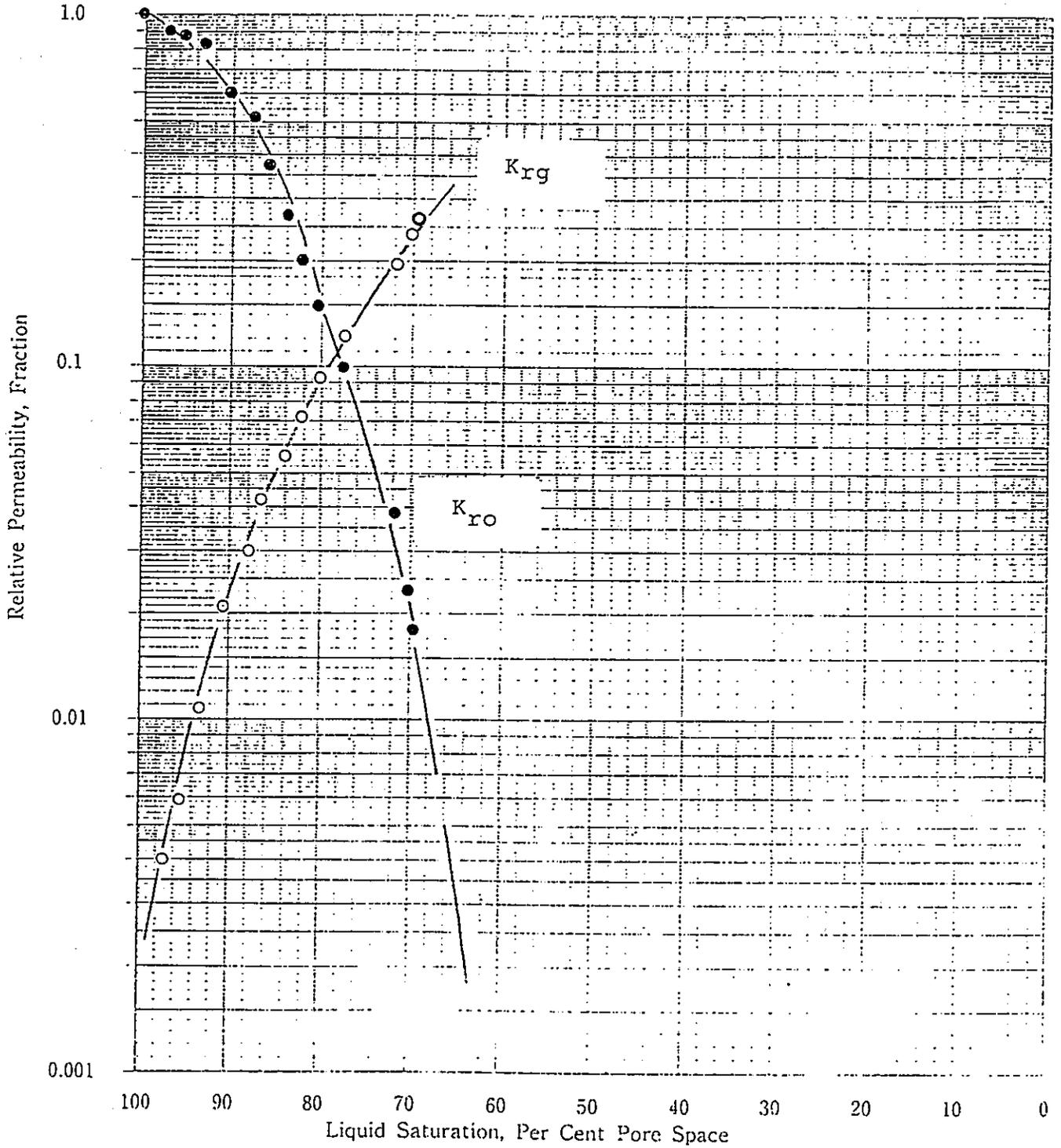


図1.1.1-2 ベレア砂岩の相対透過係数 (2)

(ii) 毛管圧及び関連パラメータ²⁾

(a) 遠心分離法による毛管圧測定結果

ベレア砂岩の遠心分離法による毛管圧測定結果を図1.1.1-3～5に示す。

ここでは間隙率が17.9～18.6%のベレア砂岩試料3種類について毛管圧を測定している。空気による絶対透過係数は間隙率の大きい試料ほど値は高く、 $1.1 \times 10^{-13} \sim 2.3 \times 10^{-13} [\text{m}^2]$ の範囲にある。毛管圧は間隙水の飽和度 (S_w) が減少するにしたがって増加し、 $S_w=25\%$ における毛管圧は間隙率の小さい試料から順に、それぞれ $\geq 1.5 [\text{MPa}]$, $1.0 [\text{MPa}]$, $0.90 [\text{MPa}]$ と、間隙率が大きくなるにしたがって次第に小さくなる傾向にある。同じ地層から算出した間隙構造が相似の関係にあると考えられる試料であるため、このように間隙率の増加が間隙径分布のメジアン値の増加となり、毛管圧の低下に直接反映されているものと思われる。

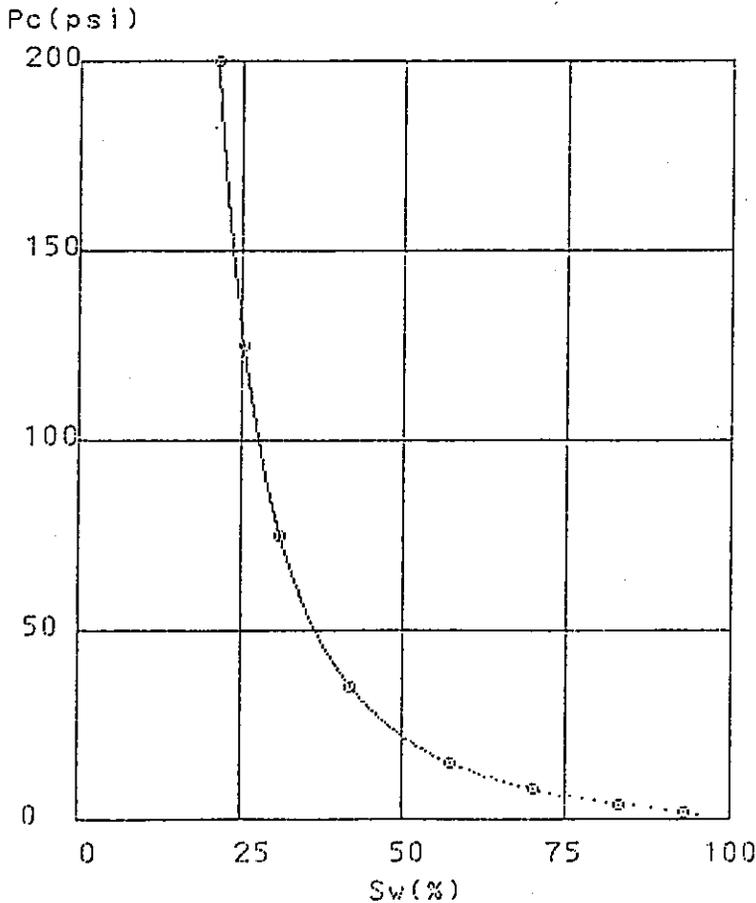
(b) 水銀圧入法による毛管圧測定結果

ベレア砂岩の水銀圧入法による毛管圧測定結果を図1.1.1-6に示す。

ここでは間隙率が17.7%、空気による絶対透過係数が $2.1 \times 10^{-13} [\text{m}^2]$ のベレア砂岩試料について毛管圧を測定している。注入時と排出時で値が異なるが、毛管圧は間隙水の飽和度 (S_w) が減少するにしたがって増加し、 $S_w=25\%$ における毛管圧は注入時で $0.07 [\text{MPa}]$ 、排出時で $0.38 [\text{MPa}]$ となっている。遠心分離法による結果と比較すると、間隙率が1%以下の相違にもかかわらず特に排出時において $1/3 \sim 1/5$ の値と評価されている。

 抗井名 : TRC 飽和体積 (cc) : 8.2454
 試料番号 : V-13 孔隙体積 (cc) : 8.4360
 深度 (m) : 孔隙率 (%) : 18.6
 岩質 : BEREA 粒子密度 (g/cc) : 2.660
 コアの長さ (cm) : 3.990 空気浸透率 (md) : 230
 飽和重量 (g) : 106.2440 塩水比重 (g/cc) : 1.0350
 乾燥重量 (g) : 97.7100 塩分濃度 (ppm) : 20000

No.	RPM	Water	SW	PC	PC*SW
1	500	.5	.93936	1.16098	1.09058
2	800	.8	.902976	2.97211	2.68374
3	1000	1:75	.787761	4.64392	3.6583
4	1500	2.35	.714993	10.4488	7.47084
5	2000	3.7	.551266	18.5757	10.2401
6	3000	4.6	.442114	41.7953	18.4783
7	4000	5.1	.381474	74.3026	28.3445
8	5000	5.75	.302643	116.098	35.1362
9	6000	5.85	.290515	167.181	48.5685
10	7000	5.85	.290515	227.552	66.1072



Pc (psi)	Sw (%)
2	92.9
4	83.4
8	70.1
15	57.4
35	42.0
75	31.0
125	25.3
200	21.2

図1.1.1-3 ベレア砂岩の遠心分離法毛細管圧力測定結果 (1)

 抗井名 : TRC 飽和体積 (cc) : 8.5299
 試料番号 : V-21 孔隙体積 (cc) : 8.7460
 深 度 (m) : 孔隙率 (%) : 18.2
 岩 質 : BEREA 粒子密度 (g/cc) : 2.620
 コアの長さ (cm) : 4.265 空気浸透率 (md) : 220
 飽和重量 (g) : 112.5320 塩水比重 (g/cc) : 1.0530
 乾燥重量 (g) : 103.5500 塩分濃度 (ppm) : 20000

No.	RPM	Water	SW	PC	PC*SW
1	500	.5	.941383	1.21789	1.1465
2	800	.85	.900351	3.1178	2.80711
3	1000	1.75	.79484	4.87156	3.87211
4	1500	2.3	.730361	10.961	8.0055
5	2000	3.75	.560371	19.4863	10.9195
6	3000	4.85	.431413	43.8441	18.9149
7	4000	5.35	.372795	77.9449	29.0575
8	5000	5.75	.325901	121.789	39.6912
9	6000	5.9	.308316	175.376	54.0713
10	7000	6	.296593	238.707	70.7987

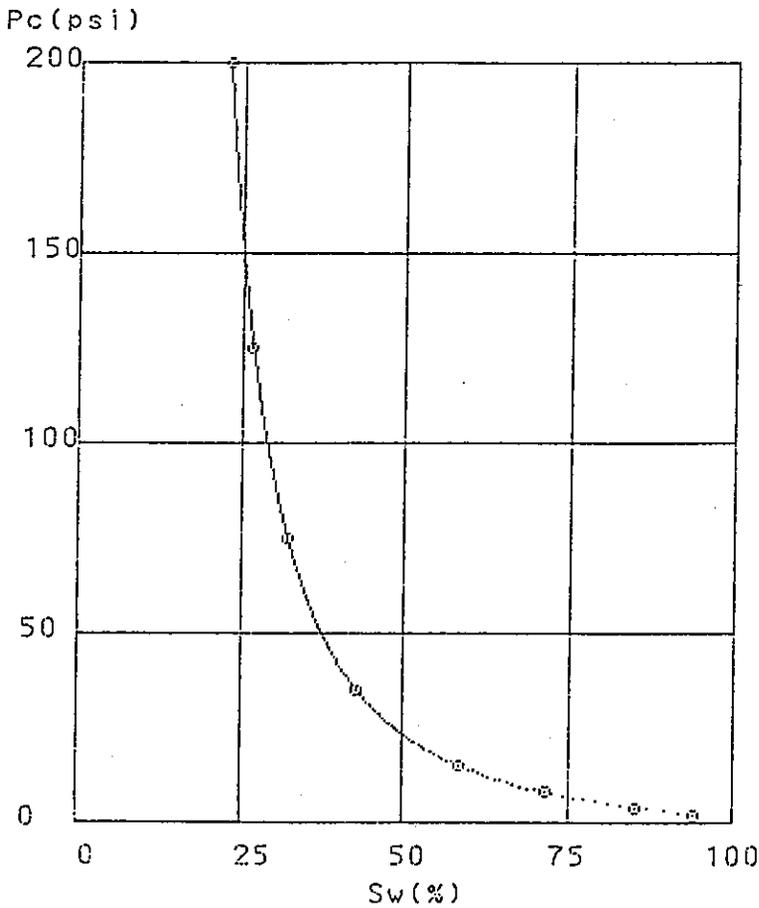


図1.1.1-4 ベレア砂岩の遠心分離法毛細管圧力測定結果 (2)

```

*****
抗井名      : TRC      飽和体積 (cc) : 9.5768
試料番号    : M-03    孔隙体積 (cc) : 9.5500
深 度 (m)  :          孔隙率 (%)    : 17.9
岩 質      : BERA    粒子密度 (g/cc) : 2.680
コアの長さ (cm) : 4.986  空気浸透率 (md) : 110
飽和重量 (g) : 127.2920  塩水比重 (g/cc) : 1.0350
乾燥重量 (g) : 117.3800  塩分濃度 (ppm) : 20000
*****

```

No.	RPM	Water	SW	PC	PC*SW
1	500	.5	.947791	1.35296	1.28232
2	800	1.25	.869476	3.46357	3.01149
3	1000	2	.791162	5.41182	4.28163
4	1500	2.5	.738953	12.1766	8.99794
5	2000	3.9	.592766	21.6473	12.8318
6	3000	5.05	.472685	48.7064	23.0228
7	4000	5.55	.420475	86.5891	36.4086
8	5000	6.2	.352603	135.296	47.7056
9	6000	6.25	.347382	194.825	67.6789
10	7000	6.35	.33694	265.179	89.3496

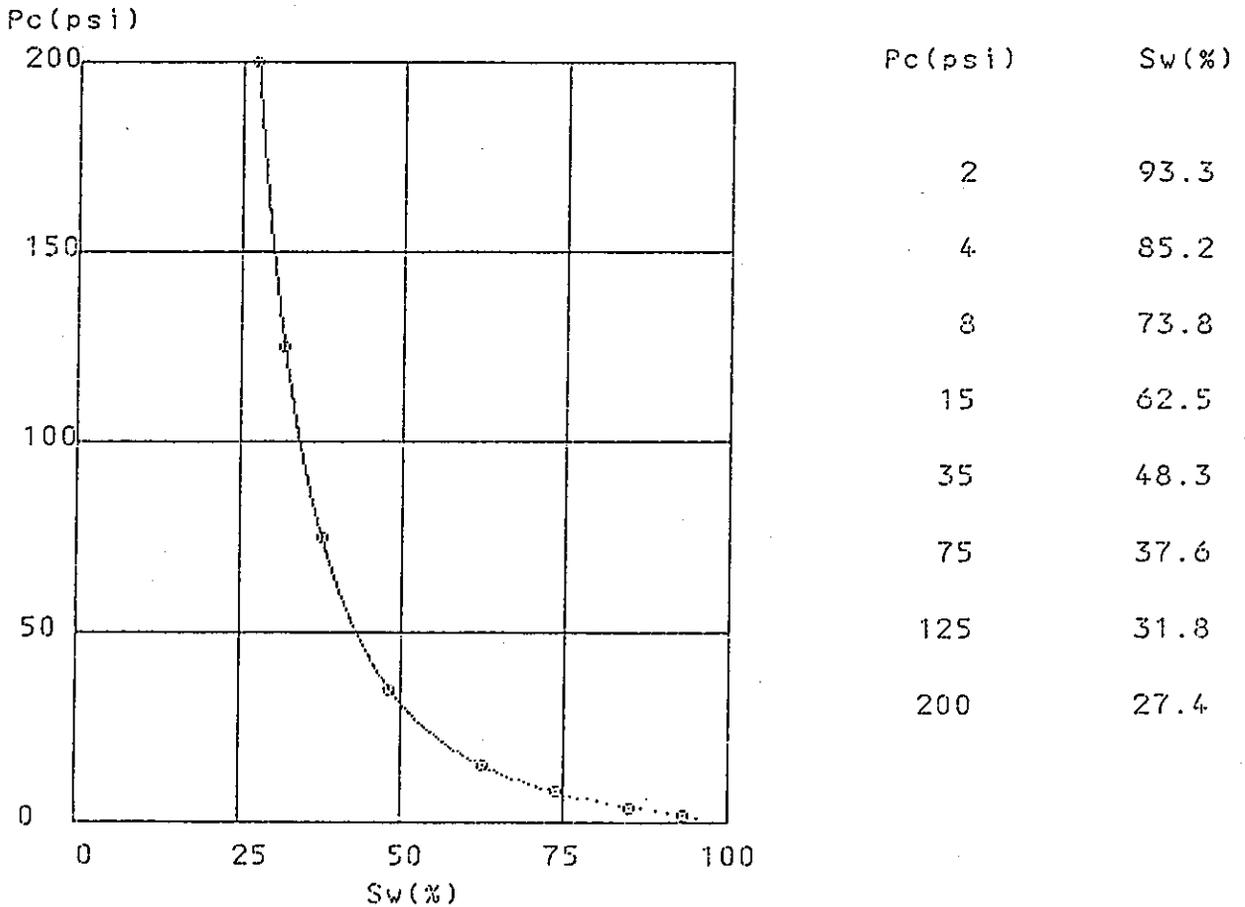


図1.1.1-5 ベレア砂岩の遠心分離法毛細管圧力測定結果 (3)

MERCURY INJECTION CAPILLARY PRESSURE

Sample Number: V-15
 Permiability to Air, md:212.0

Porosity Percentage: 17.7
 Pore Volume, cm³: 13.228

ベレア砂岩

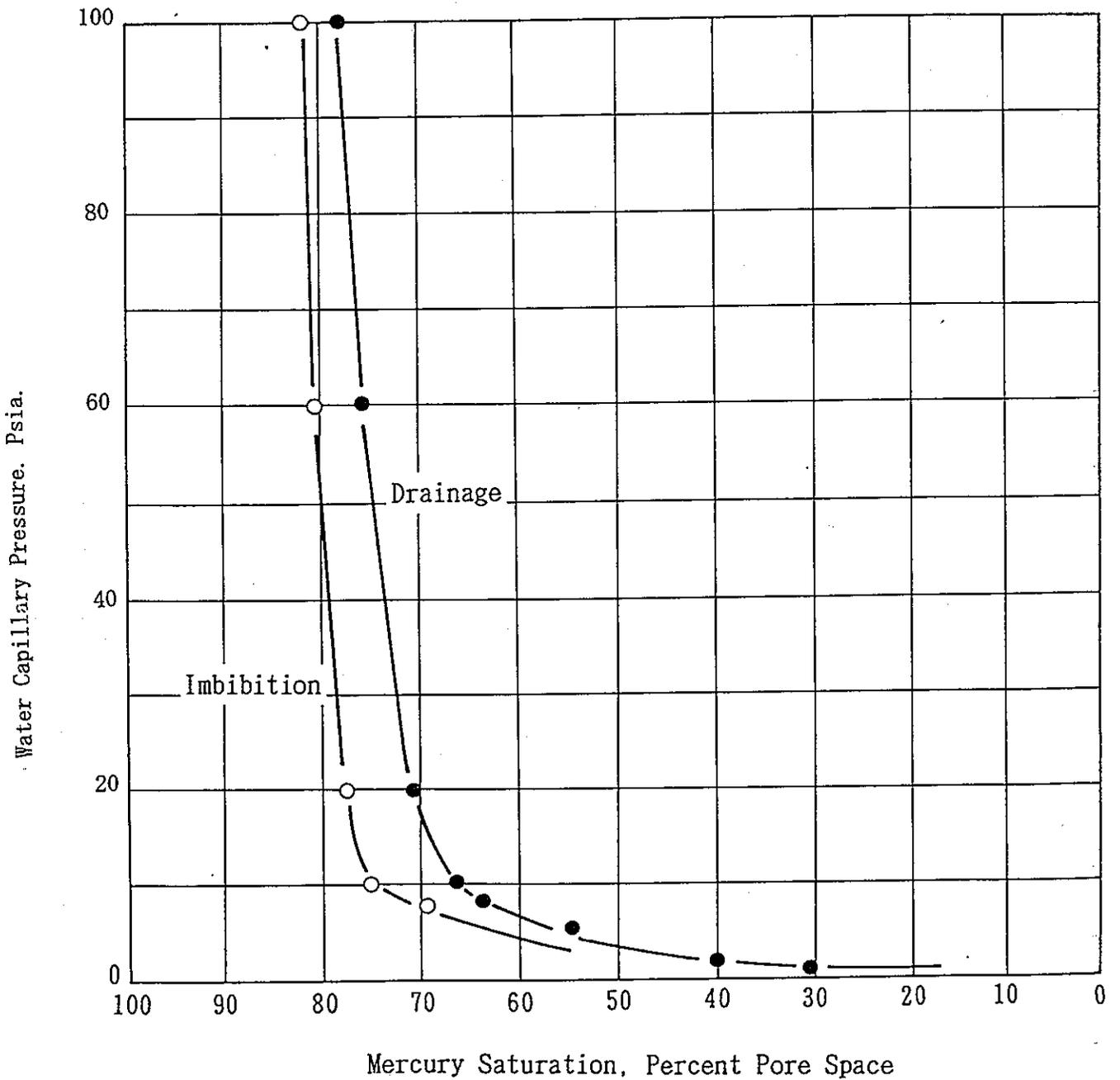


図1.1.1-6 ベレア砂岩の水銀圧入法による毛細管圧力測定結果

(2) 凝灰質砂岩

ペレア砂岩に比較して透過性の小さい凝灰質砂岩について、ガス、オイルに対する2相流データが得られた。透過性は後述するように 2×10^{-15} [m²] (透水係数として 2×10^{-8} [m/s]) と前述のペレア砂岩より1桁以上低い値を有している。この値は昨年度及び本年度の2相流解析で母岩の透過係数に対する設定値の20倍に当たる。

(i) 相対透過係数及び関連パラメータ

測定対象となった凝灰質砂岩は、間隙率が14.5%とペレア砂岩とあまり変わらないにもかかわらず、絶対透過係数は測定に用いた流体の種類により、空気； 2.9×10^{-14} [m²]、水； 2.2×10^{-15} [m²]、オイル； 7.0×10^{-15} [m²] と、小さい値を示す。本試料に対するオイル/水の2相系における相対透過係数の変化を図1.1.1-7に示す。

同一飽和度における相対透過係数はペレア砂岩に比較して空気、オイル共に小さい値を示しており、ガスの残留飽和度が大きくなっている。とくに水の飽和度が大きくなるほど絶対透過係数の差が大きい。これらの相対透過係数評価モデルの相違は、即ち間隙構造の相違を示すものであると考えられる。

(3) 頁岩

ペレア砂岩に比較して間隙率はやや大きい透過性が1/3程度と小さい頁岩について、毛管圧の測定データが得られている。

(i) 毛管圧及び関連パラメータ

(a) 水銀圧入法による毛管圧測定結果

頁岩の水銀圧入法による毛管圧測定結果を図1.1.1-8に示す。

測定対象は間隙率が25.2%、空気による絶対透過係数が 7.0×10^{-14} [m²] の頁岩試料である。注入時と排出時で測定値が異なるが、毛管圧は間隙水の飽和度 (S_w) が減少するにしたがって増加するが、 $S_w=50\%$ において既に毛管圧は注入時で0.69 [MPa]、排出時では2.1 [MPa] に達している。ペレア砂岩に対する測定結果と比較すると、間隙率が1.4倍と大きいにもかかわらず、毛管圧は水銀法同士で比べて、水の飽和度の大きい範囲 (60~80%) で急激に上昇すると評価されている。

これは頁岩の構成粒子は砂岩より小さいことから細孔径分布の平均値がペレア砂岩より小さい値をとるためと考えられる。このような特性を示す岩石はガスの飽和度が小さい範囲から毛管圧が高まるため、ガスが移行しにくく、間隙圧が上昇し易い媒体であると予測される。

RELATIVE PERMEABILITY (gas-oil)

Page _____ of _____

File _____

Well		K(air)	28.7	md
Sample No.	V-17	K(w)	2.22	md
Depth	(m)	Oil Permeability at Initial Water Saturation	6.99	md
Lithology	凝灰質砂岩	Porosity	14.5	%

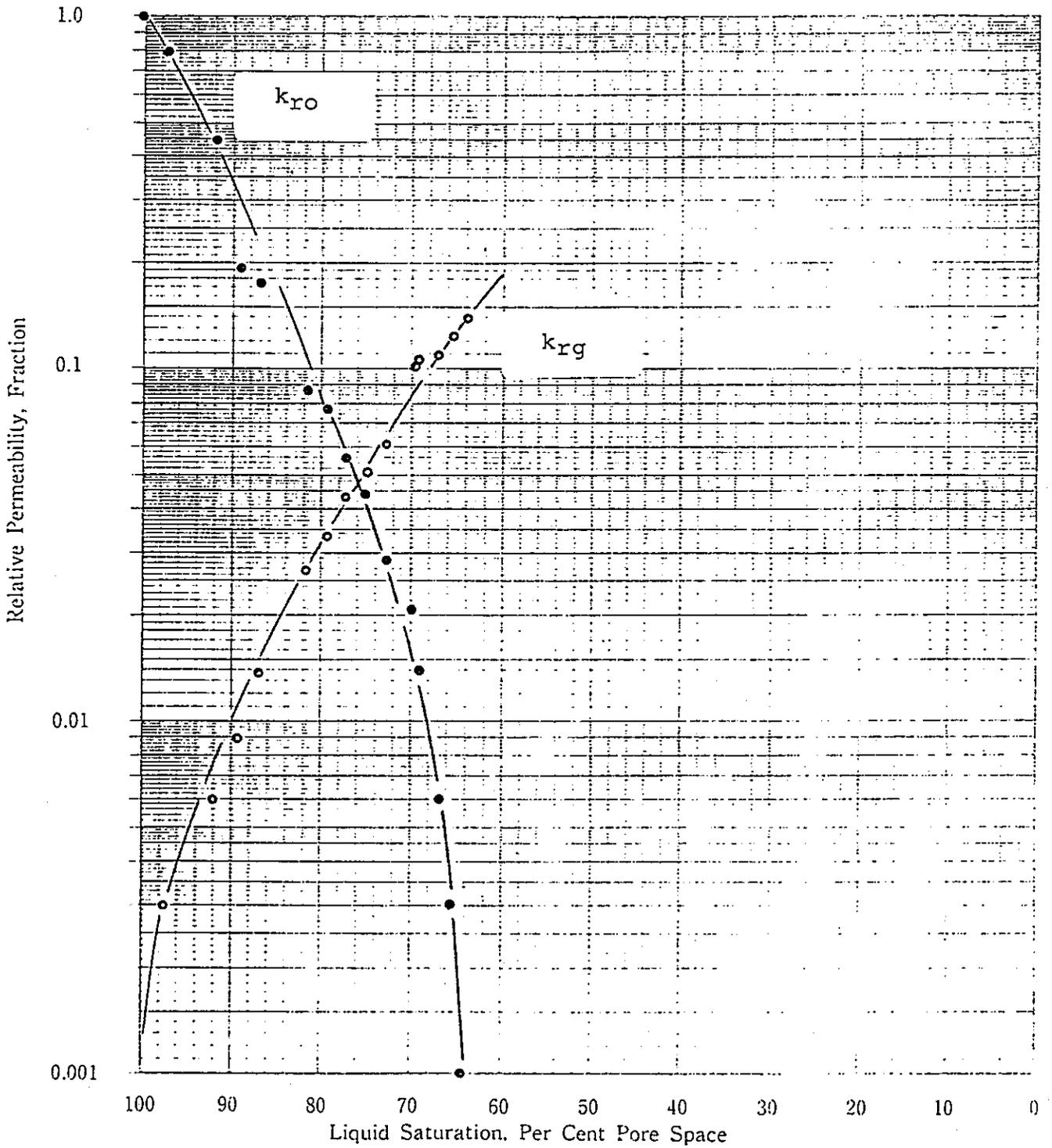


図1.1.1-7 凝灰質砂岩の相对透過係数

MERCURY INJECTION CAPILLARY PRESSURE

Well:
 Sample Number: 2-5
 Permiability to Air, md: 70.0

Depth:
 Porosity Percentage: 25.2
 Pore Volume, cm³: 19.31

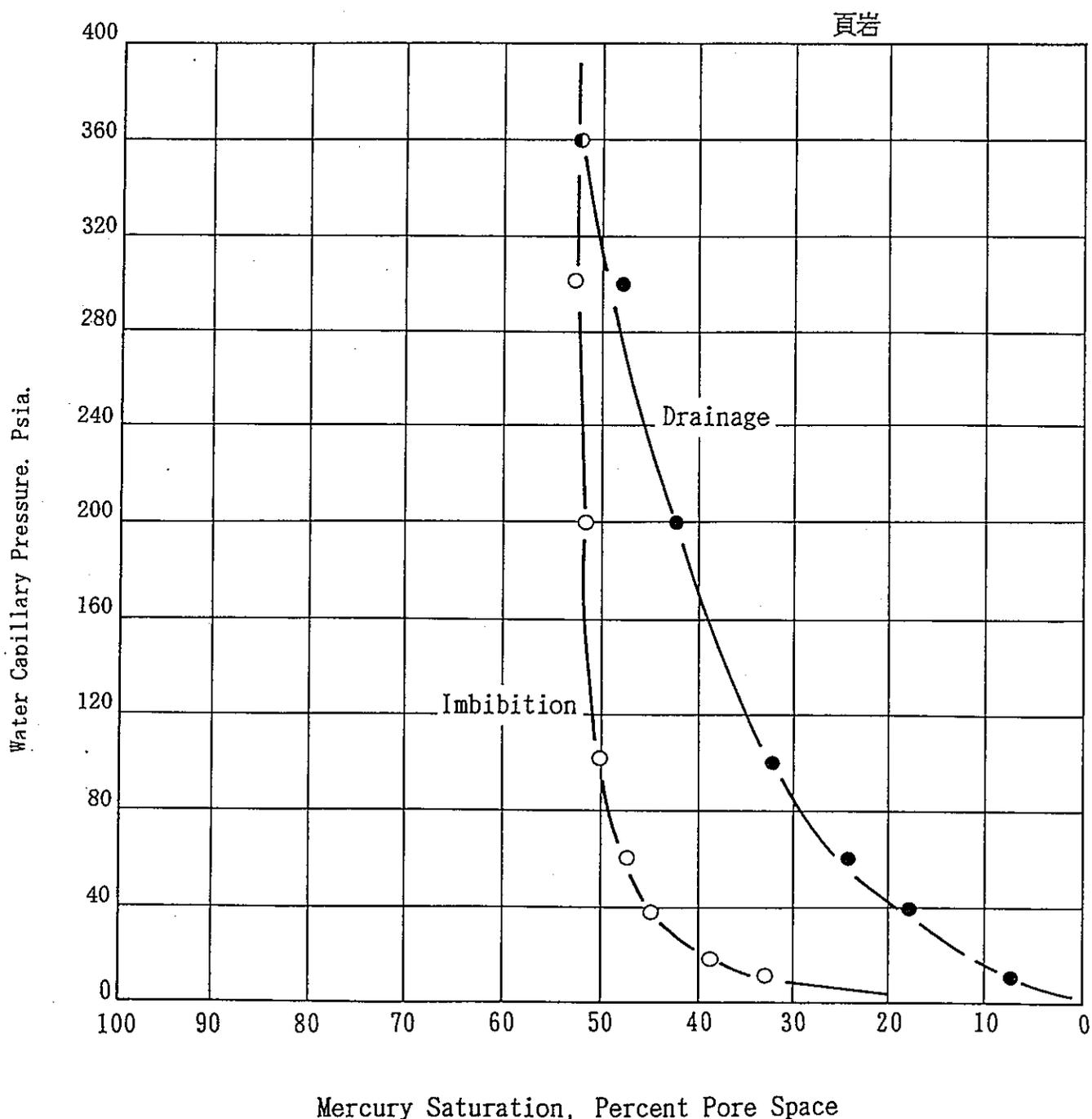


図1.1.1-8 頁岩の水銀圧入法による毛細管圧力測定結果

1.1.2 粘土物質

昨年度の調査では、粘土物質に対する2相流パラメータの取得状況についてはスウェーデン、フランス等において圧密ベントナイト、ベントナイト/砂混合物、及び一部の粘土層について絶対透過係数とガスのブレイクスルー圧力が限られた条件下で測定されているのみであり、相対透過係数及び毛管圧の間隙水飽和度による変化については全くデータが取得されていないとの結果が得られた³⁾。

近年我が国においても低レベル放射性廃棄物の浅地中埋設に対する安全評価の必要性から、砂/ベントナイト混合系でのガス透過性に対するデータが取得され、一部が公表され始めている。以下では最近数年間に公表された2相流評価関連データを示す。

(1) 砂/ベントナイト混合系

穂刈ら⁴⁾はクニゲルV1と豊浦標準砂の混合系に対して評価を行っている。非拘束系及び3軸拘束系においてHe及び水を用いた絶対透過係数、ガス透過のブレイクスルー圧のデータを得ており、我が国において公表された砂/ベントナイト混合系での透過特性データとしては画期的である。しかしながら、2相流を評価する上での重要なパラメータである間隙中の水/ガスの飽和度の評価、及び透過係数との関連付けがなされていないため、本研究で実施する解析に適用するには不十分なデータとなってしまう。また、毛管圧についての評価もなされていない。

非拘束系での透過係数想定装置概念を図1.1.2-1に示す。

透過性試験はHe、水双方とも定圧法によって行われ、流出した水、あるいはガスの流量を測定して透過係数を算出している。なお、測定に供された試料は豊浦標準砂/クニゲルV1=85/15(wt%)、最大乾燥密度 1.683×10^3 [kg/m³]である。

透気及び透水の繰り返し試験による実効印加圧力と透過係数を表1.1.2-1に示す。

表1.1.2-1に示す試験結果から以下の傾向を読み取ることができる。

- ・ガスによって測定されたブレイクスルー前後での透過係数は大きく異なり、ブレイクスルー前の透過係数はブレイクスルー後の値に比較して2桁以上小さい。

これはブレイクスルー前の透過係数は所謂ガス押しによる相対透過係数の測定過程と同様であり、実質的に不飽和状態での水の移行を測定したものと考えられる。ブレイクスルー前ではガスに置換されて押出された水量をガス流量と見なして算出したものと思われ、水はHeの50倍の粘度であることを考えれば透過係数は 1×10^{-17} [m²]の桁となり透水係数と一致する。

- ・ガスによって測定された透過係数は、圧入圧力の増加により増加する傾向にある。

このことは、ガス圧入圧力の増加によって湿潤ベントナイトゲルの密度の低い部分から連続した気泡が生成し、間隙構造が変化している可能性が示されている。

水によって測定された透過係数は、ガス透過後若干低下する傾向にあるが、桁が変わるほどの変化はない。

水で飽和させた試料も一旦ガスが浸入、透過した後は不飽和状態となり、その後の透水係数の測定は水押しでの相対透過係数の測定と同様の状態と考えられ不飽和状態での値であるため、透水係数が低く評価されたものと考えられる。

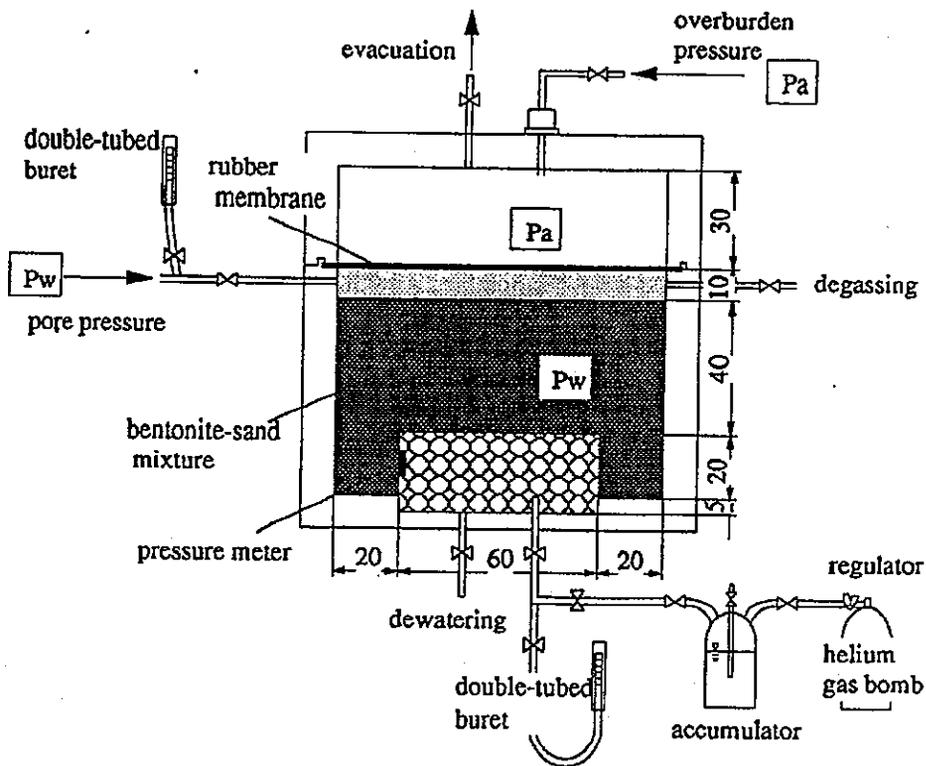


図1.1.2-1 透過性試験装置概念図

表1.1.2-1 3軸拘束による透過係数試験結果

測定流体	実効圧入圧力[MPa]	透過係数[m ²]	備考
H ₂ O	0.01, 0.02, 0.03	6.0×10 ⁻¹⁷	透気前の透水試験
He	0.03	2.7×10 ⁻¹⁹	
	0.04	2.6×10 ⁻¹⁹	
	0.05	1.7×10 ⁻¹⁹	
	0.06	2.1×10 ⁻¹⁹	
	0.07	—	
	0.08	1.8×10 ⁻¹⁷	
	0.09	4.5×10 ⁻¹⁷	ブレイクスルーを観測
	0.10	5.6×10 ⁻¹⁶	
H ₂ O	0.01, 0.02, 0.03	6.0×10 ⁻¹⁷	0.10 [MPa] 透気後の透水試験
He	0.15	2.0×10 ⁻¹⁶	
H ₂ O	0.01, 0.02, 0.03	6.0×10 ⁻¹⁷	0.15 [MPa] 透気後の透水試験
He	0.20	2.3×10 ⁻¹⁶	
H ₂ O	0.01, 0.02, 0.03	6.0×10 ⁻¹⁷	0.20 [MPa] 透気後の透水試験
He	0.29	7.1×10 ⁻¹⁶	
H ₂ O	0.01, 0.02, 0.03	6.0×10 ⁻¹⁷	0.29 [MPa] 透気後の透水試験
He	0.49	7.8×10 ⁻¹⁶	
H ₂ O	0.01, 0.02, 0.03	6.0×10 ⁻¹⁷	0.49 [MPa] 透気後の透水試験

1.1.3 セメント/コンクリート

平成5年度の調査では、セメント/コンクリートの2相流パラメータについては、特にスイスにおいて積極的にデータの取得がなされているほか、イギリスにおいても処分場からのガスの移行の評価が詳細に行われ、セメント/コンクリートの透過性データの取得が行われていることが明らかになった。

近年我が国においても処分場に蓄積するガスによる影響評価のため、幅広い透過性のセメント/コンクリートについて特性評価が実施されてきており、ここでは高透過性モルタルを含めたモルタルの特性試験結果を示す。

(1) モルタルの特性

入矢ら⁵⁾はコンクリートにおいてその透過性を決定するセメントモルタルの特性について各種間隙率の試料に対して、乾燥させた材料、水で飽和させた材料の透過係数、ブレイクスルー圧等に対する測定試験を実施している。

透過係数想定装置概念を図1.1.3-1に示す。

透過性試験はHe、及び水押しによる測定双方とも定圧法によって行われ、流出した水、あるいはガスの流量を測定して透過係数を算出している。

測定対象としたモルタルの混合物組成を表1.1.3-1に示す。

表1.1.3-1 モルタルの組成

w/c	s/c	c	w	s
0.6	2.7	498	299	1345
[-]		[kg/m ³]		

ガスによって測定された透過係数、ガスの圧入圧力と飽和度の関係、及びモルタルの間隙率とガスの透過係数との関係を図1.1.3-2に示す。

図1.1.3-2に示す試験結果から以下の傾向を読み取ることができる。

- ・水飽和の状態からガスが透過する最小の圧力（しきい値、ブレイクスルー圧等）は0.1MPaであった。
- ・ガスの透過係数は圧入圧力が大きくなるほど高くなる。
- ・ガスの圧入圧力を高くするほどガス透過後の試験片の間隙水飽和度は減少する。
- ・モルタルの間隙率が大きくなるほどガスの透過性は高まる傾向にある。また間隙率の大きいモルタルほど印加圧の増加による透過係数の増加も大きい。

以上の現象は水で飽和したモルタル中の間隙は、その細孔径に対応する毛管圧以上の圧力のガスによって置換されることにより、圧入圧力の増加にしたがってガスの飽和度が増加し、ガスの透過係数が上昇すると説明できる。また、間隙率の大きいモルタルは発泡剤を用いて気泡を連行させているこ

とから、細孔径分布が大きい方にシフトしていると考えられ、このためより低い圧入圧力でガスの透過係数が上昇するものと考えることができる。

(2) コンクリートの特性

入谷らは同様に表1.1.3-2に示す混合比のコンクリートに対して透過係数の測定を行っており、その結果を以下に示す。

水の絶対透過係数	$4.15 \times 10^{-19} \text{ [m}^2\text{]}$
ガス(He)の絶対透過係数	$6.80 \times 10^{-17} \text{ [m}^2\text{]}$
しきい圧	0.7MPa
S_1 0.98の相対透過係数	9.6×10^{-3}

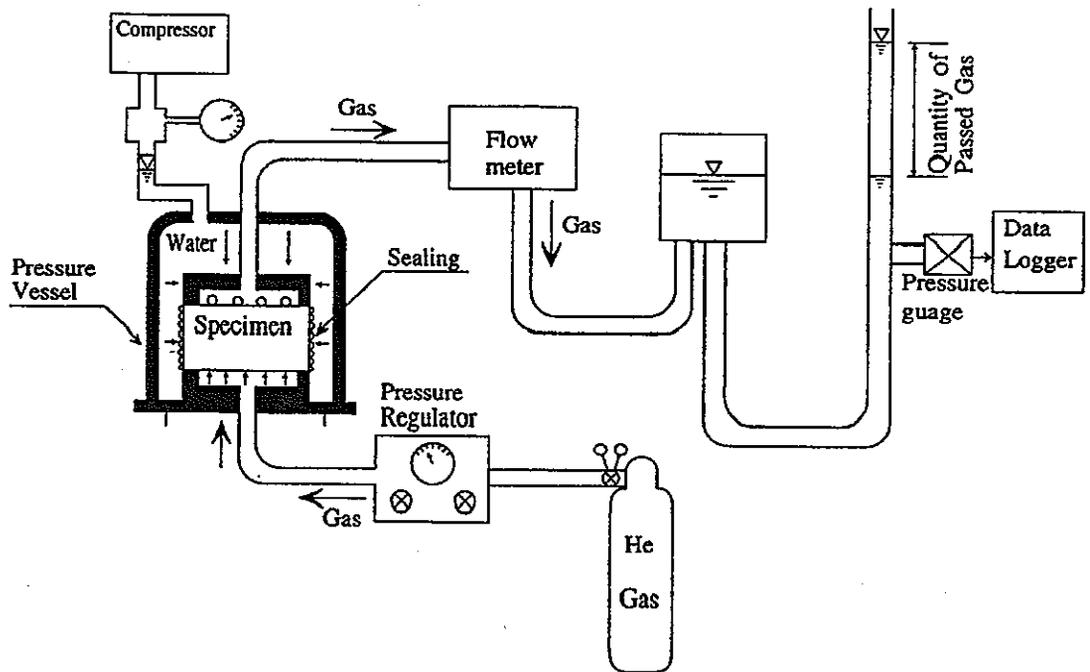
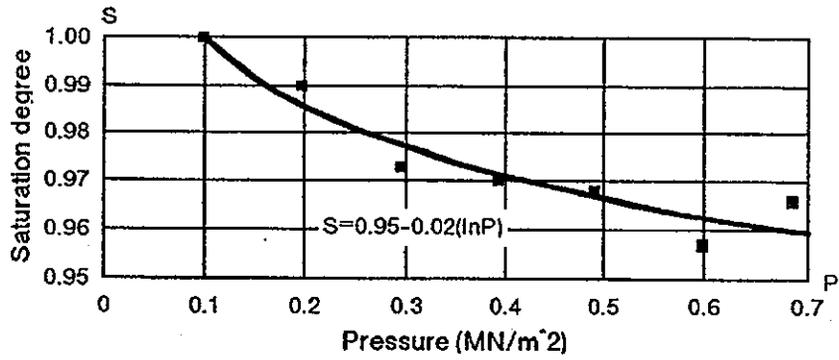
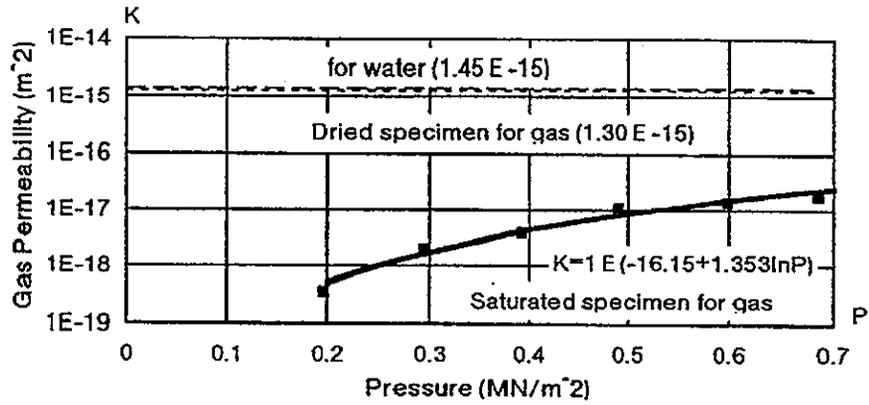


図1.1.3-1 コンクリート透過性試験装置概念図

表1.1.3-2 コンクリート組成

w/c [%]	s/a [%]	[kg/m ³]						
		水	セメント	高炉スラグ*	膨張剤	細骨材	粗骨材	混和材
55.0	47.0	15.3	126	153	30	891	1023	0.66

この値は昨年度調査を行ったNAGRAの測定値⁶⁾と比較して、ガス/水の絶対透過係数ともに1/2程度であり、AEAの測定値⁷⁾ $10^{-21} \sim 10^{-16} \text{ [m}^2\text{]}$ の範囲内にある。またガス透過のしきい圧はNAGRAの測定値0.1MPaに比較して大きく、ガスの透過しにくい特性を示している。



(飽和条件下における測定結果)

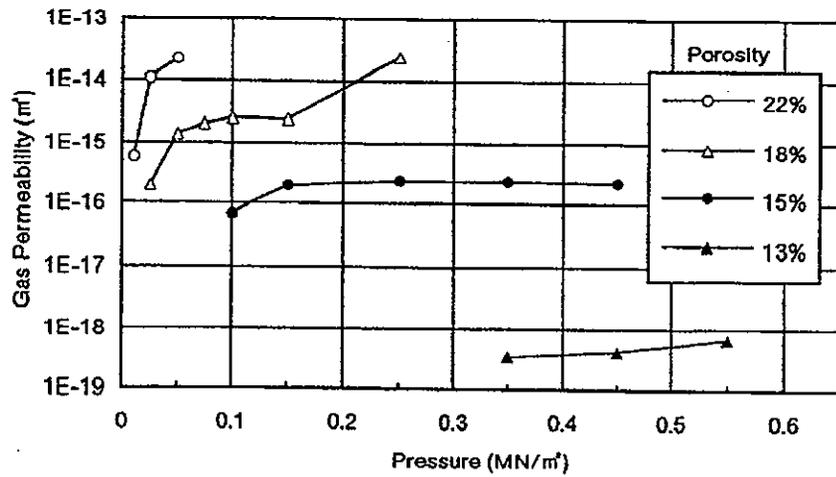


図1.1.3-2 モルタルのガスによる透過性試験結果

1.2 パラメータ値の検討

本節では処分場及びその周辺に対する2相流解析を実施するに当たり、各バリア材に対する2相流パラメータ値とその変動範囲を把握するため、昨年度の調査結果と合わせて各バリア候補物質に対する特性値を整理した。結果を表1.2-1～3に示す。

各バリア材に対するデータ取得状況を以下に簡潔に述べるが、TRU廃棄物の処分に適用される岩種、人工バリア材料に対しては、セメント/コンクリートを除き2相流パラメータの取得、及びその関数モデル化はほとんど行われていない。

また、セメント/コンクリートにおいても測定例は限られた組成に対して、限られた条件下のデータであり、特定組成の材料に対してデータのばらつきを把握できるほどのデータ量は存在しない。したがって今後天然バリア、人工バリア候補材に対して、相対透過係数、毛管圧の測定、評価とモデル化を精力的に実施し、データの蓄積を図る必要がある。

(a) 母岩

石油/ガス資源開発分野で相対透過係数と間隙水飽和度との関係を測定した例は比較的豊富に存在するが、表1.2-1に示すように、低透水性岩盤でのデータ、及び相対透過係数に対する関数モデルの適用について検討した例は少ない。また、残留飽和度等の関連パラメータの測定例も少ない。

毛管圧と間隙水飽和度との関係について測定した例は油層岩盤については比較的豊富に存在するが、一部、Leverett model, Brooks and Corey modelによるフィッティングを試みた例がある程度である。

(c) 緩衝材

ベントナイト系材料、及びベントナイト/砂混合材に対する2相流パラメータの取得例は非常に少ないと言える。不飽和状態での透過試験、測定技術、及び間隙率、飽和度の評価手法に対して検討、確認すべき事項も残されており、データ取得は今後の課題である。

(d) 構造物、充填材

セメント/コンクリートに対しては、特定組成のコンクリートに対して2相流パラメータの評価と2相流解析モデルの検証が行われた例があり、また、気液の透過特性に対してもデータは比較的多い。しかしながら、不飽和時の特に水の透過特性、毛管圧のより直接的な測定手法によるデータの取得、さらに劣化時、亀裂発生時のデータ取得など多くの課題が残されている。

表1.2-1 母岩の特性値

(1/2)

岩種	真密度 [Kg/m ³]	間隙率 [-]	絶対透過係数 [m ²]	相対透過係数 評価関数	毛管圧 評価関数	係数	備考
砂岩	2.6×10 ³ ~2.80×10 ³	0.2 ~0.3	1.0×10 ⁻¹³ ~1.0×10 ⁻¹²		Leverett		測定値 ¹⁾
砂岩 (北海油田)			1.0×10 ⁻¹⁴ ~1.0×10 ⁻¹²		Leverett	S _{lr} ; 0.06~0.3	測定値 ¹⁾
白雲石		0.118	1.0×10 ⁻¹⁴ ~1.0×10 ⁻¹³				測定値 ²⁾ K _g
白雲石 /堆積物		0.003	1.0×10 ⁻²¹ ~1.0×10 ⁻¹⁶			Pe; 0.3×10 ⁶ [Pa] ~0.7×10 ⁶ [Pa]	測定値 ⁷⁾
堆積岩		0.1 ~0.2	1.0×10 ⁻¹⁵ ~1.0×10 ⁻¹³				測定値 ³⁾
凝灰岩 Yucca Mt.			1.0×10 ⁻¹² ~1.0×10 ⁻¹¹				測定値 ⁴⁾
泥灰岩		0.02 ~0.04	1.0×10 ⁻¹⁷ ~1.0×10 ⁻¹⁵	Capillary bundle model	Pore size distribution		測定値 ⁶⁾
石灰岩		0.02 ~0.04	1.0×10 ⁻¹⁶ ~1.0×10 ⁻¹⁴	Capillary bundle model	Pore size distribution		測定値 ⁶⁾
頁岩		0.03 0.05	1.0×10 ⁻²¹ 1.0×10 ⁻¹⁸ ~1.0×10 ⁻¹⁶			Pe; 5.5×10 ⁶ [Pa] ~7.1×10 ⁶ [Pa] Pe; 1.0×10 ⁶ [Pa] Pe; 5.0×10 ⁴ [Pa]	測定値 ⁷⁾
シルト岩 /粘土岩	2.79×10 ³	0.021	1.0×10 ⁻¹⁷				測定値 ⁷⁾
粘土岩 /石灰岩	2.76×10 ³	0.09	1.0×10 ⁻¹⁸				測定値 ⁷⁾
炭層		0.027 ~0.036	1.0×10 ⁻¹⁶	Brooks and Corey	Brooks and Corey	S _{lr} ; 0.02~0.14 Pe; 5.9×10 ³ [Pa] λ =0.36~0.87	測定値 ⁵⁾
硬岩		0.001	1.0×10 ⁻¹⁷ ~1.0×10 ⁻¹⁶				測定値 ³⁾
砂岩 (ベレア)	2.6~ 2.7×10 ³	0.18	K _g ;1.0~ 2.2×10 ⁻¹³ K _g ;8.0~ 23.0×10 ⁻¹⁴	K _r vs. S _w		P _o vs. S _w S _{lr} ;0.55	測定値 ⁸⁾

表1.2-1 母岩の特性値

(2/2)

岩種	真密度 [kg/m ³]	間隙率 [-]	絶対透過係数 [m ²]	相対透過係数 評価関数	毛管圧 評価関数	係数	備考
凝灰質砂岩		0.15	K _i ; 2.9×10 ⁻¹⁴ K _g ; 2.2×10 ⁻¹⁵	K _r vs. S _w		P _c vs. S _w S _{lr} ; 0.64	測定値 ⁸⁾
頁岩		0.25	K _g ; 7.0×10 ⁻¹⁴			P _c vs. S _w	測定値 ⁸⁾
堆積岩系		0.01	1.0×10 ⁻¹⁷	Grant, Corey	Narashimhan	S _{lr} ; 0.25 S _{sr} ; 0 S _{lr} ; 0.2 (P _{cap}) P _e ; 0[Pa], 5.0×10 ⁴ [Pa] γ = 1.0	設定値 ⁹⁾
泥灰岩		0.03	1.0×10 ⁻¹⁷	Corey		S _{lr} ; 0.3 S _{sr} ; 0.05	設定値 ¹⁰⁾
岩塩 WIPP		0.01	1.0×10 ⁻²² ~ 1.0×10 ⁻²⁰	Brooks and Corey	Brooks and Corey Sandia	S _{lr} ; 0.2 S _{sr} ; 0.2 P ₀ ; 2.3×10 ⁷ [Pa] γ = 0.7	設定値 ¹¹⁾

表1.2-2 緩衝材，粘土物質の特性値

岩種	乾燥密度 [kg/m ³]	間隙率 [-]	絶対透過係数 [m ²]	相対透過係数 評価関数	毛管圧 評価関数	係数	備考
ベントナイト	1.80×10 ³ 1.35×10 ³ 0.90×10 ³	0.13 0.35 0.57	1.0×10 ⁻²¹ ~1.0×10 ⁻²⁰ 1.0×10 ⁻²⁰ ~1.0×10 ⁻¹⁹ 1.0×10 ⁻²⁰ ~1.0×10 ⁻¹⁸			Pe; ~2.1×10 ⁷ [Pa] Pe; ~1.6×10 ⁶ [Pa] Pe; ~6.0×10 ⁴ [Pa]	測定値 ¹²⁾
ベントナイト 50/50砂 ベントナイト 20/80砂			1.0×10 ⁻¹⁹ ~1.0×10 ⁻¹⁸ 1.0×10 ⁻¹⁸ ~1.0×10 ⁻¹⁷			Pe; 5.0×10 ⁵ [Pa] ~1.5×10 ⁶ [Pa] Pe; 1.0×10 ⁵ [Pa] ~3.0×10 ⁵ [Pa]	設定値 ¹³⁾
ベントナイト ベントナイト 10/90砂	1.80×10 ³ 1.60×10 ³ 2.35×10 ³ ~2.20×10 ³		1.0×10 ⁻¹⁸ 1.0×10 ⁻¹⁷ 1.0×10 ⁻¹⁷ ~3.0×10 ⁻¹⁷				測定値 ¹⁴⁾
ベントナイト 50/50砂 ベントナイト 30/70砂	1.88×10 ³ 1.95×10 ³		~4.0×10 ⁻²¹ 1.0×10 ⁻¹⁸ ~3.0×10 ⁻¹⁷			Pe; 5.0×10 ⁵ [Pa] ~1.5×10 ⁶ [Pa]	^{15,16)} 測定値
London Clay			1.0×10 ⁻¹⁸ ~1.0×10 ⁻¹⁶				測定値 ¹⁷⁾
粘土		0.20	1.0×10 ⁻¹⁹ ~1.0×10 ⁻¹⁸				測定値 ³⁾
粘土		0.15	1.0×10 ⁻¹⁶	Corey	Leverett	S _{gr} ; 0.10 S _{gr} ; 0.0 Pt; 3.5×10 ⁶ [Pa]	設定値 ¹⁸⁾
粘土 Boom Clay				K _i vs. S _w	P _e vs. K		測定値 ¹⁹⁾
ベントナイト 85/15砂	1.68×10 ³		K _i ; 6.0×10 ⁻¹⁷ K _g ; 2.0~ 7.8×10 ⁻¹⁶			Pe; 7.0~ 9.0×10 ⁴ [Pa]	測定値 ²⁰⁾

表1.2-3 セメント、コンクリートの特性値

岩種	真密度 [kg/m ³]	間隙率 [-]	絶対透過係数 [m ²]	相対透過係数 評価関数	毛管圧 評価関数	係数	備考
コンクリート		0.13	K _g ; 1.0×10 ⁻¹⁶ K _i ; 1.0×10 ⁻¹⁸	Corey	Narasimhan	S _{ir} ; 0.3 S _{sr} ; 0.18 P _e ; 1.0×10 ⁵ [Pa] P ₀ ; 1.2×10 ⁶ [Pa] η = 1.3	測定値 ²¹⁾
コンクリート		0.107 0.244	1.0×10 ⁻²⁰ ~1.0×10 ⁻¹⁴			P _c ; 5.0×10 ⁵ [Pa] ~1.0×10 ⁷ [Pa]	測定値 ²²⁾
モルタル/ コンクリート			1.0×10 ⁻²¹ ~1.0×10 ⁻¹⁴		P _c vs. K	P _c ; 1.0×10 ⁵ [Pa] ~1.5×10 ⁶ [Pa]	測定値 ²³⁾
モルタル/ コンクリート SRPC PFA-OPC BFS-OPC PFA-OPC	2.48×10 ³ 2.43×10 ³ 1.89×10 ³	0.13 0.12 0.3~0.4	2.0×10 ⁻¹⁷ 1.0×10 ⁻²¹ ~1.0×10 ⁻¹⁷ 1.0×10 ⁻²¹ ~1.0×10 ⁻¹⁶ 1.0×10 ⁻²⁰ ~1.0×10 ⁻¹⁶ 1.0×10 ⁻¹⁵ ~1.0×10 ⁻¹⁴				測定値 ²⁴⁾ 鉄筋 打継ぎ
モルタル		0.13 ~0.22	K _i ; 1.5×10 ⁻¹⁵ K _g ; 1.3×10 ⁻¹⁵	K _g vs. P S _w vs. P		P _c ; 1.0×10 ⁵ [Pa]	測定値 ²⁵⁾
コンクリート		0.085	K _i ; 4.2×10 ⁻¹⁹ K _g ; 6.8×10 ⁻¹⁷			P _c ; 7.0×10 ⁵ [Pa]	測定値 ²⁵⁾

1.3 まとめと今後の課題

上述のように各種バリア構成物質に対する2相流パラメータの取得状況は、性能評価を行う上で決して満足すべきものではない。天然バリアについては、低透水性の処分に適した岩盤のデータはほとんど取得されていないばかりでなく、亀裂性岩盤に対する2相流の評価手法については、さらに今後モデルの検証が必要な分野である。また、人工バリアについても比較的多くの測定、評価例の報告されているコンクリートについても、測定対象となったコンクリートのセメント種、材料の混合比などは限られた範囲に止まるほか、打継ぎ目、ひびわれ等の影響については評価例が極めて少ない。ベントナイト系充填材についてはさらにデータが不足する。これまで測定されたデータは純ベントナイト材料に対する、飽和時の透過特性に限定される。また、ベントナイト/砂混合系については、近年低レベル廃棄物処分の安全評価への対応のためデータの取得が開始されてはいるものの、その例は未公開の部分が多く、また砂の特性によって2相流特性も影響を受けることが予測される。このため、各バリア材料について、今後さらに広範なデータの集収状況を調査する必要がある。

第 2 章

2. バリア構成物質に対する不飽和透過性試験

平成5年度は、ガス及び水の相対透過係数と間隙中の水の飽和度との関係など、2相流によるガス／水の移行を評価する際に必要となる各種パラメータについて、これまでの試験、評価について予備的な調査を行った。その結果、本研究での2相流解析評価に必要な低透水性の岩盤、粘土層等に対する特性データはこれまでほとんど収集されていないことが明かになったのは先に述べた通りである。したがって、本年度はこれまで石油開発分野等の資源、地熱関連分野で採用されている手法を調査し、既存の測定技術を用いて地層物質、セメント／コンクリート系材料、粘土物質の2相流パラメータの測定、評価に着手するものとした。

2.1 測定、評価手法の検討

ここでは石油の貯溜層の多相流解析、帽岩の特性評価に用いられる、孔げき率（間隙率）、相対浸透率（相対透過係数）、毛細管圧力（毛管圧）等の測定方法について調査を行った。また、今後特性試験を実施するうえでの参考になると考えられるところから、併せて油層評価におけるコア試験実施時の留意事項についても調査した。これらの油層に対するコア試験についての情報は、石油公団石油開発技術センターの油層研究室で要領よく取りまとめられた資料¹⁾があり、ここではそれを中心に引用した。

2.1.1 油層評価におけるコア試験の概要

石油資源分野においては石油の貯溜層について、流体の置換挙動の評価、坑井能力、油層容積の予測等の手段としてコア試験が重要な役割をはたす。したがって、コアの採取、試料の調整、処理については慎重な取り扱いが要求される場合があるとしている。

(1) コア試験に対する影響因子

コア試験では間隙率、液体飽和度、透過係数、あるいは相対透過係数、毛管圧等の測定、評価を行うが、この際これらの特性評価に最も影響の大きい因子として粘土鉱物の影響があげられている。

また、コア試験法では間隙率、透過係数、電気的特性等の岩石の濡れ性に影響されず、比較的迅速かつ低コストで実施できる試験を「通常（一般）コア試験」、一方相対透過係数、毛管圧等のコアの濡れ性が結果を大きく左右する「特殊コア試験」として区別している。これらに対するフローシートを図2.1.1-1～2に示した。ここで特殊コア試験の測定対象のとして含まれる諸特性は、測定に際してコアの濡れ性をできるだけ地層の状態（本研究の場合は処分場内での状態）に保つ、または近付けることが重要とされている。以下にこれらに関する留意点、対策を述べる。

(i) 粘土鉱物の影響

粘土鉱物がコア試験に及ぼす影響は、以下の一次的影響と二次的影響に大別できる。

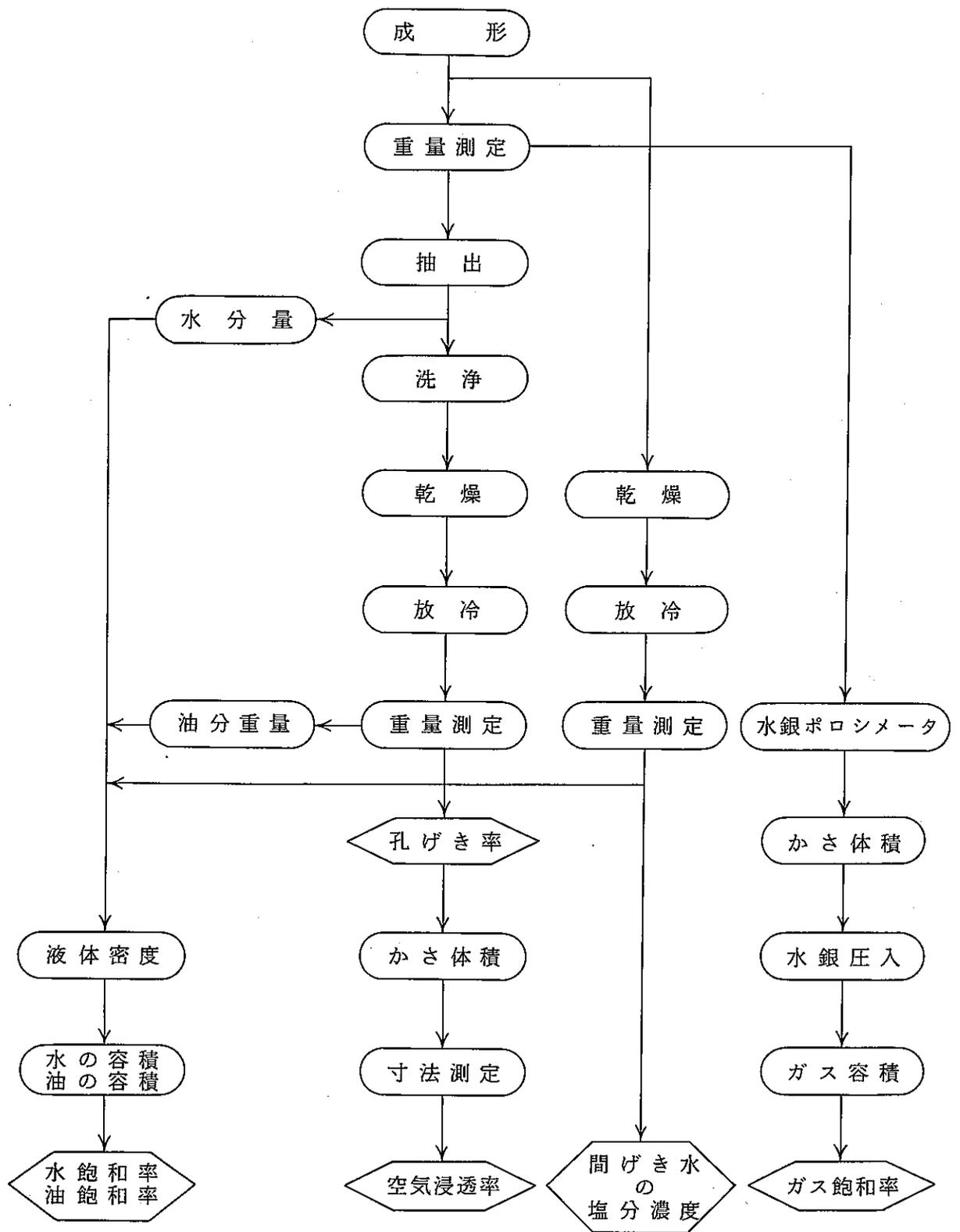


図2.1.1-1 通常コア試験法のフローシート

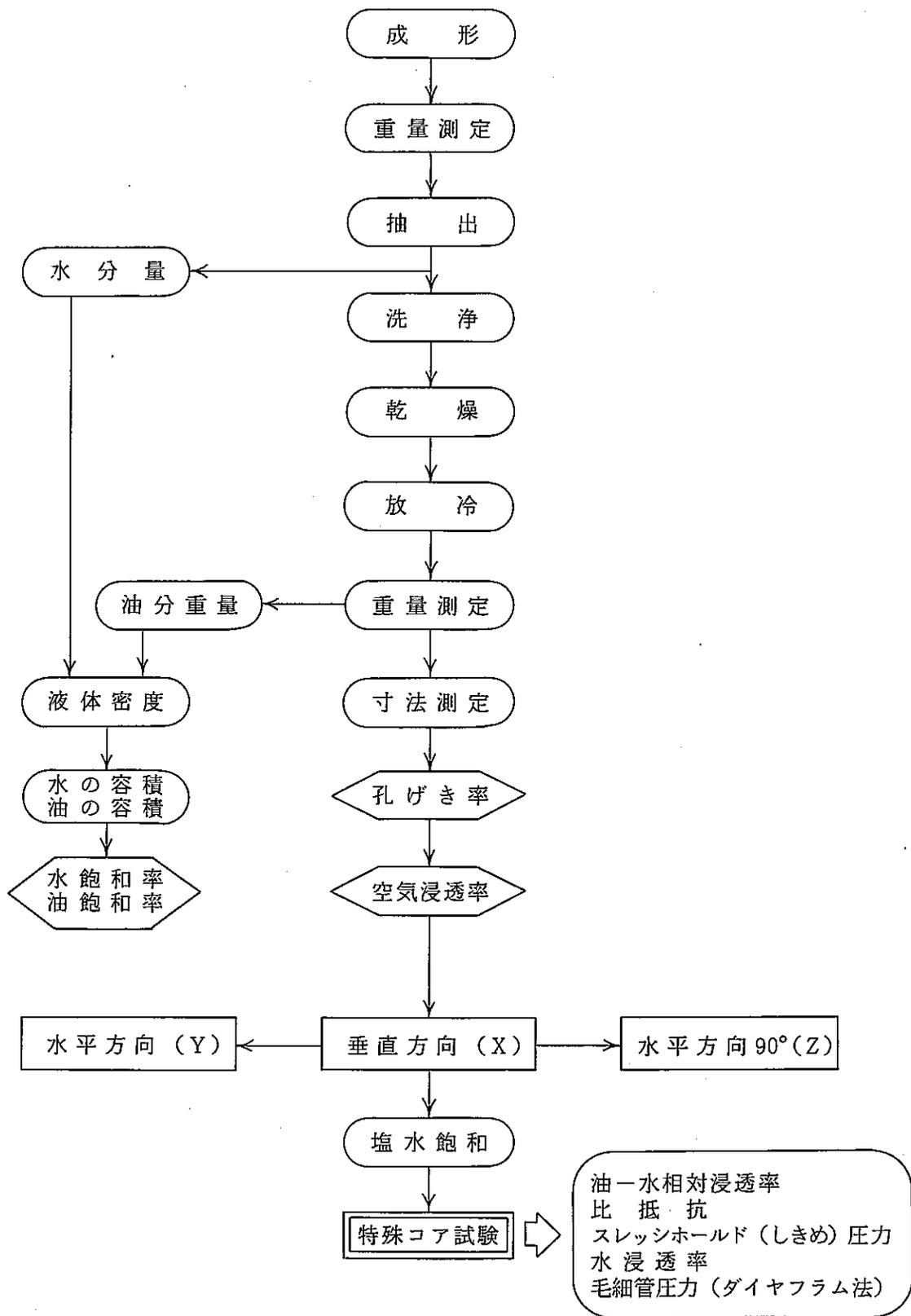


図2.1.1-2 ホールコア試験法のフローシート

(a) 一次的影響

油層岩内における粘土鉱物の存在形態と粘土鉱物が存在すること自体に起因する影響には以下のものが知られている。

a. コアの孔げき部における粘土鉱物の三種の形態

コアの孔げき中に存在する粘土鉱物の代表的な三種類の存在形態、及び対応する鉱物種は以下の通りである。

①分離した粒子として存在する場合・・・カオリナイト

②砂粒子表面に一様に張り付く場合・・・クロライト

③孔げき部をブリッジする場合・・・イライト

b. 石化物及び長石による岩層

①粘土鉱物の変遷によるポアシステムの変化

②この変化による孔げき径の縮小と導通性の低下

c. b-①, ②が与える孔げき率-浸透率の相関への影響

①孔げき率が小さいほど粘土鉱物の影響を受けやすい。

②粘土鉱物の形態によりこの度合いは異なり、イライトが最も浸透率を低下させる。

③粘土鉱物は表面積が大きくコアの浸透性を減少させる。また、孔げき径の小さい部分に集まりやすいため、少量の粘土鉱物でも浸透率に大きく影響する場合が多い。

(b) 二次的影響

コアの採取及び処理の方法等による粘土鉱物の変化に起因する影響を以下に示す。通常手法のコア試験は、

・トルエンによる抽出 110℃ (230°F)

・オープン乾燥 82℃ (180°F)

・常圧下での孔げき率、浸透率測定

を行っているが、粘土鉱物に富むコアは油層内では常に水和している。この水は粘土鉱物表面に吸着されており、この部分は孔げき部とは考えられない。特にスメクタイトでは重要であり、コアの脱水によりフラクチャーを生じて異常に大きい孔げき率、浸透率が生じる場合がある。また、粘土鉱物に富むコアは周圧からの解放により膨張しやすい。

したがって、このような試料をコア試験に供するには

・低温抽出（遠心分離式）

・湿度、温度調整をした乾燥（湿度40%・温度60℃）

・周圧下での測定

が必要である。

(ii) 濡れ性の変化を考慮したコア処理方法

掘削泥水同様にコアの処理方法がコアにおよぼす影響は非常に大きい。特に特殊コア試験に用いるコアについては、目的に応じて適切なコア処理が必要である。

油層岩の濡れ性は、岩石と地層流体とが地層の温度・圧力下で長期にわたり接触していた結果として形成されるものであり、誤った泥水の使用、誤ったコア処理により大きく変化してしまう可能性がある。コア処理に際しこの濡れ性に最も影響を与えるものは空気との接触である。

コアを取り扱う際は空気との接触は避けられないが、その時間を極力短縮し濡れ性の変化を最小限にとどめる必要がある。コアパーレルから取り出したコアをすぐに地層水に浸すことができればよいが、これが無理ならばバケツに水を張り、その中に浸してもよい。コアの保存処理に先立ち地質の判定が行われるが、この間、水に浸したままにしておく。

コア処理の方法はその目的に応じて以下の方法がある。

a. 濡れ性測定用コア

- ・プラスチックフィルム、アルミホイル、サランラップ、パラフィンで包む
- ・液体に浸す（空気及び異物を除去した原油，脱気した塩水，泥水）
- ・ラバーキャップもしくは木栓で両端をシールしてパイプに入れる
- ・ラバーキャップもしくは木栓で両端をシールして冷凍したまま保存する

b. 水飽和率測定用コア

- ・プラスチックフィルム、アルミホイル、サランラップ、パラフィンで包む
- ・液体に浸す（空気及び異物を除去した原油又は，泥水）
- ・プラスチックバッグによる方法
- ・ラバーキャップもしくは木栓で両端をシールしてパイプに入れる
- ・ラバーキャップもしくは木栓で両端をシールして冷凍したまま保存する

c. 油飽和率測定用コア

- ・プラスチックフィルム、アルミホイル、サランラップ、パラフィンで包む
- ・液体に浸す（脱気した塩水，泥水）
- ・プラスチックバッグによる方法
- ・ラバーキャップもしくは木栓で両端をシールしてパイプに入れる
- ・ラバーキャップもしくは木栓で両端をシールして冷凍したまま保存する

- d. その他の物性（孔げき率，浸透率，リソロジー）測定用コア
- ・プラスチックフィルム，アルミホイル，サランラップ，パラフィンで包む
 - ・液体に浸す（空気及び異物を除去した原油，脱気した塩水，泥水）
 - ・プラスチックバッグによる方法
 - ・カンによる方法
 - ・破損を防ぐのみ
 - ・ラバーキャップもしくは木栓で両端をシールしてパイプに入れる

(iii) その他の留意事項

a. クリンケンベルグ効果

ガスの浸透率はガス組成及びガスの圧力によって変化する（クリンケンベルグ効果）。液体の浸透率はこれらに左右されない。クリンケンベルグはこの原因はガス分子の岩石粒子表面でのスリップであり平均圧力が高いほどスリップの影響が小さく，浸透率が高いコアほどスリップが小さいと報告している。クリンケンベルグ補正は，ガスで得られた浸透率をこれに相当する液体の浸透率に補正するものであり，一般に浸透率の小さいコアほど大きな補正を必要とする。

b. コアと流体の反応

コアと流体の反応によりコアの浸透率が増減する場合がある。粘土鉱物結合水がなくなれば浸透率は大きくなり，粘土鉱物の水との反応による浸透率の低下は，一般に水の塩分濃度が低いほど，また，元来の浸透率が低い（粘土鉱物が多い）ほど，その度合いが著しい。

c. 周圧下での測定

特に柔らかく崩れやすいコアでは，周圧により孔げき率，浸透率が大きく変化してしまう場合があるため，このようなコアの試験に際しては実際の油層条件に相当する周圧下での測定が不可欠である。

(iv) 油層解析におけるコア試験の応用

油層及び油層内での流体挙動，即ち油層の成層状況，油層の大きさ及び形状や水層の能力（水押し型の場合）を把握するためには，多種のデータを用いた油層評価が必要である。コアデータも検層データ及び生産テストデータ等と共に油層評価への貢献度は高く，これらのデータを総合的に応用して詳細なスタディーが可能となる。

(a) 必要なコアデータ

試験の方法及びテスト数を決める際には，油層の地質に関する知識のある地質技師が必要不可

欠である。地質、続成作用、鉱物組成、不均質性の度合い等を考慮した上で試験計画を作成する必要がある。

(b) 必要なデータ数

データ数は多いほどよいが、種々の制約から必要かつ十分なデータ数を決めなければならない。ここでも試験方法同様、地質技師との協力が不可欠である。

・浸透率、孔げき率

通常コア、ホールコアを15～30cm毎に試験することが望まれる。不均質なコアではさらに密にしたり、ホールコアによる試験も要求される。亀裂やバリアのあるコアでは方向性も加味した試験も行う必要がある。

・岩相依存度

脱水毛細管圧力、注水毛細管圧力、相対浸透率の測定等は岩相毎に行う。脱水毛細管圧力は同じ岩相でも、浸透率、孔げき率が大きく異なる場合はそれぞれ測定する必要がある。これらの測定は岩相の濡れ性に強く左右されるため、濡れ性の変化に留意した測定法が望まれる。

・流体の飽和率

通常、浸透率、孔げき率と同じ頻度で測定する。

(c) 一般的なコアデータの使用例

コア試験によって得られるデータの一般的な用途を以下に示す。

・検層による孔げき率の補正

検層で得られた孔げきをコア試験の値を用いて補正する。コア試験では5～10cm毎に孔げき率を測定できるが、検層では50～100cm間を平均化しているため不均質なコアでは注意を要する。

・孔げき率と浸透率との相関付け

・産出テスト及びプロダクション検層テストとの相関付け

・原始埋蔵量の計算

・回収率、置換効率

・油層シミュレーション

(d) アベレージングの方法

シミュレーションなどでは油層を数m単位のプロックに分けて考えるため、数cm毎に得られたコアデータをシミュレーションに取り入れるには、これらの数値を平均化する必要がある。

・浸透率の平均化

通常以下の3方法のうちから一つを選んで平均化する。

①算術平均

油層が流れの方向に対して平行な場合

②調和平均

油層が流れの方向に対して垂直な場合

③幾何平均

浸透率の不均質が著しい場合

どの方法を選ぶかは、油層の地質を考慮して、坑井生産テスト等により得られる浸透率と比較して決める。炭酸塩岩油層やフラクチャード油層等、不均質性が著しく高浸透性チャンネルを有する場合には、上記の3方法では十分でないときもある。

・毛細管圧力のアベレージング

毛細管圧力のアベレージングも層毎、岩相毎に行われる。アベレージングの方法は以下の3方法が一般的である。

①浸透率による平均化

②孔げき率による平均化

③ジェイファンクション（最も一般的）

・相対浸透率のアベレージング

種々の方法が提唱されているが、ここでは以下の3つについて紹介する。

①一定の水飽和率に対して浸透率を平均化する。

②一定の浸透率に対して水飽和率を平均化する。

③ディスプレイサブルオイルボリューム法。

・水飽和率のノーマライズによる平均化

その他の手法（最小二重法，多重回帰法等）も提唱されているがどの方法を選ぶかは、状況及びエンジニアの判断による。いずれにしても、油層評価にコアデータを使用する際には、他のデータ（検層，坑井テスト）及び地質等を考慮した総合的な検討が要求される。

2.1.2 試料の調整

(1) コアの成形

コアの液体飽和率や孔げき率、浸透率を決定するには、通常代表試料の中心部分を、ダイヤモンドカッターで冷却液を用いず迅速に約1.8~2.0cm角、長さ3cmの直方体に切断成形して用いる。他にホールコアでも色々な成形をすることもある。

その他にダイヤモンドドリルで直系1", 1-1/2" プラグに成形する場合がある。これは、主に特殊コア試験として用いられている。

(2) 試料のクリーニング

孔げき率、浸透率、及び特殊試験に移行する前段階として、コアが含有している液体を完全に除去する工程が必要であり、その時に液体飽和率を求めることができる。

主なクリーニング法として、ディンスターク法、ソックスレー法または、遠心分離法が用いられており、炭化水素の抽出に使用する溶媒としては、トルエン、メタノール、キシレン、アセトン、ヘキサン等が広く用いられる。また、これらの溶媒を組み合わせた混合溶媒におけるクリーニングも行なわれている。特に高い塩分を含有している試料については、塩分除去のためメタノールによる追加抽出が必要である。

(3) 乾燥

クリーニングを完了したコアは通常メタノールで再度クリーニングし、80℃に温度調節して最低4時間乾燥することが望ましい。

しかし、粘土分を多く含有しているコアの場合、このような通常乾燥では割れ目を生じたり、粘土分の一部を構成する水分まで除去してしまう可能性があるため、そのようなコアでは、恒温恒湿（60℃相対湿度40%）で乾燥を行なって、孔げき率や浸透率を過大に評価しないようにし、通常法より長い時間（一般に24時間）をかけて乾燥する。またホールコアについては、72時間~120時間は必要である。

(4) バルク体積の測定

コアの孔げき率を決定するには試料のバルク体積を測る必要がある。その方法には、水銀置換法、寸法測定法、粒子密度法などがある。

3/4" 角型成形コアあるいは、直系1", 1-1/2" プラグコア等比較的小型の試料では、水銀ポンプによる置換法で精度良くバルク体積が求められる。2" ~4" のホールコアについては、通常は寸法測定により算出しているが、寸法は同一方向に数回測定してバラツキを平均化してバルク体積を求めている。アルキメデス法は、試料に割れ目や、空洞等のあるホールコアについては誤差を生じてあまり

正確ではない。

2.1.3 透過特性測定方法

(1) 液体飽和度の決定

コア掘り後のコアは、試験試料に供されるまでに空気や他の流体との接触によって流体含有率に変化が生じないように取扱いや保存に十分な注意が必要である。

成形にあたっては、泥水の侵入がなるべく少ないコアの中心部を試料として用いる。成形した試料は、デNSTAーク抽出器を用いて含有油水分を抽出して計量される。

試料はトルエン蒸気で加熱され、気化した水分はコンデンサー一部で冷却されトルエンと共に液化し、水分はトラップ内に蓄積され目盛により直接計量できる。

含有油量は、抽出前の試料重量から抽出乾燥後の重量と水の重量を差し引いた重量を油の比重で除して求められる。これらは、孔げき体積に対する%として水飽和率・油飽和率のように表示される。

抽出は通常8時間行い、ホールコアについては、大型デNSTAーク抽出装置で昼夜4~5日を要し、24時間で1cc以下の抽出水量になるまで続ける必要がある。

(2) 間隙率の決定

気体の等温膨張法、即ちボイルの法則を応用し、孔げき容積、粒子体積をヘリウムを用いて測定する方法による。ヘリウムを用いる利点としては、ヘリウムは、原子の質量が小さいので拡散と浸透性が高く、粒子表面への吸着が少なく粒子体積が正確に測定できる等がある。

(i) エクステンデットヘリウム間隙率測定装置

この測定装置は、孔げき容積を求めるマトリックスカップと、粉碎粒子体積を測るマトリックスミニカップがあり、コアの大きさ、長さによって通常コアホルダーあるいは、ハスラーコアホルダーを用いてそれぞれ目的に応じた孔げき率を測定できる。

試料の測定範囲は、ハスラーコアホルダーでは、直径3"、3・1/2"、4"、4・1/2"、長さ10cm~30cmのホールコアに対応でき、また、通常のコアホルダーを用いて、直径1"~1・1/2~2"、長さは、10cm~1mまでの孔げき率に対応できる。

マトリックスカップを用いる場合は、直径1"~1・1/2"、長さ7cmの試料が測定でき、マトリックスミニカップは1~2、3~5ccの体積の岩片及び粉末試料の測定ができる。装置は、ヘリウムを一定圧力(100psig)にする調整器と調圧されたヘリウムガスを蓄積する比較用セルから成り、試料の大きさに応じて比較用セルを選定することができる。

また、圧力は電気信号に変換されてデジタルで表示される。以上の関係は次式により表される。

$$V = V_r \cdot \frac{(R-P)}{P} + \frac{(R+B)}{P} \cdot G \cdot (R-P)$$

V: 測定される未知のコアの孔げき容積 [cm³]

V_r: 比較用セルの容積 [cm³]

R: 比較用セルの最初の圧力 (圧力センサの電圧変換値) [Volts]

P: 比較用セルと測定される容積内の膨張して等しくなった結果での圧力 [Volts]

B: 気圧 [Volts]

気圧 (psi)

50psi/Volt

G: システム膨張係数 [cm³/Volt]

(ii) ヘイズゲージヘリウム間隙率測定装置

測定試料容器は、エクステンデットヘリウム孔げき率測定装置と同じく、ハスラーコアホルダーとマトリックスカップを用いて、試料の大きさに応じて比較用セルを選定して測定するもので、1番小さい比較セルで2.5~50cm³、次に5~450cm³、10~880cm³の容積をヘイズゲージで直接孔げき容積を読みとることができる。孔げき率の計算が簡単にできるが小さい試料では誤差が大きくなるためおのずと制限がある。

(3) 浸透率 (絶対透過係数)

浸透率は地層の特性を表す一つであり、油、ガス、水等の流れ易さを示す指数である。コアの浸透率は、試料に対して昇圧ガスを流し、ガスの容量フロー・レイトを測定することによって決定される。脱湿空気 (ドライエア) がAPIにより定義されている。

(i) ダルシーの法則

非圧縮性、粘性1cpの液体が、流れの方向に対して垂直な断面1cm²を1cm³/secの速さで流れ、流れの方向にそって1cm当たり1atmの圧力降下のあるとき、浸透率は1 [darcy] である。

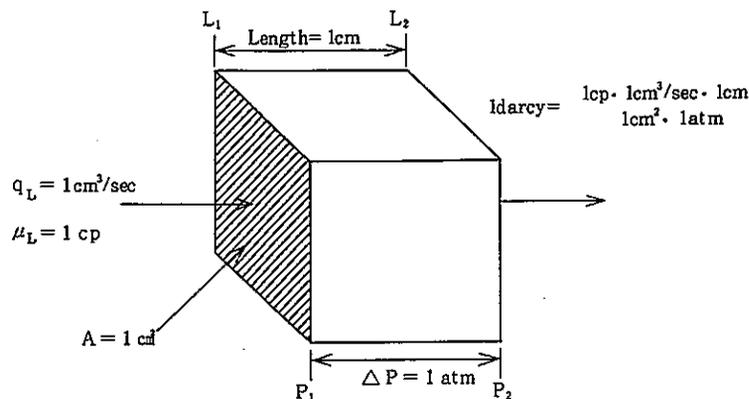


図2.1.3-1 ダルシー則による透過モデル

ダルシーの法則を示す式を応用して、様々な条件、流体に対して浸透率を計算することができる。

非圧縮性の液体に対して、ダルシーの法則は次のようになる。

$$K_L = \frac{\mu_L q_L L}{A(P_1 - P_2)}$$

K_L : 浸透率 [darcies]

μ_L : 液体の粘性 [centipoise]

q_L : 非圧縮性液体の容量フローレート [cm^3/sec]

L : コアの長さ [cm]

A : 断面積 [cm^2]

$P_1 - P_2 = \Delta P$: 入圧と出圧との差 (差圧) [atm]

圧縮性流体 (ガス) に対するダルシーの式は、次のようになる。

$$K_g = \frac{2\mu (q_g) (L) (P_a)}{A (P_1 + P_2) (P_1 - P_2)}$$

K_g = 浸透率 [darcies]

μ_g = 試料の平均圧力, 平均温度におけるガスの粘性 [centipoise]

q_g = 大気圧, 平均温度におけるガスの容量フローレート [cm^3/sec]

P_1 = 入圧 or 上流側圧力 [standard atm]

P_2 = 出圧 or 下流側圧力 [standard atm]

P_a = 大気圧 [standard atm]

※温度変化はないものと仮定する。

上記に示した式は、ダルシーの法則の線状流 (リニア・フロー) として知られている。それらの式は、フローが基本的に1方向にしか起こらない場合のプラグコアの浸透率決定に用いられる。

(ii) マイクロ空気浸透率測定装置

マイクロ空気浸透率測定装置は、0.01md~10,000md ([m darcy] or [md]) まで広い範囲の浸透率が測定できる。主要部分は、プラグコアを挿入するハスラーコアホルダーと、コア上流圧力を調整する機構、及びコアを通過する空気流量を測定するためのオリフィス部からなっている。

試料の上流圧力を水銀マンノメーターまたは、ブルドン管圧力計から“C”値として読み取り、オリフィス圧力を水柱マンノメーターからmmとして読み取る。水銀マンノメーターで得られた“C”値は自動的にオリフィス差圧を差引いたものとなり、ブルドン管圧力計ではオリフィス差圧が無視されている。(その比約1,000:1)

装置に付属しているハスラーコアホルダーは通常、円柱プラグコアに適しているが、その他に立

方体の試料をスチールリングに挿入し、パラフィンでセットして浸透率を測定することもできる。また、プラグコア用ハスラーホルダーを、ホールコア用ハスラーホルダーと置き換えて接続して、浸透率を求めることもできる。マルチコアホルダーなどは、その1つの例である。

コア試料の上下流の差圧と流量を知ることができれば、下流圧力=1atmおよび 10^3 をまとめて定数扱いし、上流圧力変化とあわせて圧力計に“C”値として目盛っている。

これによって自動的に大気圧での流量が平均圧力での値に換算されるので浸透率が簡単に次式のように求めることができる。

$$K = C \cdot Q \cdot \frac{L}{A}$$

$$\text{ここで } C = \frac{\mu \times 10^3}{(P_1 - 1) \frac{(P_1 + 1)}{2}}$$

L=試料長さ [cm]

A=試料断面積 [cm²]

Q=流量 [cc]

K=浸透率 [md]

P₁=上流圧力 [atm]

μ=空気の粘性 [cp]

ホールコアの空気浸透率の測定においては、ハスラーコアホルダ内のラバスリーブを真空ポンプで拡大して試料をホルダーに挿入し、試料の両断面に円形のスクリーンをセットして真空を払い、ラバスリーブを300psiaに加圧した状態で垂直方向浸透率を求める。また、水平方向の浸透率においては、浸透性が最も発達している方向と、それに直交する方向で浸透率を測定する。

水平方向の通気面積は、コアの長さでスクリーンの長さで決る。また、コアの長さより1.1/2”ほど短い2枚のスクリーンをコアの長さの中心部に向い合わせにセットして浸透率を測定するもので、コアの周辺をおおうスクリーンの角度の形状係数により修正した次の式による。

$$K_a = \frac{C \cdot Q \cdot G(1.0)}{L}$$

もしも、スクリーンの垂直方向の長さが、コア試料垂直方向の長さよりも短い場合、(通常1.1/2”) コアの長さL [cm] スクリーンの長さL_{screen} [cm] を用いて、次式から見かけの長さL_a [cm] を求める。

$$La = \sqrt{L \times L \text{ screen(cm)}}$$

ここで

C=水銀マノメータまたは、ブルドン管圧力計の読み

Q=オリフィスの流量

G=形状係数スクリーンがコアの周辺をおおう角度から幾何学的に誘導された係数

90° =1.0

70° =1.2

110° =0.82

L=コアの長さ

(iii) 自動コア分析システム “CMS-300”

装置の機能は、プラグコア試料のヘリウム孔げき率と空気浸透率を求めることができ、さらに任意周圧下における完全自動測定を実現させたコア分析装置である。

測定処理能力は直径1”プラグコア試料で18個、1・1/2”プラグコア試料であれば12個、周圧は500～10,000psiの範囲で任意連続で8点まで設定できる。孔げき容積0.02～25cm³、浸透率0.01～2,000mdの測定結果をレポート形式で自動的に報告し、孔げき率と浸透率及び周圧の関係がそれぞれグラフで表されるという画期的な装置である。ただし、柔らかく崩れやすい変形した試料では分析の制限がある。

(4) 相対浸透率（相対透過係数）

孔げき中の水の飽和率の変化により、浸透率も変化する。2相流をシミュレーションする場合、飽和率=1の場合の浸透率との比を表わす相対浸透率は非常に重要なパラメータとなる。以下にその測定手順を示す。

(i) 試料の高圧液体飽和

相対浸透率、毛細管圧力、（液体置換式）比抵抗、帽岩のスレッシホールド圧力（しきい圧）等の特殊試験に用いるプラグ及びホールコアに液体（主として塩水）を飽和することは、最も重要な前処理工程の1つである。

飽和する試料を高圧液体飽和装置に入れ、もう一方の真空デシケータに既知塩分濃度の塩水を入れ、両方同時に真空ポンプで最低3時間脱気した後に、圧力差を利用して塩水を飽和装置に移入した後、水圧ポンプで2,000psiに加圧して1昼夜放置する。塩水で飽和されたコアは、その後脱気された塩水を用いて水の浸透率を測定した後に、特殊コア試験に供する。

(ii) 水による絶対透過係数の決定

空気浸透率の測定と原理的に変りはないが、塩水でコア試料の孔げき内の空気を減圧と加圧により完全に塩水で置換飽和した試料に、圧力を3点以上変え浸透率を測定し、圧力により浸透率が変化しないことを確認して水の浸透率を決定する。

コアは様々な膨潤性の粘土鉱物を含むことが多く、塩分濃度によっても水の浸透率が大きく変ることがある。透過水量とともに浸透率が低下して安定するのが一般的な現象である。このことは、孔げき内で微粒子が移動してプラグ現象がおこしているものと考えられている。この場合は、逆方向から流すことで一時的に浸透率は増大する。しかし、逆方向でも浸透率の回復が起こらないときは膨潤による浸透率の現象と考えられるから、膨潤あるいはプラグングについての判断は可能である。

以上の現象は、クリーンなコアや火山岩質のコアではあまり重要ではない。

(iii) 相対浸透率（相対透過係数）

相対浸透率は地層での多相流を考えると不可欠な要素である。これはコアの濡れ性に大きく左右されるため、測定に際しては、コアの濡れ性をできるだけ地層の状態に保つ、あるいは地層の状態に近づけることが重要である。

相対浸透率は通常以下の方法により測定される。

- ①水押しによる 油-水系相対浸透率
- ②ガス押しによる ガス-油系相対浸透率
- ③ガス押しによる ガス-水系相対浸透率
- ④遠心分離による 油-水系相対浸透率

(a) 水押しによる 油-水系相対浸透率

油-水系の相対浸透率測定においてはコアの濡れ性の変化を防ぐため、使用する油は油層流体に近いものが望ましく、圧入水も油層水と同一組成のものが望ましい（原油のガス化あるいはエマルジョンにより計量が困難で通常ホワイトオイルが用いられる）。また、温度・圧力（オーババーデン）は油層条件に近づけることが望ましい。

手順を以下に略記する。

- ①コアセット及び油層条件（温度、圧力）の設定
- ②塩水でコア内の泥水濾過水等を追い出した後、水の浸透率を測定する
- ③油による置換（48時間±Swirの決定）
- ④油の浸透率

⑤水による置換

⑥コア上流，下流の差圧及び流出される油・水の量と時間，温度を記録

⑦必要があれば上記の操作を繰り返す

⑧抽出によるコア内残油量及び孔げき率の決定と相対浸透率算出

(b) ガス押しによる ガス-油系相対浸透率

ガスは常にノンウエットイングフェイズであるため，水押しの場合のようにコアの濡れ性に特に気を配る必要はない。したがって，抽出・洗浄後のコアに対してもテスト可能である。

手順を以下に略記する。

①抽出コアを塩水で飽和して孔げき容積を求める

②Swirの状態が必要であれば①のコアを油で置換して水の流出が終了するまで続ける（高粘性のホワイトオイル使用）。Swirを決定して油の浸透率を測定する。

③ガスによる置換

圧入圧力は通常 N_2 ガスを用い一定に保つ（緻密なコアで圧入圧力が高圧になる場合においても，ガスの溶解等の現象を防ぐためこれが過度にならないようにする）。

④コアの差圧及び油，ガス流量の測定と相対浸透率の算出

(c) ガス押しによる ガス-水系相対浸透率

測定装置は，ハスラーホルダーとシール圧力調節部，流動圧力調節部，気-液流出計量部がそれぞれのパネルにセットされている。

コア試料としては，1"，1-1/2"，プラグコアを用い，前述の手順によりSwirを決定した試料を用いる。この試料に対して一定圧力下でガスドライブして，（ガス-水，ガス-油）相対浸透率を測定するもので，最初は流出液量が多く，時間とともに流出液量が減少しガスの流速が速くなる。測定を開始してからガス/液比が無限大になるまでの時間はほぼ5時間程度である。

気-液累計流出量をピュレットと水置換式ガス計量により測定し，それ以後は，回転式ガス計量でガス量が60リットル流出するまでの流出流体量と時間を測定する。

(d) 遠心分離による 油-水系相対浸透率

水押しの場合と同様な処理（ $Sw=Swir$ ）を完了したコアを用いる。

コアを遠心分離用セルにセットして，遠心分離（約2400回転，約24時間）にかける。この間，油の排出量及び時間を記録し，その経過データより油水系相対浸透率を求めることができる。孔げき率等は一連の測定の完了後に測定する。

(e) 定常流による測定

上述の三種の方法は全て非定常流（流量及び飽和率が時間とともに変化する）での測定であり、浸透率の測定に当たってはコアの均一性を仮定しているのに対して、ここでは流体を定常流下に置くことで不均一性に対処することが可能である。

それぞれの流体の有効浸透率は流量及び ΔP から直接求めることができる。物質収支から S_o , S_w を決定するため、本実験に際しては次の事項が必要である。

- ① S_o , S_w の誤差を減らすためデットボリュームを極力減らす
- ②流速を正確に制御し得るポンプの使用
- ③適切なセパレーター（油、水）の使用

(5) 毛細管圧力（毛管圧）

毛細管圧力とは、Wetting phaseとNon-Wetting phaseとが、毛細管内で接する際、その界面に生じる両相間の圧力差であり、

$$P_c = P_{nw} - P_w$$

P_c : 毛細管圧力

P_{nw} : Non-Wetting Phaseの圧力

P_w : Wetting Phaseの圧力

で表わされ、相対浸透率の場合と同様、どちらか一方の流体の飽和率の関数として求められている。

コアの毛細管圧力の測定法としては、通常遠心分離法、ダイヤフラム法、水銀圧入法等がありコアの特徴と測定の目的によって方法を選択する必要がある。

毛細管圧力と飽和率の関係は、通常飽和率の変化の方向によって異なり、Wetting Phaseが減少してゆく過程（Drainage：脱水）での値と、その逆での過程（Inbibition：吸水）の値は違うため、目的に応じた系及び過程での測定が必要となってくる。

(i) 表面張力（ γ ）

液体は外力の影響を受けないと球形となる。このことは、液体分子間の引力によるもので、表面張力（surface tension）とよぶ。液体は球形になることによって表面の自由エネルギーを最少に保とうとするため、液体の表面を単位面積だけ増加させるのに要するエネルギーがすなわち表面張力であり、異なった相が接触する境界面で発生し、石油、ガス流体と岩石のような液-固、気-固相関にも発生する。通常温度の上昇に伴って減少する。

(ii) 接触角（ θ ）

また液-固相系においては、液体が水平な固体表面に接触するとき、液体はある程度広がって液

面と固体面の間にある角度をもって平衡に達する。この角度を接触角 (angle of contact) と呼び、この角の大小は液体の固体面に対する広がり の程度、すなわち濡れ (wetting) の程度を表わしている。

このような液体 (実際には気-液の混合相もある) の中に毛細管を考えると、表面張力 γ 、接触角 θ 、毛細管の半径 r に規定された毛細管現象が起こる。これは毛細管中の高さ h の液体と表面張力が釣り合っている現象と考えられている。

(iii) 濡れ性 (W)

固体と液体など異種の2物質が、接触したときに引き合う現象を濡れ (Wetting) または吸着 (Adsorption) という。

これらを引き離すのに要する力 W は、これらの物質の吸着による自由エネルギーの減少分に等しく、液体の表面張力 γ 、接触角 θ 、によって次のように表わされている。

すなわち

$$W = \gamma (1 + \cos \theta)$$

である。しかし、石英や長石 (同じ石英でも結晶形態によって違う) などの岩石と水、油、ガスまたはこれらの混合 (多相溶液) の場合の濡れは、鉱物種、油の成分、液体の極性、温度などの多くの要因による複雑な系である。

(iv) 液体の高さ (h)

液体 (実際には気-液の混合相である場合もある) の中に毛細管を立てると、上述の表面張力 γ 、接触角 θ 、毛細管の半径 r に規定された毛細管現象が起こる。これは毛細管中の高さ h の液体と表面張力が釣り合っている現象である。

すなわち

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{r} (= \rho g h)$$

ここで高さ h の液体が作り出す圧力は $\rho g h$ であり、これを毛細管圧力 P_c と呼ぶ。

ただし

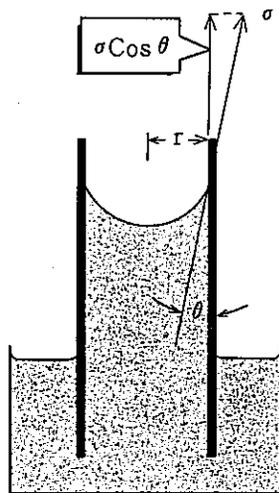
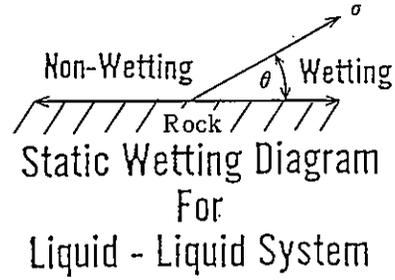
h : height of fluid capillary (毛細管中の液体の高さ)

γ : surface tension (表面張力)

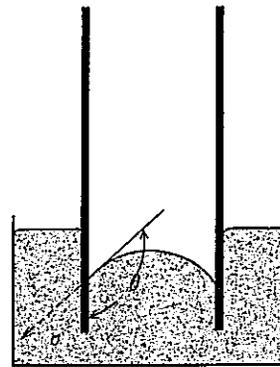
r : radius of capillary (毛細管半径)

ρ : density of fluid (液体の密度)

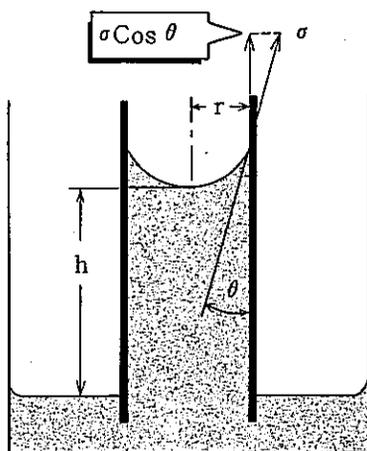
g : acceleration of gravity (重力加速度)



Capillary Rise
Of
Wetting Liquid



Capillary Depression
Of
Non-Wetting Liquid



Capillary Pressure Equations

At Equilibrium: Force Up = Force Down

$$\text{Force Up} = 2\pi r \cdot \sigma \cos \theta$$

$$\text{Force Down} = \pi r^2 \cdot h \cdot (D_w - D_H) \cdot g$$

Capillary Pressure = Force / Unit Area

$$P_c = \text{Force Up} / \pi r^2 = \text{Force Down} / \pi r^2$$

$$\therefore P_c = \frac{2\pi r \cdot \sigma \cos \theta}{\pi r^2} = \frac{2 \sigma \cos \theta}{r}$$

$$\text{and } P_c = \frac{\pi r^2 \cdot h \cdot (D_w - D_H) \cdot g}{\pi r^2} = h \cdot (D_w - D_H) \cdot g$$

$$\therefore h = \frac{P_c}{(D_w - D_H) \cdot g} = \frac{2 \sigma \cos \theta}{r \cdot (D_w - D_H) \cdot g}$$

図2.1.3-2 表面張力と毛管圧力

(v) 孔げき径分布の測定

現在最も一般的に行われている孔げき径分布の測定方法は、水銀を試料に圧入する方法と気体の吸着と凝縮を利用する方法であり、オングストローム単位の閉孔もふくめた全孔げき構造を測定するx線小角散乱法、貫通細孔のみを対象とする気体透過逆拡散法等もあるが、ここでは通常のコア試験に行われる水銀圧入法について述べる。

水銀圧入法での毛細管圧力測定のパデータは、以前よりも孔げき径分布の計算に用いられ、これを（毛細管圧－飽和率）の関係に変換し、油層中での液体分布を求めることもできる。同様に（相対浸透率－飽和率）の関係を求める理論も提唱されているが、これはあくまで机上の理論であり、理論値と実証値との値が大きく異なるという例は少なくない。

水銀を用いて毛細管圧力を測定する利点は下記の通りである。

- (1) 水銀は表面張力が大きく、濡れにくい液体で多孔体に接しても侵入しない。
- (2) 高加圧することにより幅広い孔げき径分布が得られる。
- (3) 他の溶媒や鉱物などに対して吸着などの反応性が小さい。
- (4) 圧縮率が格段に小さいために減圧効果が起こりにくい。
- (5) 一試料一回のテストで脱水過程と吸水過程の毛細管圧力を測定することができる。

孔げき径分布の測定結果は、ポアジオメトリー、孔げきの表面積、孔げき率及び浸透率等の貯留岩特性を可視化、相関づける上で、貯留岩評価に有効となる場合があり、孔げき径分布の把握により、特定の条件下（岩石－流体－飽和率の履歴等）における微視的な多孔質媒体内流動に関する理解ができる。

孔げき径分布の計算には、下記の諸数値が必要となる。

- A：圧入圧力 [psia]
- B：各圧力の水銀飽和率 [%]
- C：水銀－岩石間の界面張力 [dynes/cm]
- D：水銀－岩石間の接触角 [degrees]

毛細管圧力と孔げき径との相関については、従来より広範な研究が行われているが、円筒チューブ内での毛細管現象（毛細管圧力）は、次項（1）式により粘着力とチューブ径との関数として表現されている。

(1)

$$P_c = \frac{2 \sigma c \cos \theta}{R_i}$$

上式で R_i = 平均孔げき径 [microns]

P_c = 毛細管圧力 [psia]

σ = 界面張力 [dynes/cm]

θ = 接触角 [degrees]

(c: 単位径によるコンバージョンファクター)

(1) 式を変換し、各種コンバージョンファクターを導入すると次式となる。

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{2 \times \sigma \times \cos \theta}{P_c} = \frac{2 \times 367 \text{ dynes/cm}}{P_c \text{ psia}} \\ &= \frac{2 \times 367 \text{ dynes/cm}}{P_c \text{ psia}} \times \frac{9 \times 10^{-7} \text{ atm}}{\text{dynes/cm}^2} \\ &= \frac{2 \times 367 \times 9.8 \times 10^{-7} \text{ atm} \cdot \text{cm}}{P_c \text{ psia}} \times \frac{14.7 \text{ psi}}{\text{atm}} \\ &= \frac{2 \times 367 \times 918 \times 10^{-7} \times 14.7 \text{ cm}}{P_c} \times \frac{\text{microns}}{10^{-4} \text{ cm}} \end{aligned}$$

(lab condition air-mercury system)

(2) したがって

$$R_i = \frac{106.495 \text{ microns}}{P_c}$$

(vi) 測定方法

(a) 遠心分離法

本測定は、一般に排出過程の毛細管圧力測定に用いられる。孔げき率、空気及び水浸透率が完了した試料を用い、空気-水系あるいは水-油系の毛細管圧力が1度に8個の試料について測定できるが、最近湿潤過程の毛細管圧力が測定できる装置が開発されている。

装置の試料カップに試料を入れて回転させ遠心力によって試料内の液体を排出させ、排出された液体は、目盛ガラス管にたまり、ストロボライトにより計測される。測定中は、20分間隔で排出量が計測され、ある回転数における排液量の変化がなくなった時点で次の回転数へ移行する。

通常飽和率を測定する圧力レベルとしては、1, 2, 4, 8, 15, 35psiの毛細管圧力が選ばれる。調べようとする各毛細管圧力レベルに対応する遠心分離装置のスピードを決定するためには次式

を用いる。

$$N = \sqrt{\frac{P_c}{(0.1578)(\Delta\rho)(r)(h)}} \times 10^3$$

ここで

N=回転数 [rpm]

P_c=毛細管圧力 [psi]

Δρ=密度差 (水と空気, 水と油) [g/cc]

n=試料の長さ [cm]

r=平均回転半径 $(14.4 - \frac{n}{2})$ (cm)

(14.4cmは遠心分離の中心から試料の底までの長さ)

測定後、正確な毛細管圧力を求めるためには、上式を変形して次式を得る。

$$P_c = (0.1578 \times 10^{-6}) (14.4 - \frac{n}{2}) (n) (N^2) (\Delta\rho)$$

測定では、遠心分離回転数が同じでも試料毎に異なった飽和率になるのが普通である。測定結果を同じ圧力と飽和率の関係を表すために、試料の長さで回転数から算出した圧力対その圧力×飽和率をプロットしスムージングして、このカーブの1, 2, 4, 8, 15, 35psiでの勾配から飽和率を求めている。

遠心分離法は、試料が破壊する可能性があるため、ヒシチューブ、あるいは、鉛の円筒であらかじめ補強することが望ましく、また試料の直径が1" の場合は8試料、1・1/4" で6試料、1・1/2" は3試料に限られる等の制約がある。

(b) ダイヤフラム法

この測定は、空気-水系、空気-油系、油-水系、いずれも測定が可能で、各々に専用のセラミックプレートを用い、一連の圧力でコア試料内の被置換流体を置換流体で置換して、圧力と飽和率の関係を測定する。

セル底部、セラミックプレートの表面にティッシュペーパーを置き、珪藻土と、もう一枚のティッシュペーパーのサンドイッチ状態を作り上げる。セル内で完全に塩水を真空脱気して、それぞれのセラミックプレートのスレッシュホールド圧力 (最高35psi) の限界によってセル内の塩水をゆっくり排出する。

その後、塩水で完全飽和したコア試料をプレート表面のティッシュペーパーに密着して置き、

空気をセル内にゆっくり導入して、空気-水系の毛細管圧力を測定する。

油-水系の測定では、前記のごとく塩水で前処理したセラミックプレート表面に、完全に塩水で脱気飽和したコアをセットして、一連の圧力で油を導入してコア孔げき内の水を排出して、飽和率を決定する。

空気-油系の測定においては、セル内にプレート上部まで完全に油（ソルトロールのNo130または粘度校正油JS-2.5）を用いて真空脱気した後、セラミックプレートのスレッシュホールド圧力（最高35psi）の限界まで空気を導入して油を排出してから、油で完全飽和したコアをセラミックプレートの表面ティッシュペーパー上にセットして、一連の圧力でゆっくり空気を導入してコア孔げき内の油を排出して、飽和率を決定する。

測定する前に（アルキメデスの法則を用いて）、試料の飽和に用いた塩水を入れた容器の重量と、その中での試料をスプリングで吊った浮力毎の重量をあらかじめ求めておかなければならない。

毛細管圧力レベル1, 2, 4, 5, 15, 35psiに対して同様の操作を繰り返し測定してゆく。各圧力レベルでプレートを通しての排水が平衡に達したら、セル内から試料を取り出して、水-油毛細管圧力測定の場合は、油の入った容器の重量と、試料をスプリングに吊って油の容器に浸した時の重量を繰り返し測定し、またティッシュペーパーも取替えなければならない。

空気-水系の毛細管圧力は、測定も簡単で測定前にアルキメデスの法則を用いて1回だけ重量を求めればよい。

水-油系の毛細管圧力測定は、非常に長い時間を要して、最低2ヵ月が必要であり、セル内に1-1/2" プラグコア試料をセットするとすれば3~5個が限界であり、また、試料を長くするとセル内の空気を払うときセルを傾けると、倒れやすくなるので注意が必要である。

(c) 水銀圧入法

試料は通常コア試験が完了したものを用いる。装置は、水銀ポンプと試料チャンバからなっており、パネルには大ゲージ（2,000psia）と小ゲージ（-30" ~ 30psia）がセットされている。前もって孔げき率の測定を終えた試料を試料チャンバに入れて、チャンバ内と試料を真空にしつつ水銀内に試料を沈め、小ゲージ-30" にセットできるまで約30分真空に引続け、チャンバの観視窓より水銀のレベルを見ながら0点に合わせて、マイクロメータースケールを0点にセットする。

のちに、真空ポンプを止め小ゲージ-24" に徐々に大気圧に解放していく。（6" Hg≒3psiaである。）

水銀がコアの孔げき内に侵入した量だけ水銀レベルが観視窓の0点より沈むので、その分だけ水

銀ポンプのハンドルで0点まで水銀レベルを移動して、スケールの目盛りを読む。

これを繰り返し、通常3~1,800psiaの圧力段階について水銀の圧入量を測定するものである。

試料を測定する前に水銀ポンプのキャリブレーションを（試料測定するごとに）しなければならない。また、この水銀圧入法毛細管圧力測定には限界がある。即ち、ポーラスプレートによるダイヤフラム法のスレッシホールド圧力35psiより高いスレッシホールドを持つ、浸透率の低い緻密な試料に限り用いられる。また、粘土分の多い試料については、水銀を圧入すると粘土の表面を濡らす傾向があり、孔げき内に水銀が必要以上に圧入されて水銀飽和率が大きくなる。さらに、水銀圧入法による毛細管圧力は油層計算に直接用いることができない。そのために結果を空気-水系に換算する係数を次式から算出する必要がある。

$$\frac{P_{cm}}{P_{cw}} = \frac{\sigma_m \cdot \cos \theta_m}{\sigma_w \cdot \cos \theta_w}$$

ここで

P_{cm} = 水銀圧入法による毛細管圧力

P_{cw} = 空気-水系毛細管圧力

σ_m = 水銀の表面張力 (=480dyne/cm)

σ_w = 水の表面張力 (=約72dyne/cm)

θ_m = 水銀と岩石の接触角

θ_w = 水と岩石の接触角

θ_m と θ_w をそれぞれ140° と0° を仮定して、 $P_{cm}/P_{cw}=5$ を得ている例がある。岩石によって、接触角は異なるため換算係数は未知数である。(5.1~5.2程度)

もっとも良い方法は、遠心分離法、ダイヤフラムを併用して、岩石毎に換算係数を求めることである。

水銀圧入法の利点は、測定時間が短いことであり、3時間~4時間内で湿潤過程と排出過程の両方が1つの試料で測定できる。また圧力範囲を広くとれることも利点である。

2.2 土質工学分野における測定、評価手法の検討

2相流パラメータのうち、毛管圧については前述のように液相と固相との間の物理的相互作用であるところから、湿潤によって、水和、膨潤するベントナイト系材料に対しては水銀圧入法による細孔系分布からの換算による方法では正しく評価されない恐れが大きい。したがって、ここでは土質工学分野において確立されているpF試験による毛管圧の測定方法について調査した。¹⁾

2.2.1 pF試験の概要

(1) pF-水分曲線

土中の水は重力、表面張力などの物理的な力を受ける運動する水と、主として物理的な力を受けて動くが、不連続な水（団粒内の閉じ込められた水その他）、及び土粒子表面に働く物理化学的な吸着力を受けて存在する結合水などがある。このような水の土に対する力学的な働きを明らかにする場合には、土粒子と水の結び付きの強さを定量的に知ることが、きわめて重要である。

今、重力にさからって土が保持する水分を考えると、土中の毛細管を立ち上がる水のエネルギーは水柱の高さ H [cm] ではかることができる。このエネルギー（毛管ポテンシャル）は量的に広い範囲で変動するから、水柱の高さの対数を用いて $pF = \log_{10} H$ で表現すると便利である。一般に水が示す圧力を(+)とすれば、毛管張力は符号が逆になるから(-)であり、 pF はサクシジョンの形をとる。サクシジョンとそのときの含水量との関係、すなわち pF -水分曲線を求める試験が pF 試験と呼ばれる。これは2相流パラメータの毛管圧から、水飽和度の関係に等しい。

2.2.2 pF値と適切な試験法

広範な含水比に対して、統一された pF の試験法は、まだ日本の工業規格で採択されておらず、 pF のそれぞれの範囲で図2.2.2-1に示す各種の試験法が使われている。現在は、 $pF \approx 3.0$ に相当する遠心含水当量を求める試験方法（JIS A 1207-1978）が工業規格に定められているのみである。これらの pF 試験法の中でも、低い pF 値を求めるには吸引法、中程度の pF を求めるには遠心分離法、高い pF を求めるには蒸気圧法がよく用いられる。全含水量を通じて統一した試験法が考案されていないから、境界領域の測定値が多少、不連続になるのは避けられないとされている。

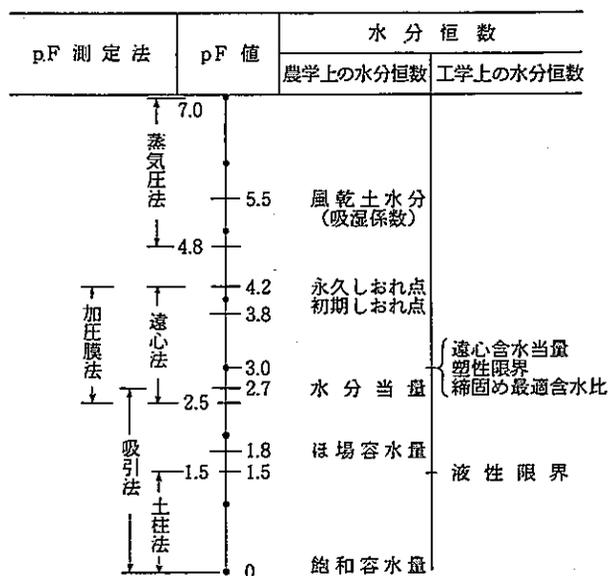


図2.2.2-1 pF試験法とpF値との対応

2.2.3 pF試験法

(1) 吸引法

試料土にある一定の負圧（吸引圧）を与え、水分を吸引させて、試料内の水分との平衡をはかり、その試料のpFを求める方法が吸引法と呼ばれる。吸引法は土柱法と、いわゆる吸引法（水位差により負圧を与える方法）との二つがある。

土柱法は、試料を分離できる多数の円筒に入れ、自由水に連結させ、水で十分に飽和させる。その後、自由水を所定のレベルまで下げ、水分平衡に達せしめる。各円筒中の試料の含水量と、その試料の自由水面からの高さを測定しpF-水分曲線を求める。

吸引法は乱さない土にある一定の負圧を与えて、試料中の水分と平衡させる試験法である。試料中の水分エネルギーと負圧（ $-h\gamma_w$ ）がバランスした時点では、土に保持される水のエネルギーは $pF = \log_{10}H$ である。負圧の与え方には水位差をつけて土中の水を吸引する方法と、試料を大気圧以下に減圧して土中の水を吸引する方法とがある。負圧の段階をいろいろと変えて、その段階に応じた含水量を測定すればよい。

土壌中の水が連続している限り理論的には水柱高10m近くの吸引力（ $pF \approx 3.0$ ）まで測定可能である。

しかし、そのための平衡時間が非常に長くなり、試料からの蒸発やその間の吸引圧の一定保持などの問題が生ずるため、水柱高150~200cm（ $pF = 2.2 \sim 2.3$ ）の吸引圧にとどめるのが実用的である。

(2) 遠心法

遠心法は原理的に吸引法と同じで、吸引法の場合には吸引する力として負圧を利用したものが、遠心法では遠心力を働かせる違いがあるだけである。遠心法は、JIS A 1207-1978の試験法で規格化されている。ただし、JIS法は次の諸点でpF試験と違っているので注意が必要である。(1) $pF \approx 3.0$ を求める試験方法であるが、ある範囲にわたってpF試験をするには、pFを変化させるために遠心力を変えてやらなければならない。(2) 原理的にpFを正しく求めるには、土中の水分は自由水と水理学的につながっていなければならないので、装置中における試料はグーチるつぼを界して自由水と連続させる必要がある。この意味で、必ずしも自由水と連続しているとは限らないJIS A 1207-1978の方法は簡便法ということになる。

(3) 加圧法

加圧法は、試料に排水を促すための圧力差を与える境界の材料として、素焼板を用いるかあるいは

半透膜を利用するかで、加圧板法と加圧膜法とに分けられる。加圧法は密封した試料室に圧力 P_1 （大気圧以上に变化させる）を加え、その試料水分と半透膜（あるいは加圧板）を境にして大気圧 P_0 の自由水とを接続させる。この P_1 と P_0 の圧力差によって水分は P_0 側に流入し、試料中の水分は吸引圧が P_1 に対応する状態で平衡に達する。即ち、吸引法では負圧を与えて試料中の水分を吸引する方法であるが、加圧法は土に任意の正水圧を加えて水圧の低い自由水側に脱水させる方法といえる。

(4) 蒸気圧法

蒸気圧法は、ある一定の相対湿度の空气中に放置した土が保持する水分吸着量を測定し、pF—水分曲線を作るものである。一定温度に保ったデシケーターに入れた既知濃度の溶液によって起こる水蒸気圧のもとで、試料水分の脱着を行わせると、そのときの土の保持する水分は、あるポテンシャル（pF）状態で平衡した水分であるから、この状態でのpFと含水比から比較的高いpF領域のpF—水分曲線を定めることができる。各種溶液の相対湿度を表2.2.3-1～2に示す。

表2.2.3-1 各種飽和溶液の相対湿度とpF⁴⁾

塩	湿度%	pF	塩	湿度%	pF
CaSO ₄ · 5H ₂ O	98	4.46	NH ₄ Cl · KNO ₂	72.6	5.65
Pb(NO ₃) ₂	98	◇	NaNO ₂	66	5.76
Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O	95	4.85	Mg(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ · 4H ₂ O	65	5.77
NH ₄ H ₂ PO ₄	93.1	5.00	Na ₂ Cr ₂ O ₇ · 2H ₂ O	52	5.95
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	90	5.16	NaHSO ₄ · H ₂ O	52	◇
KHSO ₄	86	5.31	CrO ₃	35	6.16
(NH ₄) ₂ SO ₄	81.0	5.46	CaCl ₂ · 6H ₂ O	32.3	6.19
NH ₄ Cl	79.2	5.51	KC ₂ I ₃ O ₂	20	6.35

表2.2.3-2 硫酸水溶液上空気の相対湿度

H ₂ SO ₄ %	0℃	25℃	50℃	H ₂ SO ₄ %	0℃	25℃	50℃
0	100.0	100.0	100.0	45	44.0	46.8	49.5
5	98.4	98.5	98.5	50	33.6	36.8	39.9
10	95.5	96.1	96.3	55	23.5	26.8	30.0
15	92.4	92.9	93.4	60	14.6	17.2	20.0
20	87.8	88.5	89.3	65	7.8	9.8	12.0
25	81.7	82.9	84.0	70	3.9	5.2	6.7
30	73.8	75.6	77.2	75	1.6	2.3	3.2
35	64.6	66.8	68.9	80	0.5	0.8	1.2
40	54.2	56.8	59.3				

2.3 不飽和透過特性試験

平成5年度の子備的調査によって、低透水性岩盤、粘土物質等に対する2相流特性データは、処分場におけるガス発生の影響を評価するためには著しく不足することが明らかとなった。したがって、本研究においても今年度より特性試験を行い、これら評価上不足する特性データの取得に着手することとした。

2.1節における調査においても、これまで石油資源開発分野で2相流解析の対象となっていた石油の貯留層など、比較的透過性の大きい岩盤が主な測定対象となっていることが示された。したがって、本年度はこれまでの実績からこれらの技術を大きな問題なく適用可能な範囲の透過性を有する材料について測定を実施することとした。

2.3.1 地層

本年度は透過性の大きい砂岩2種類と凝灰岩について比重、間隙率、毛圧管、及び飽和/不飽和での透過係数を測定した。

(1) 測定概要

通常の測定方法を用いた場合、低透水性材料では、透過係数の算定に必要な一定の流出量に達するまでに相当の時間がかかるため、本研究では測定時間の短いトランジェントパルス法を採用することとした。

測定装置の概念図及び外観を図2.3.1-1, 2に示す。

測定方法は確認のため定常法とトランジェントパルス法を併用するものとした。

間隙率の測定は水銀ポロシメータ又は比重法によるものとした。間隙水の飽和度については、砂岩は一定の相対温度中に保持することで、対応する飽和度が得られるとの経験則に基づいて試料を調整し、重量法により飽和度の測定を行った。

また、ガスの透過特性試験についてはHeを使用した。

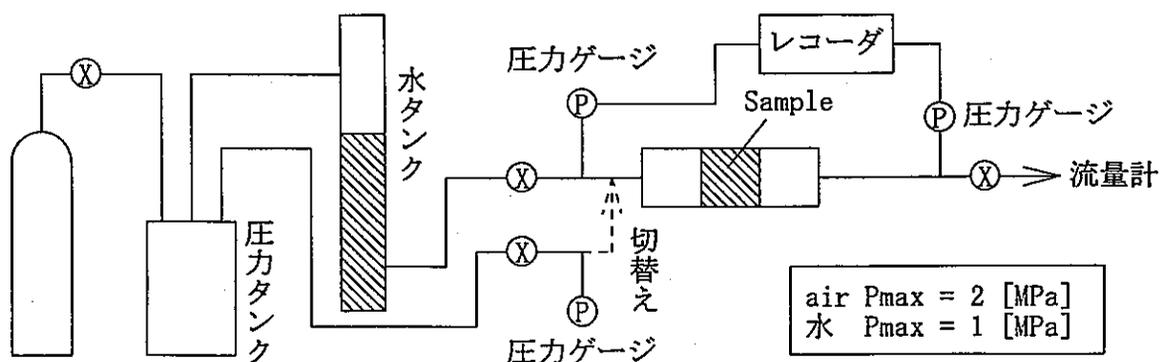


図2.3.1-1 透過性試験装置概念図

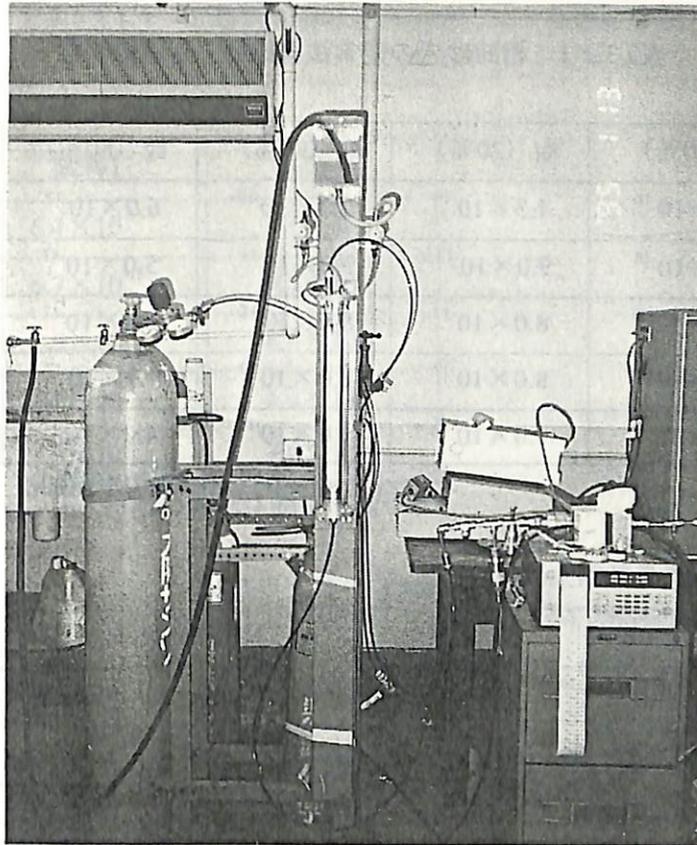


図2.3.1-2 トランジェントパルス/定圧測定装置外観

(2) 定常法による測定

以下に相浦砂岩、三池砂岩及び東濃凝灰岩に対する飽和/不飽和透過試験結果を示す。

定常法は圧入圧力を一定として流出する流体の容積を測定する手法である。以下ここで用いた透過係数の算出式を示す。

$$k_g = 2QL \mu / A (P^2 - 1)$$

$$K_L = QL \mu / A (P - 1)$$

ここで、

Q：体積流量 (cc/sec) μ ：粘性係数：0.0195 (cp), 水：1.002 cp

L：試料の長さ (cm) k_g ：ガス測定で得られた透過係数

A：試料断面積 (cm²) K_L ：水測定で得られた透過係数

P：圧入圧力 (atm)

a. 相浦砂岩

表2.3.1-1 相浦砂岩の定常法測定による透過係数

[m²]

上流側圧力 [MPa]	kg (0%)	kg (20%)	kg (40%)	kg (80%)
0.1	4.6×10^{-16}	1.3×10^{-16}	1.3×10^{-16}	6.0×10^{-17}
0.2	4.3×10^{-16}	9.0×10^{-17}	9.0×10^{-17}	5.0×10^{-17}
0.3	3.9×10^{-16}	8.0×10^{-17}	8.0×10^{-17}	4.0×10^{-17}
0.4	5.2×10^{-16}	8.0×10^{-17}	8.0×10^{-17}	4.0×10^{-17}
0.5	4.8×10^{-16}	1.0×10^{-16}	1.0×10^{-16}	4.0×10^{-17}

() 内の数値は間隙水飽和度

上流側圧力 [MPa]	透過係数KL[m ²]
0.5	8.0×10^{-17}
1.0	1.1×10^{-16}

真比重 2.69

間隙率 7.5%

b. 三池砂岩

表2.3.1-2 三池砂岩の定常法測定による透過係数

[m²]

上流側圧力 [MPa]	kg (0%)	kg (20%)	kg (40%)	kg (80%)
0.1	2.5×10^{-15}	1.3×10^{-15}	1.0×10^{-15}	1.1×10^{-16}
0.2	1.9×10^{-15}	1.3×10^{-15}	1.0×10^{-15}	1.0×10^{-16}
0.3	1.7×10^{-15}	1.1×10^{-15}	1.0×10^{-15}	1.7×10^{-16}
0.4	1.6×10^{-15}	9.0×10^{-16}	0.9×10^{-16}	2.5×10^{-16}
0.5	1.5×10^{-15}	8.1×10^{-14}	0.8×10^{-16}	3.0×10^{-16}

() 内の数値は間隙水飽和度

上流側圧力 [MPa]	透過係数KL[m ²]
0.05	5.4×10^{-16}
0.1	8.2×10^{-16}

真比重 2.71

間隙率 8.1%

c. 東濃凝灰岩

表2.3.1-3 東濃凝灰岩の定常法測定による透過係数

[m²]

上流側圧力 [MPa]	kg (0%)	
	試料1	試料2
0.1	6.4×10^{-15}	9.3×10^{-15}
0.2	6.7×10^{-15}	9.0×10^{-15}
0.3	7.0×10^{-15}	8.6×10^{-15}
0.4	7.5×10^{-15}	8.2×10^{-15}
0.5	7.8×10^{-15}	7.9×10^{-15}

() 内の数値は間隙水飽和度

[m²]

上流側圧力 [MPa]	KL(100%)	
	試料1	試料2
0.14	6.7×10^{-16}	7.1×10^{-16}
0.27	5.0×10^{-16}	6.2×10^{-16}
0.48	4.6×10^{-16}	5.6×10^{-16}

() 内の数値は間隙水飽和度

真比重2.73

間隙率38.1%

なお、本試験に用いた試料は含水させることにより崩壊する部分が見られたため、端部にポーラストーンを挿入して試験を行ったが、不均質性の影響を明らかにするためには、今後複数サンプルでの試験が必要と思われる。

(3) トランジェントパルス法による測定

(a) 測定原理

トランジェントパルス法は供試体端面の両側に圧力貯留部を接続し、この一方の貯留部の圧力をもう一方の貯留部の圧力よりも Δp だけ瞬時に増加させ、その後の時間経過にともなう圧力減少から透水係数を求める方法であり、その基本的な試験方法の概念は図2.3.1-3に示すとおりである。このような構造を有する試験装置より得られた実験データから透水係数を求める場合、岩石供試体内の間隙（比貯留量）は非常に小さいものとし、これらを無視して透水係数を求める方法¹⁾ (Braceらの方法) と、この間隙を考慮して透水係数を求める方法²⁾ (Hsiehらの方法) があり、本研究においては前者を用いて測定を行った。以下にその方法について述べる。

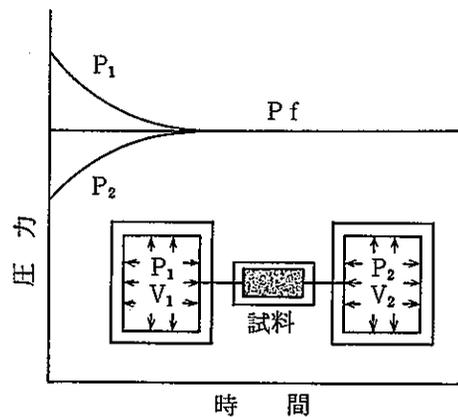


図2.3.1-3 トランジェントパルス法の測定原理

a. Braceらの理論式

試験片の両端に容積 V_1 、 V_2 の蓄圧器を設置し、これらの圧力 P_1 、 P_2 、初期圧力を P_0 とする。このとき、時間 $t=0$ において P_1 を ΔP だけ増加させると、試験片内に流体移動が生じ、時間の経過とともに P_1 は減少し P_2 は増加して、ついには P_1 、 P_2 ともに一定値 P_f に収束するとしている。

Braceらは、この P_1 の減衰曲線を数式化するために、多孔質媒体を流れる圧縮性流体の一次流れについて考えている。多孔質媒体内の流れを一般化した法則として、浸透流の流速が小さいとき次のダルシーの法則が成立するとされている。

$$Q = - \frac{K_L A}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \text{----- (1)}$$

Q : 断面積 A を流れる流量 (cm^3/sec)

μ : 静粘性係数 (cPs)

k_g : 水の透過係数 (darcy)

dp/dx : 圧力勾配 (atm/cm)

微小距離 dx の位置にある微小立方体の断面を流れる流体の流量を以下に示す。

$$dQ = - \frac{K_g A}{\mu} \cdot \frac{d^2 p}{dx^2} dx \text{----- (2)}$$

一方、微小立方体内で時間 dt に発生する流量は、流体の圧縮率を β 、試料の長さを L 、試料の中の空隙の全体積を V_P とすると

$$dQdt = \frac{d}{dt} \frac{V_p dx}{L} dt + \frac{V_p dx}{L} \beta \frac{dp}{dt} dt \quad \text{----- (3)}$$

ここで間隙率を η とすると、(2)、(3) 式から (4) 式が得られる。

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = \frac{\mu}{kg} \left(\frac{dn}{dt} + \beta n + \frac{dp}{dt} \right) \quad \text{----- (4)}$$

間隙率は流体の圧力によってのみ変化するとし、岩石マトリックスの圧縮率を β_s 、外圧の増加による間隙率の増加を $d\eta_s$ とすると、内部圧の上昇が ΔP のとき、間隙率の変化は (5) 式で表せる。

$$dn = -n\beta_g dp - d\eta_g \quad \text{----- (5)}$$

岩石のマトリックスと空隙を含めた試験片全体の圧縮率を β_{eff} とすれば

$$d\eta_g = (\beta_g - \beta_{eff}) dp \quad \text{----- (6)}$$

(4)、(5)、(6) 式より (7) 式を得る。

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = \frac{\mu\beta}{kg} \left(\frac{\beta_{eff} - \beta_g}{\beta} + n \left(1 - \frac{\beta_g}{\beta} \right) \right) \frac{dp}{dt} \quad \text{----- (7)}$$

$\eta \ll 1, \beta \gg \beta_{eff}, \beta \gg \beta_s$ と仮定すれば

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = 0 \quad \text{----- (8)}$$

となる。

したがって、試験片内の圧力勾配は一定であり、試験片内の空隙が中央に集中しているようなモデル (図2.3.1-4) を考え、P1 の減衰曲線を考えている。

図における V_1, V_2 はそれぞれ配管系を含めた蓄圧器の容積、 V_R は試験片のマトリックスの体積、 A, L はそれぞれ試験片の断面積、長さである。

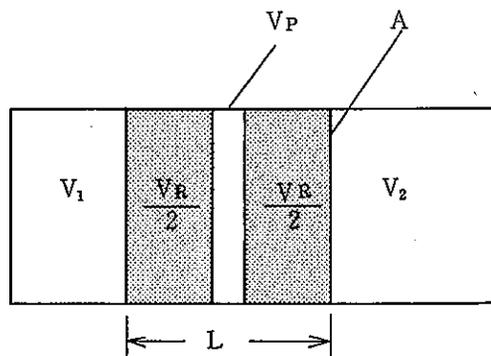


図2.3.1-4 Brace3の岩石モデル

ここで、 V_1 、 V_2 の蓄圧器内の圧力をそれぞれ P_1 、 P_2 、試験片の空隙内の圧力を P_R とすれば、ダルシーより(9)式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{dp_1}{dt} &= -x \frac{V_R}{(2V_1) \cdot (P_1 - P_R)} \\ \frac{dp_2}{dt} &= -x \frac{V_R}{(2V_2) \cdot (P_2 - P_R)} \\ \frac{dp_R}{dt} &= -x \frac{V_R}{(2V_P) \cdot (P_1 + P_2 + 2P_R)} \\ x &= \frac{4kg}{\mu\beta L^2} \end{aligned} \quad (9)$$

但し、数式9-4

(9)式において、初期条件 $t=0$: $P_1 = P_1 (P_0 + \Delta P)$,

$P_R = P_0$, $P_2 = P_0$,

$V_P \ll V_1, V_2, V_R$ として P_1 について解くと以下の式を得る。

$$P_1 - P_{1t} = P \left(\frac{V_2}{V_1 + V_2} \right) \exp(-\alpha t) \quad (10)$$

但し、

$$\alpha = \frac{kg}{\mu\beta L} \cdot \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \quad (11)$$

$$\ln(P_1 - P_{1t}) = \ln \left(\frac{PV_2}{V_1 + V_2} \right) - \alpha t \quad (12)$$

(12)より時間 t と $\ln(P_1 - P_{1t})$ のグラフの傾きを α を求めることにより透過係数 K_2 を算定することができる。わかる。

即ち

$$kg = \alpha \beta \mu \frac{L}{A} \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_2} \quad (13)$$

のように示すことができる。

(b) 測定結果

a. 相浦砂岩

以下に対する飽和/不飽和透過係数の測定結果を示す。

表2.3.1-4 相浦砂岩のトランジェントパルス法による透過係数

[m²]

上流側圧力 [MPa]	kg (0%)
0.2	5.9×10^{-16}
0.4	5.9×10^{-16}
0.6	6.6×10^{-16}
0.8	7.6×10^{-16}

[m²]

上流側圧力 [MPa]	kg (20%)	kg (40%)	kg (90%)
1	—	—	—
3	—	—	—
5	5.0×10^{-16}	4.7×10^{-16}	3.0×10^{-17}
10	4.3×10^{-16}	2.5×10^{-16}	7.0×10^{-17}

[m²]

上流側圧力 [MPa]	KL(40%)	KL(100%)
1	—	4.0×10^{-17}
3	—	1.0×10^{-16}
5	5.9×10^{-15}	2.2×10^{-16}
10	4.0×10^{-17}	2.4×10^{-16}

() 内の数値は間隙水飽和度

b. 三池砂岩

表2.3.1-5 三池砂岩のトランジェントパルス法による透過係数

[m²]

上流側圧力 [MPa]	kg (0%)	kg (20%)	kg (40%)	kg (50%)
0.1	2.4×10^{-16}	—	—	—
0.3	2.5×10^{-16}	—	—	9.0×10^{-17}
0.5	2.8×10^{-16}	3.1×10^{-16}	1.5×10^{-16}	9.0×10^{-17}
1.0	2.3×10^{-16}	1.9×10^{-16}	2.0×10^{-16}	—

[m²]

上流側圧力 [MPa]	KL (40%)	KL(100%)
0.1	—	—
0.3	—	—
0.5	6.0×10^{-17}	2.7×10^{-16}
1.0	1.3×10^{-17}	1.1×10^{-16}

c. 東濃凝灰岩

表2.3.1-6 東濃凝灰岩のトランジェントパルス法による透過係数

[m²]

上流側圧力 [MPa]	kg (0%)		kg (40%)		kg (80%)		KL(100%)	
	試料1	試料2	試料1	試料2	試料1	試料2	試料1	試料2
0.21~0.25	7.8×10^{15}	7.4×10^{15}	5.6×10^{15}	5.5×10^{15}	5.6×10^{16}	4.3×10^{16}	2.5×10^{15}	3.1×10^{15}

(4) 測定結果のまとめ

(a) 基礎物性

各試料に対する比重、間隙率、比表面積、飽和時の透過係数（絶対透過係数）を表2.3.1-7に示す。

表2.3.1-7 各試料の基礎物性

試料名	見掛比重 [-]	真比重 [-]	間隙率 [%]	比表面積 [m ² /g]	kg ^{*2} [m ²]	KL [m ²]
相浦砂岩	2.49	2.69	7.49	1.88	4.6×10^{-16}	1.1×10^{-16}
三池砂岩	2.46	2.71	8.1	2.87	2.5×10^{-16}	8.2×10^{-16}
東濃凝灰岩	1.70	2.73	38.0 ^{*1}	—	$64 \sim 9.3 \times 10^{15}$	$6.7 \sim 7.1 \times 10^{16}$

*1 比重法

*2 Heにて測定

*3 トランジェントパルス法

(b) 相対透過係数モデル

2相流解析を行う場合には、不飽和時の透過係数を、飽和時の透過係数（絶対透過係数との比である相対透過係数）に変換し、この相対透過係数と飽和度との関係を関数として表わす必要がある。したがって、ここでは次章で2相流解析を行う際に用いる東濃凝灰岩に対して、試験結果を基に相対透過係数と飽和度との関係を検討し、これまで提案、適用されている代表的関数モデルの中から最も適合する関数を選定すると共にパラメータ値を設定した。

検討対象とした関数モデルを図2.3.1-5に示す。またカーブフィッティングの結果を図2.3.1-6に示す。

図2.3.1-6に示すように凝灰岩の相対透過係数はCoreyモデルに従うものとし、水及びガスの残留飽和度はそれぞれ0.31, 0とした。

Corey のモデル

$$K_{rl} = (S^*)^4$$

$$K_{rg} = (1-S^*)^2(1-(S^*)^2)$$

$$S^* = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{sr})$$

Corey 変形モデル

$$K_{rl} = (S^*)^{10}$$

$$K_{rg} = (1-S^*)^3(1-(S^*)^3)$$

Brooks & Corey のモデル

$$K_{rl} = S^{*(2+3\lambda)/\lambda}$$

$$K_{rg} = (1-S^*)^2(1-S^{*(2+\lambda)/\lambda})$$

SANDIA モデル

$$K_{rl} = S^{*1/2} (1 - (1 - S^{*1/\lambda})^\lambda)^2$$

$$K_{rg} = 1 - K_{rl}$$

K_{rl} : 水の相対透過係数[-]

K_{rg} : ガスの相対透過係数[-]

S_l : 間隙水飽和度[-]

S_{lr} : 残留飽和度 (水) [-]

S_{sr} : 残留飽和度 (ガス) [-]

λ : 細孔径分布パラメータ[-]

図2.3.1-5 相対透過係数モデル

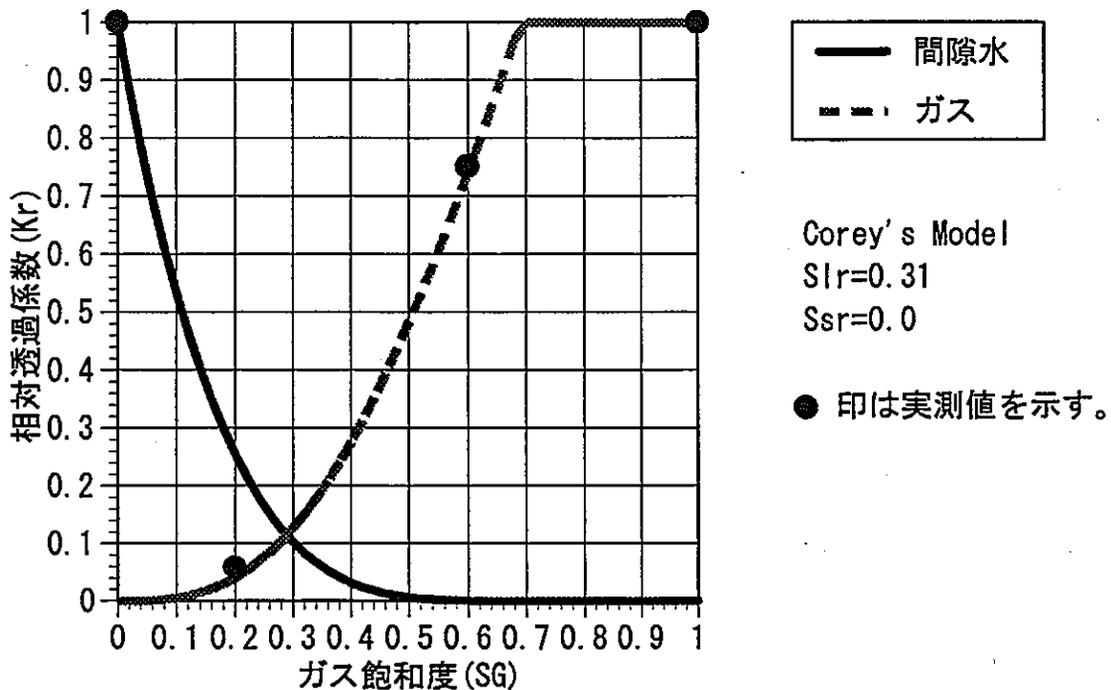


図2.3.1-6 東濃凝灰岩の相対透過係数

2.3.2 粘土材料

本年度は、これまで測定例の少ない粘土材料としてベントナイト/砂混合材料について予備的な試験を行った。

(1) 測定概要

粘土材料についても2.3.1に記載した装置、手法にて測定を行った。但し、間隙率については、湿润時に膨潤するベントナイトに対して水銀圧入法では信頼性の高い間隙率は得られないと考え、測定は次年度以降に行うこととした。

また、ガスの透過性試験についてHeを使用している。

試料は粘土物質としてクニゲルV1を、また混合材として粒径 $210\mu\text{m}$ 以下の砂粒を用い、混合比は重量比でベントナイト/砂=20/80に調合した。混合した材料はモールド中で約15MPaの圧力で圧密させ、比重を約1.8の試料を作成した。この試料を約1昼夜水に浸漬させることで含水させ、これを飽和度100%として、他の飽和度の試料は重量法により飽和度を算定した。

(2) 定常法による測定

以下にベントナイト/砂混合材料の飽和/不飽和透過特性を示す。算定式、定数は2.3.1の地層物質に対するものと同様である。

表2.3.2-1 ベントナイト/砂混合材料の定常法測定による透過係数

[m^2]

上流側圧力 [MPa]	kg (0%)	kg (20%)	kg (40%)
0.13	9.8×10^{-14}	7.9×10^{-14}	5.9×10^{-14}
0.17	9.5×10^{-14}	8.2×10^{-14}	6.1×10^{-14}

(3) トランジェントパルス法による測定

以下にベントナイト/砂混合材料の透過特性を示す。算定式、定数は2.3.1の地層物質に対するものと同様である。

表2.3.2-2 ベントナイト/砂混合材料のトランジェントパルス法による透過係数

上流側圧力 [MPa]	KL(100%)
0.18	3.4×10^{-15}

以上に示した結果は、1.1.2に示したベントナイト含有率20%のベントナイト/砂混合材料に対する試験結果と比較して、水の透過係数、ガスの透過係数とも2桁ほど大きい値を示している。本試験で

は水中への浸漬期間が約1昼夜と短く、含水湿潤が不均一であったことも予測され、また、使用した試験装置が、拘束圧をかけられない一軸試験装置であったことから、モールド側壁での流路の形成が生じた恐れもあり、今後さらに確認のための試験が必要と考えられる。

(4) 測定結果のまとめ

前述のように供試体は20cut%のクニゲルV1と80cut%の砂粒子（粒径 $210\mu\text{m}$ 以下）の混合物であり、約15MPaの一軸圧縮により、見かけ比重1.8に調整した。また、間隙率については、水銀圧入法による測定が間隙構造の変化を生じる恐れがあることから、適当でないとの判断より、本年度は間隙率の測定は行わなかった。

ここでは相対透過係数と飽和度との関係を代表的な関数モデルへの適合について検討し、パラメータ値の設定を行った。検討対象とした関数モデルは図2.3.1-5に示した。

カーブフィッティングの結果を図2.3.2-1に示す。同図に示すようにベントナイト/砂混合物の相対透過係数はCoreyモデルに従うものとし、水及びガスの残留飽和度はそれぞれ0.185, 0とした。

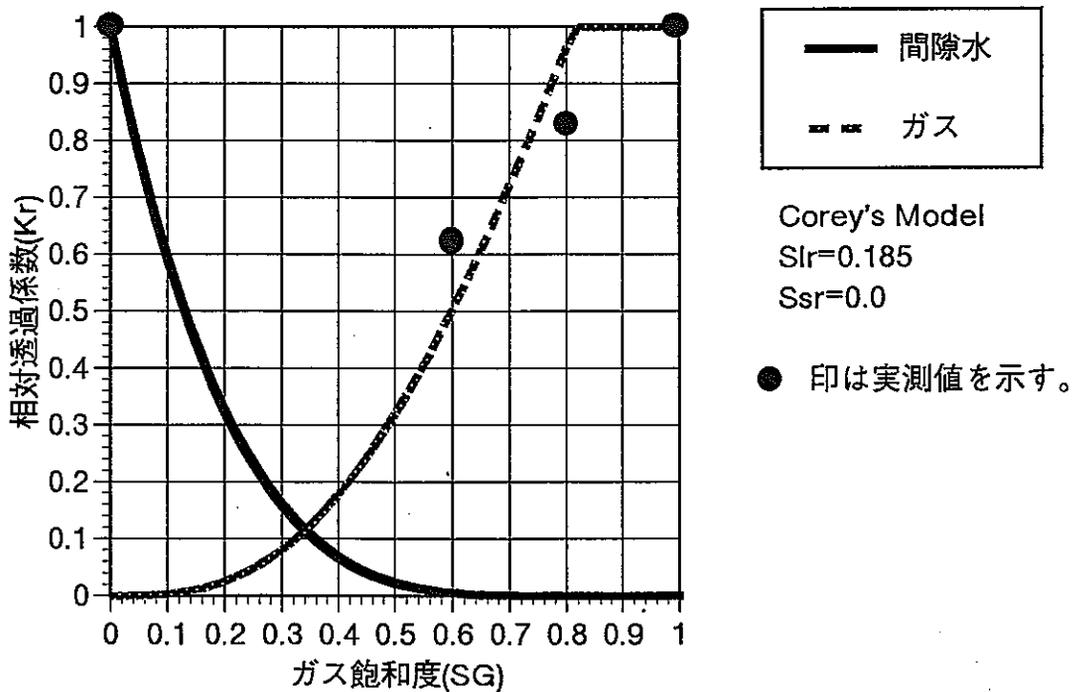


図2.3.2-1 ベントナイト/砂の相対透過係数

2.3.3 充填材

処分場に充填する材料としては、セメント/コンクリート系材料が一般に検討されている。充填材として用いるコンクリート材については、2.1.3で述べた相対浸透率の測定技術を適用した。測定対象とするセメント/コンクリート材料としては、スイス、イギリス等の低/中レベル廃棄物の地層処分

概念では、ガスの浸透が容易なポーラスコンクリートの適用が、検討されており、透気性の高い充填材の特性について把握しておくことは重要であると考えられたところから、ポーラスコンクリートを選定した。

(1) 測定概要

現在、収水管、透水壁の材料として生産されているポーラスコンクリートの透水性は、 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ [m/s] ($10^{-10} \sim 10^{-9}$ [m²] 又は $10^2 \sim 10^3$ [darcy]) と非常に高いものであり、相対浸透率は困難であると考えられた。そこで、相対浸透率の測定が比較的容易な $10 \sim 10^3$ の透過性を有するポーラスコンクリートを試作し、これを測定対象とした。ポーラスコンクリートは、約 $50 \times 200 \times 300$ [mm] のボード状に形成されたものから 38×70 [mm] のコアを抜くことにより円柱状の供試体を作製して用いた。相対浸透率測定装置、及び測定対象とした試料を図2.3.3-1、-2に示す。また、測定手順は2.1.3 (4) に示す通りである。

(2) 測定結果

(a) 基礎物性

相対浸透率の測定評価に先立ち、以下の基礎物性を測定した。なお、間隙率はHe間隙率測定装置によった。結果を表2.3.3-1に示す。

表2.3.3-1 ポーラスコンクリート試料の基礎物性

見掛比重 [-]	真比重 [-]	間隙率 [%]	Kg [m ²]	KL [m ²]
1.86~1.94	2.56	24.5~27.3	7.0×10^{-12} 1.0×10^{-11}	2.2×10^{-12}

(b) 相対透過係数

2相流解析の入力データとするため、測定されたガス、水の透過係数を相対透過係数に交換し、飽和度との関係を図2.3.3-3に示した。また、図2.3.1-5に示した関数モデルについてカーブフィッティングを行った。その結果、ポーラスコンクリートの相対透過係数モデルはCoreyモデルの指数を変えることにより、図2.3.1-5のCorey変形モデルとし、水及びガスの残留飽和度をそれぞれ0.44、0とすることで近似できるものとした。

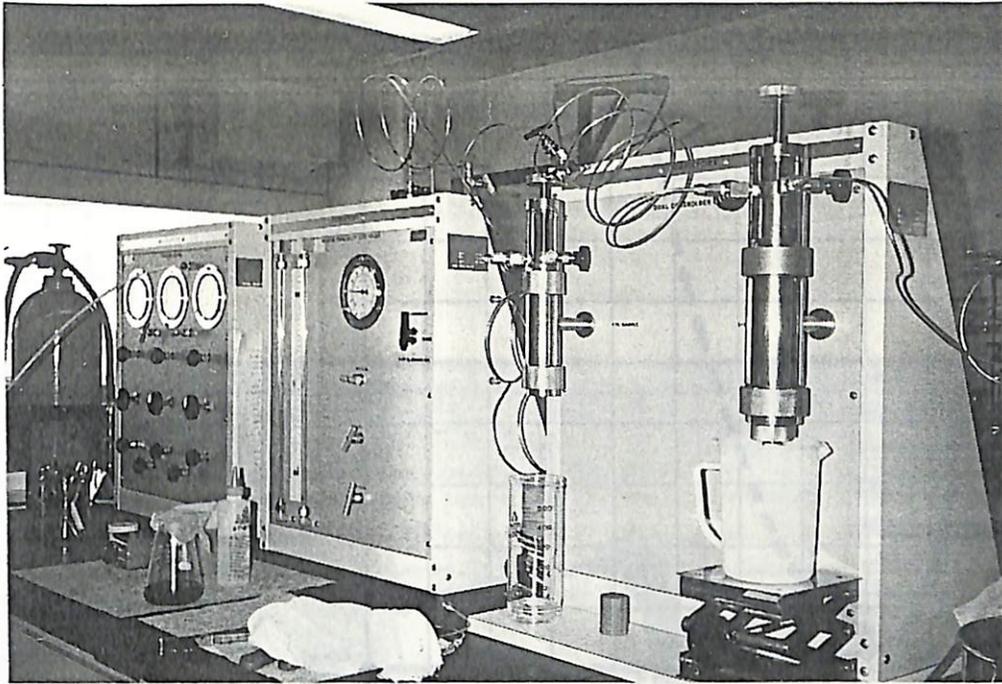


図2.3.3-1 相対浸透率測定装置

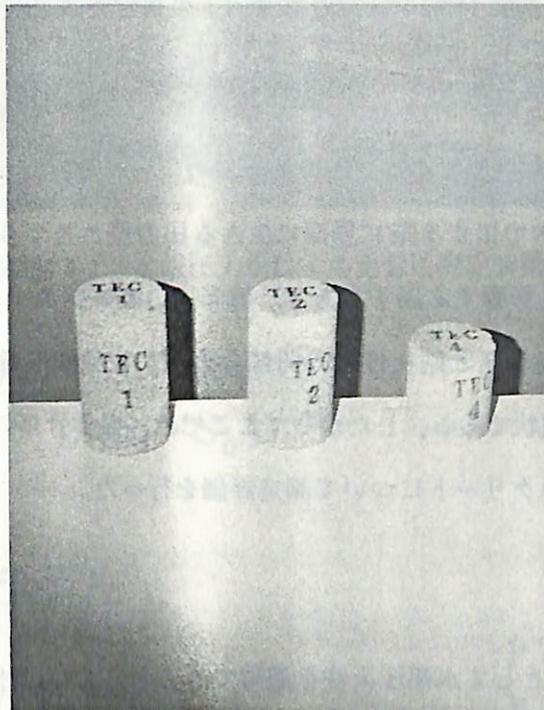


図2.3.3-2 ポーラスコンクリート試料

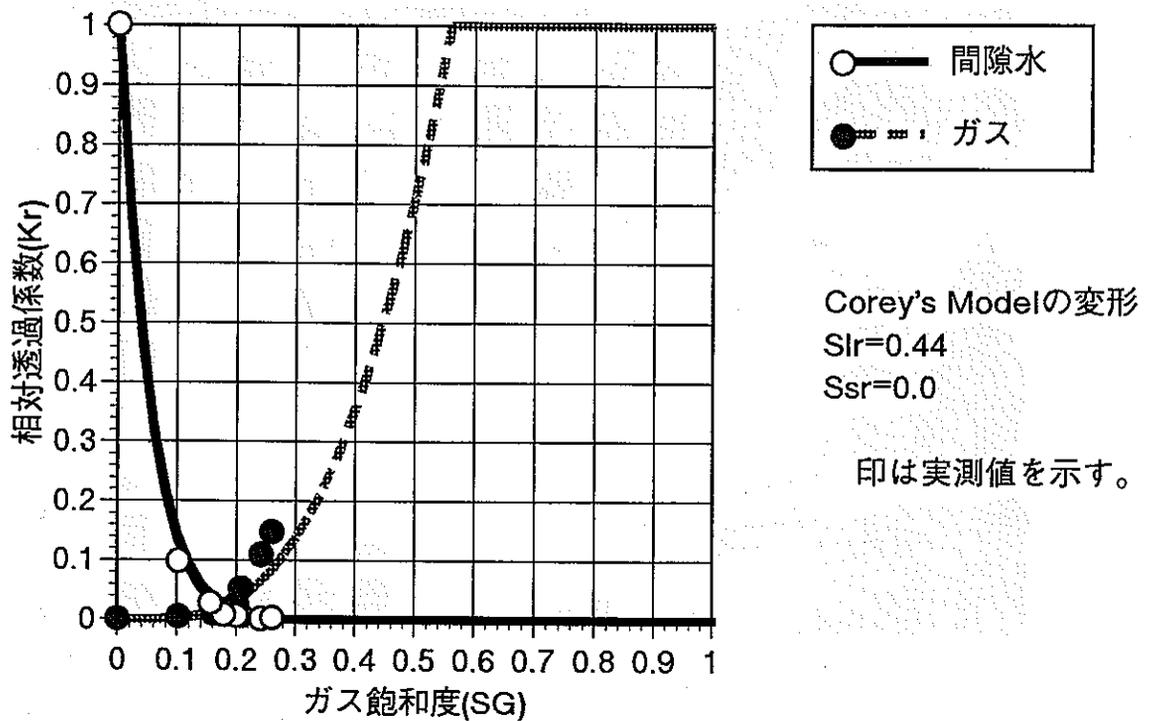


図2.3.3-3 ポーラスコンクリートの相対透過係数

2.4 毛管圧特性試験

2相流パラメータのうち、最も重要であり、かつ測定例の限られるパラメータに毛管圧特性がある。毛管圧は気相と液相が毛細管内で接する際に界面に生じる圧力差として現われ、これが大きい状況下においてはガスの移行に大きく影響する因子である。昨年度の調査結果^上りで述べたように、相対透過係数と飽和度との関係より、毛管圧と飽和度との関係を予測する手法も検討されているが、一般的な関係は見出されていないのが現状である。したがってここでは、媒体骨格の比較的強固と考えられる、東濃凝灰岩、及びポーラスコンクリートについて測定評価を行った。

2.4.1 地層

(1) 測定概要

本年度は毛管圧の測定方法として水銀圧入法を適用することとした。水銀圧入法は、水銀の圧入圧力と注入力との関係から、各飽和度における間隙径を算定し、間隙径分布を測定する技術である。毛管圧はこの水銀圧入圧力を空気水系の毛管圧に換算して評価する。測定評価手法は2.1.3(5)に記述した通りである。水銀圧入法による毛管圧測定装置の例を図2.4.1-1に示す。

(2) 測定結果

毛管圧も不飽和透過係数と同様に、2相流解析に用いる場合には、飽和度の関数として表現してやる必要がある。これまでに提案されている代表的な毛管圧モデルを図2.4.1-2に示す。

東濃凝圧岩に対する毛管圧算定結果を図2.4.1-3に示す。

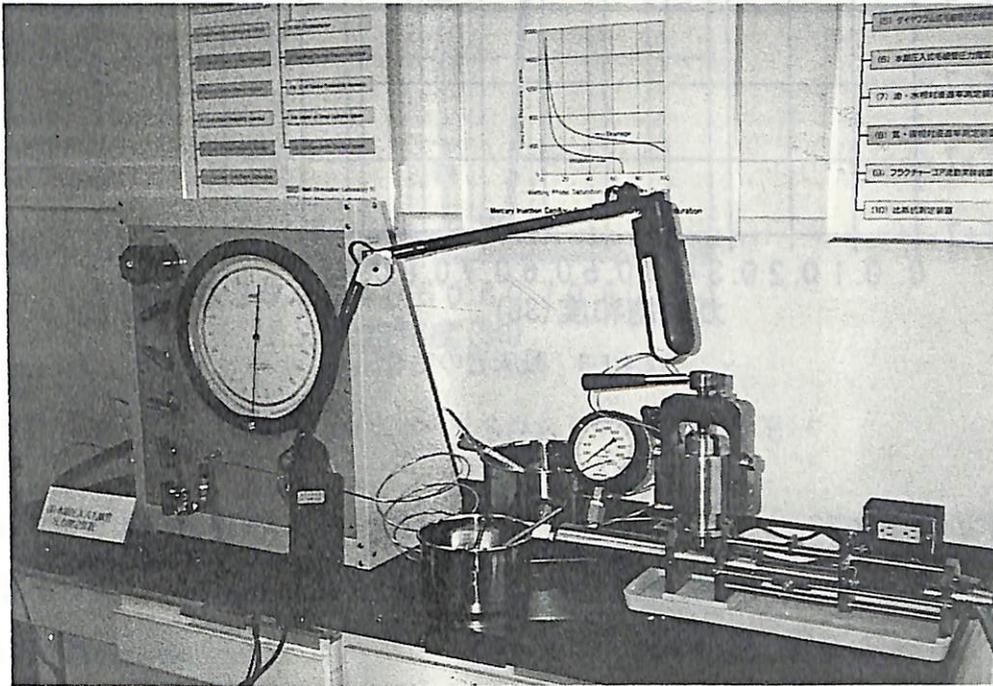


図2.4.1-1 水銀圧入法による毛管圧測定装置

Narasimhan のモデル (TRUST model)

$$P_c = -P_e - P_o \left(\frac{1 - S_l}{S_l - S_{lr}} \right)^{1/\eta}$$

Brooks & Corey のモデル

$$P_c = -P_e / S^{*1/\lambda}$$

$$S^* = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{sr})$$

P_c : 毛管圧 [Pa]

P_e : 毛管排除圧 [Pa]

S_l : 間隙水飽和度 [-]

S_{lr} : 残留飽和度 (水) [-]

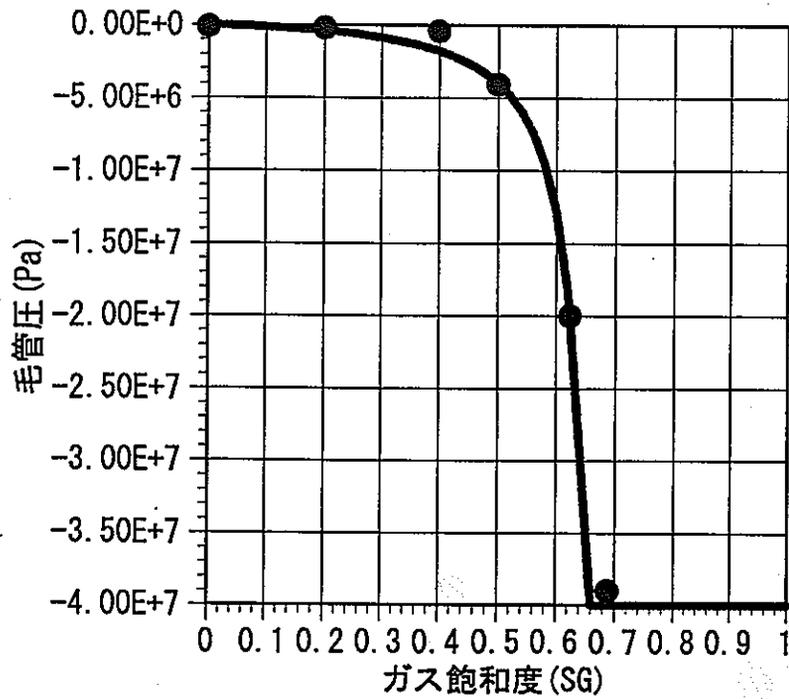
S_{sr} : 残留飽和度 (ガス) [-]

λ, η : 細孔径分布パラメータ [-]

SANDIA モデル

$$P_c = P_o (S^{*1/\lambda} - 1)^{1-\lambda}$$

図2.4.1-2 毛管圧モデル



Narasimhan Model
 $P_0=1.2E+06$
 $S_{lr}=0.31$
 $R_{am}=0.80$
 $P_e=2.0E+03$

● 印は実測値を示す。

図2.4.1-3 凝灰岩の毛管圧

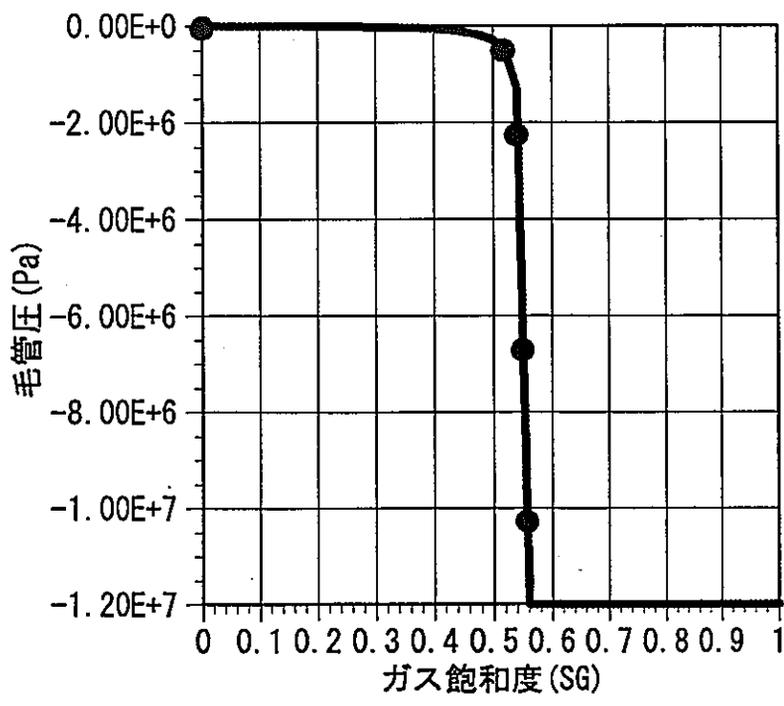
2.4.2 充填材

(1) 測定概要

採用した測定評価手法は、地層と同様である。

(2) 測定結果

水銀圧入法によるポーラスコンクリートの毛管圧測定結果を、図2.4.2-1に示す。毛管圧モデルとのカーブフィッティングは、 $P_0=2.1 \times 10^4$ [MPa]、毛管排除圧0 [MPa]、水の残留飽和度0.44、 $\eta = 0.80$ とすることで、Narasimhanモデルで記述できることが明らかとなった。



Narasimhan Model
 $P_0=2.1E+04$
 $S_{lr}=0.44$
 $E_t=0.80$
 $P_e=0.0$

印は実測値を示す。

図2.4.2-1 ポーラスコンクリートの毛管圧

同図に示したように、算定された毛管圧は、 $P_0=1.2 \times 10^6$ [MPa]、毛管排除圧 2.0×10^3 [MPa]、水の残留飽和度0.31、 $\eta = 0.80$ とした場合にNarasimhanモデルで近似できるものとした。

2.5 まとめと今後の課題

相対透過係数及び毛管圧と間隙水飽和度との関係を始めとする2相流パラメータの測定評価手法について、石油資源開発分野及び土質工学分野で実施されている手法を調査し、それらの手法がバリア材料の2相流特性試験に適用しうることを見出した。

本年度は、測定対象として、北上地域花崗岩、東濃凝灰岩、ポーラスコンクリート、ベントナイト/砂混合材について、不飽和透過係数、毛管圧の測定を中心とした特性試験を実施した。その結果、トランジェントパルス法を用いたガスの不飽和透過係数の測定方法が適用可能であることが確認された。

但し、粘土物質に対する、毛管圧の測定方法、間隙水飽和度の評価、確認方法についてはさらに検討が必要であることが明らかとなった。さらに、低透水性材料に対する透過特性については、3軸透過試験の可能な装置により拘束圧を付加して測定する必要があることが判明し、今後、この要求に適合した試験装置を適用した試験を行うこととした。

第 3 章

3. 処分場ガスの蓄積，及び不飽和移行に対する評価

TRU廃棄物処分場内及びその近傍におけるガス，間隙水の移行については，平成4年度に2相流解析コード「TOUGH」を用いることにより，空気特性値を使用してガスの発生・移行に関する概略的な試算を行った。平成5年度は同様に「TOUGH」を用いることにより，重力の効果等を反映したより現実的な条件において解析を行うと共に，主要なパラメータについて感度解析を実施した。

平成6年度は処分場内の金属の腐食，微生物活動によって発生すると考えられている H_2 ， CO_2 ガスについて，その移行挙動に影響を及ぼすと考えられる粘度，あるいは水に対する溶解度等各気体に固有の物性値を反映した評価が可能な2相流解析コード「TOUGH2」を新たに適用した。これによりさらに現実的な条件での評価を行い，ガスの蓄積，移行とそれによる地下水流への影響を評価した。

3.1 評価条件の設定

平成5年度の感度解析において適用した「TOUGH」コードと今年度の解析で適用する「TOUGH2」コードは同一の物質移行，熱移行に対する基本モデルを用いる。図3.1-1にTOUGH2で採用された2相流，熱移動の基本モデルを示す。

評価条件については昨年度設定した処分概念を対象として，解析上の幾何モデル，初期条件，境界条件，及び2相流パラメータを初めとする各種特性データについて必要な箇所を見直し，評価に用いるパラメータ値を設定した。

3.1.1 幾何モデル

本年度解析対象とする処分施設概念はボルトタイプである。以下に施設概念を示す。

(1) 処分施設概念

処理後の廃棄体は200ℓドラム缶あるいはハル缶に充填固化され，さらに1辺210cmの直方体形状のコンクリート容器に収納した後コンクリートを充填してモノリス化される。処分施設にはこのようなモノリスの形態で搬入され，高さ2m，幅13mの幌型断面のボルト内に4列4段に積み重ねられ定置されるものとした。モノリスの周囲には1mから2mの厚さの粘土系材料を用いた緩衝材が設置される。したがって，性能評価上考慮する人工バリアは廃棄体，モノリスの充填コンクリート，及び粘土系材料による緩衝材の3種類である。

ボルトタイプの施設概念と処分施設内における廃棄物の定置状況を図3.1.1-1～3に示す。

基本モデル

質量/エネルギー 収支

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^{(k)} dy = \int_{\Gamma_n} F^{(k)} \cdot n d\Gamma + \int_{V_n} q^{(k)} dy \quad - (1)$$

(k ; 1=水, 2=空気, 3=熱)

ここで

$$M^{(k)} = \phi \sum_{\beta=1, g} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^{(k)} \quad (k=1, 2) \quad - (2)$$

ϕ ; 間隙率 S_{β} ; 飽和度

$X_{\beta}^{(k)}$; 質量分率 ρ_{β} ; 密度

(β ; 1=液相, g =気相)

$$M^{(3)} = (1-\phi) \rho_R C_R T + \phi \sum_{\beta=1, g} S_{\beta} \rho_{\beta} u_{\beta} \quad - (3)$$

ρ_R ; 岩石粒子の密度 T ; 温度

C_R ; 岩石粒子の比熱 u_{β} ; 比内部エネルギー

$$F^{(k)} = \sum_{\beta=1, g} F_{\beta}^{(k)} \quad - (4)$$

$$F_{\beta}^{(k)} = -k \frac{k_{r,\beta}}{\mu_{\beta}} \rho_{\beta} X_{\beta}^{(k)} (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} g) - \delta_{\beta,z} D_{v,\beta} \rho_{\beta} \nabla X_{\beta}^{(k)} \quad - (5)$$

$$P_{\beta} = P + P_{cap,\beta} \quad - (6)$$

k ; 絶対透過係数

$k_{r,\beta}$; 相対透過係数

P_{β} ; 圧力

μ_{β} ; 粘性係数

P ; 参照圧力

$P_{cap,\beta}$; 毛管圧力

g ; 重力加速度

$D_{v,\beta}$; 拡散係数 (水蒸気/空気2成分)

図 3.1-1 TOUGH2 基本モデル

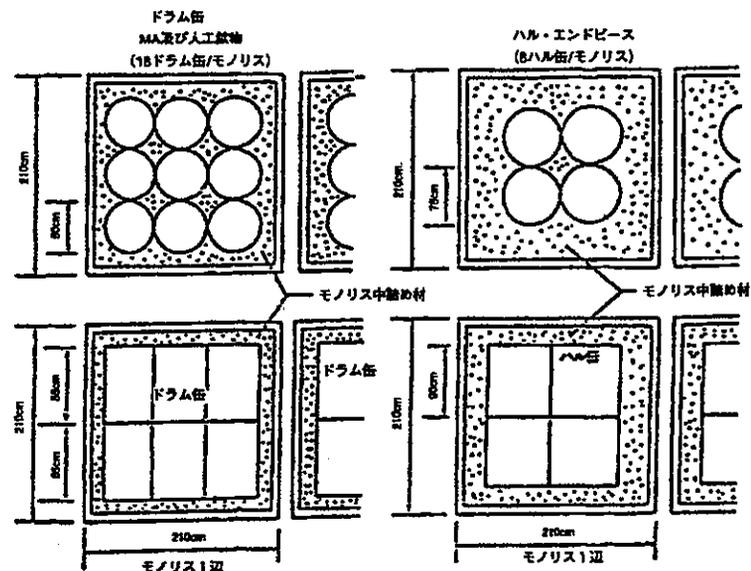


図 3.1.1-1 廃棄体概念図

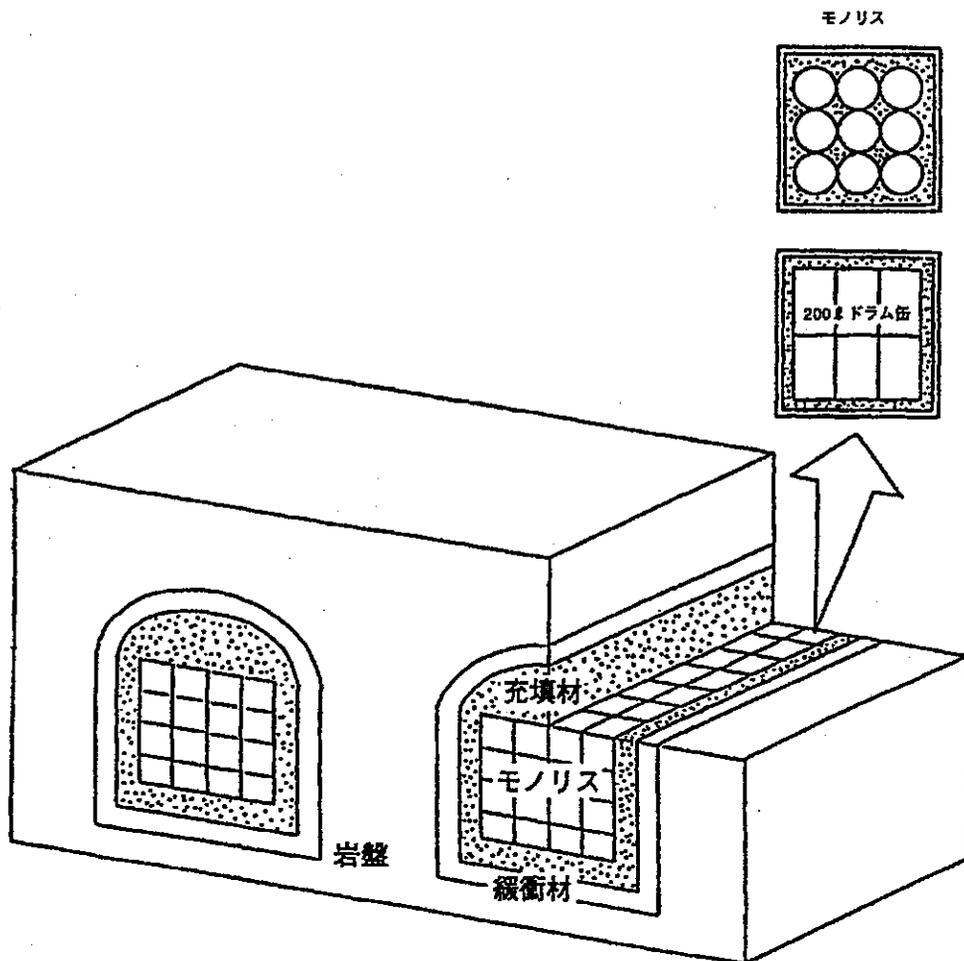


図3.1.1-2 ボールトタイプ処分施設概念

ボールトタイプ処分施設

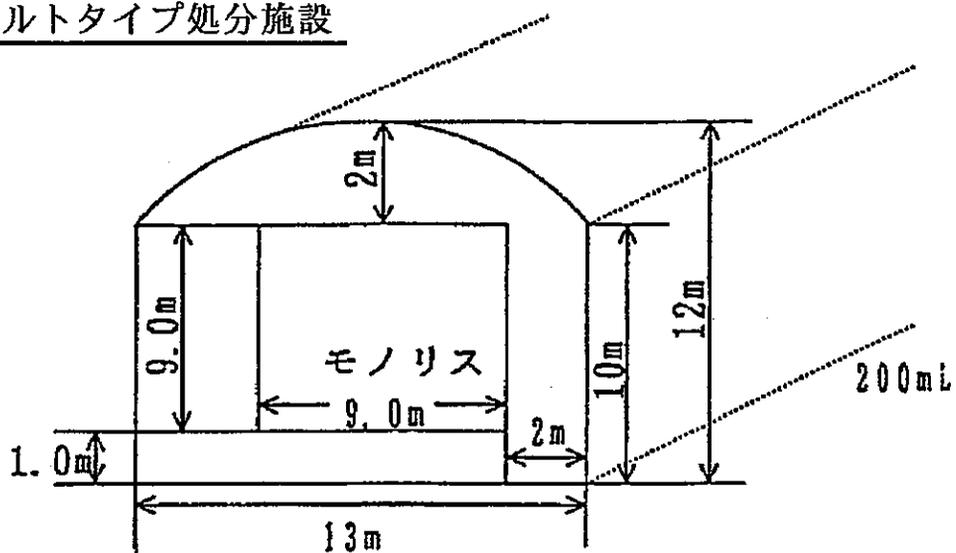


図3.1.1-3 ボールトタイプ処分施設概略寸法

(2) 幾何モデル

「TOUGH2」コードは数値解を得る手法として空間の離散化に有限差分法を適用しているが、本解析において解析対象とする形状モデルには2次元直交座標系を採用し、処分場断面をボルトの垂直方向中心軸に対し対象として、解析範囲を処分場及び周辺地層断面の1/2のエリアに設定した。断面の厚さは1mとしてボルト単位長さ当たりのフラックスを算定するように設定している。

昨年度の解析では特に緩衝材層での急激な圧力の増減や間隙水流速の先鋭なピーク値の出現等が見られた²⁾。これは昨年度設定した幾何モデルの構成も原因の1つである可能性が考えられた。即ち、昨年度設定した空間のメッシュ分割では廃棄体層は2層に分割しているが、充填コンクリート層、緩衝材層、地層のゆるみ域についてはそれぞれ1層のエレメントで構成していた。このため、移行媒体の特性が非線形に変化する異なる物質の境界層での急激な状態量の変化がそのまま1バリア層の挙動として、実際より強調されて現れたものとも考えられる。したがって本年度はコンピュータハードの機能が許容するかぎりエレメント数を増加させ、非線形境界面での挙動が強調されないよう配慮するものとした。この結果、本年度設定した幾何モデルではコンクリート充填材、粘土物質による緩衝材をそれぞれ2層のエレメントで構成することとした。

評価対象とする空間の範囲と主要部分の寸法、評価対象エリアのエレメント分割の状態を図3.1.1-4に示す。

(3) 初期、境界条件

境界条件については垂直上方の外側境界は大気開放とし、等圧条件での物質移行が可能である。垂直下方については不透水層の存在を仮定して物質移行は起こらないものとした。水平方向外側境界については境界内側エレメントと等圧条件で物質移行が生じるように設定した。さらに、ガスの発生領域については処分施設中心にある廃棄体エリアの2エレメントよりガスが発生するものとして解析を行った。ガスは一定期間一定速度で発生するものとし、発生量の変化は矩形波として入力した。

また、初期間隙圧力は深度に応じた静水圧を考慮し、水の密度と重力加速度によって決定される圧力勾配を設定した。さらに基本ケースの間隙水飽和度に関する初期条件については、処分場閉鎖直ちに間隙は地下水によって飽和されるものとし、 $t=0$ において $S_w=1.0$ に設定した。

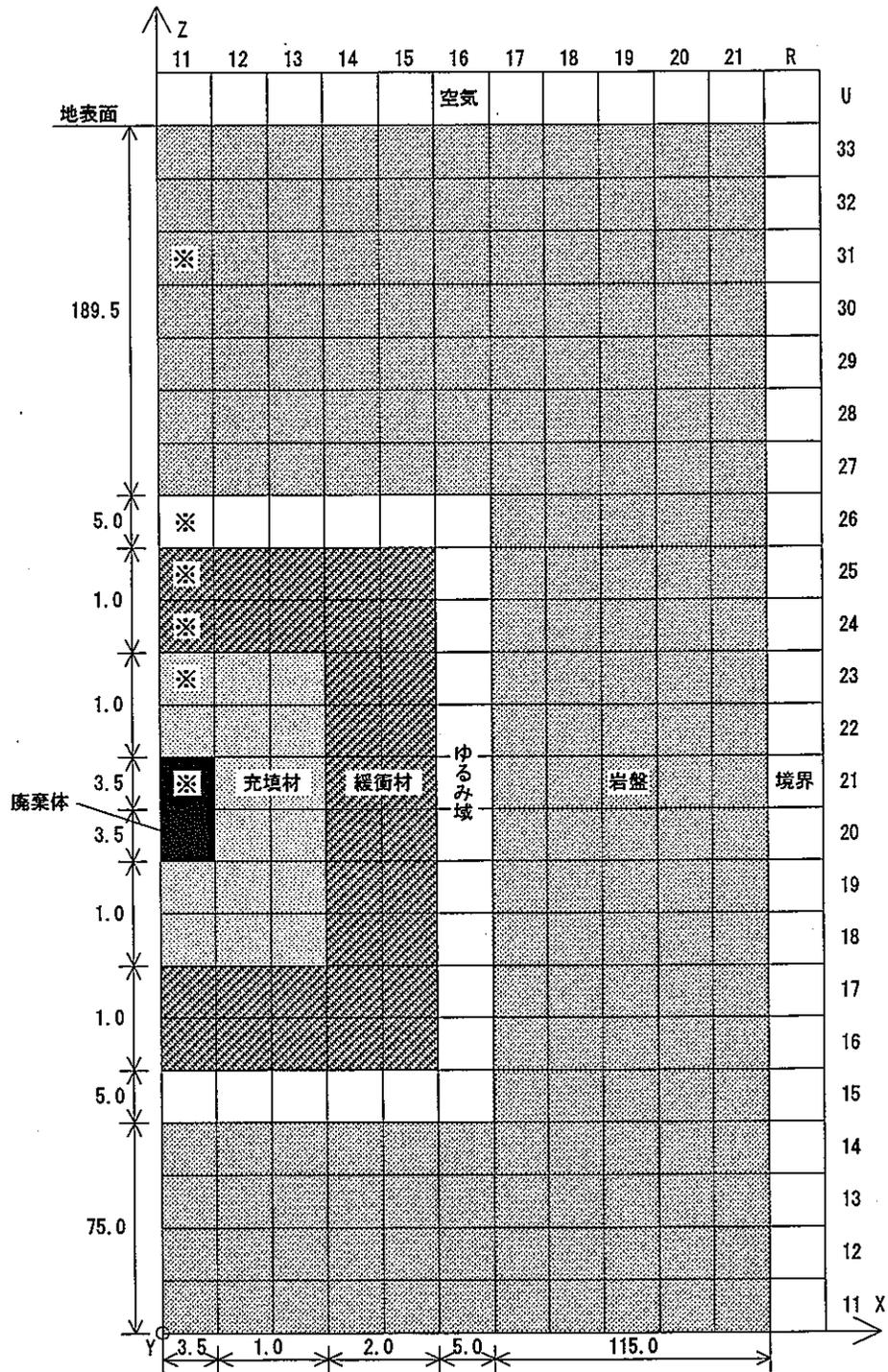


図 3.1.1-4 ボードタイプ施設解析モデル

3.1.2 パラメータの設定

パラメータ値の設定方法は平成5年度の設定値を基礎として、これまで実測値あるいは評価例の存在しなかった部分のデータについて、2.3及び2.4節で測定、評価した値を適用するほか、各国において実施された処分場におけるガス発生影響の評価例、1.1節において調査した各種バリア構成物質に対する特性試験例より、新規の値が収集できた場合には、それらの値を今回の評価に採用することとした。上述のように解析はボルトタイプを対象として下記のケース、算定条件に対して実施するものとした。

以下にパラメータ設定根拠を記述する。

(1) ケース1, 2, 3 (基本ケース; 発生ガスはそれぞれ H_2 , CO_2 , 空気)

(i) 廃棄体

①密度

; [本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] 日本原燃産業(株)六ヶ所事業所廃棄物埋設事業許可申請書³⁾におけるセメント固化体相当。BWR濃縮廃液の高炉Cセメント($2.46 \times 10^3 [kg/cm^3]$)相当と仮定($2.40 \times 10^3 [kg/cm^3]$)。

②間隙率

; 日本原燃産業(株)六ヶ所事業所廃棄物埋設事業許可申請書³⁾におけるセメント固化体相当。BWR濃縮廃液の高炉Cセメント($0.32[-]$)と相当と仮定($0.30[-]$)。

③絶対透過係数

; BES/OPCグラウト⁴⁾, $w/c=0.4$, 骨材/セメント $=0$, $\phi = 0.3 (K=10^{-21} \sim 10^{-16} [m^2])$ の高透過性側の値を設定($K=1.0 \times 10^{-16} [m^2]$)。

④熱伝導度

; [本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] 動燃事業団「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告—平成3年度—」(以下H-3レポート)⁵⁾における堆積岩系岩盤に同等($2.3 [W/m^{\circ} K]$)と仮定。

⑤比熱

; [本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] 動燃事業団「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告—平成3年度—」(以下H-3レポート)⁵⁾における堆積岩系岩盤に同等($840 [J/kg^{\circ} K]$)と仮定。

⑥ 相対透過係数モデル

；スイス建築材料研究所試験データ⁶⁾、普通ポルトランドセメント、 $w/c=0.4\sim 0.7$ 、骨材/セメント=4.2～8.0、 $\phi \approx 0.06\sim 0.14$ (Corey model, $S_{lr}=0.30, S_{sr}=0.18$)を適用。

⑦ 毛管圧

；セメント系の材料で実証例のあるNarasimhan modelを適用する。 S_{lr} 、 S_{sr} は相対透過係数についてCorey modelで設定した数値と同じとし、 P_c 、 P_0 、 η についてはスイス建築材料研究所試験データ⁶⁾、普通ポルトランドセメント、 $w/c=0.4\sim 0.7$ 、骨材/セメント=4.2～8.0、 $\phi \approx 0.06\sim 0.14$ での値を適用した。

(Narasimhan model, $S_{lr}=0.30, S_{sr}=0.18, P_c=1.0\times 10^5$ [Pa], $P_0=1.2\times 10^6$ [Pa], $\eta=1.3$)

⑧ 初期条件

- ・ 間隙水飽和度；処分場閉鎖後直ちに地下水によって間隙が飽和するものと仮定した。(1.0[-])
- ・ 間隙圧力；各部の間隙圧は、各エレメント重心位置での深度に相当する静水圧を設定した。
- ・ 温度；解析範囲に対して一定温度(30[°C])を仮定し、深さ方向への温度勾配は無視した。(30[°C])

(ii) 充填材

① 密度

；スイス建築材料研究所試験データ⁶⁾、普通ポルトランドセメント、 $w/c=0.4\sim 0.7$ 、骨材/セメント=4.2～8.0、 $\phi \approx 0.06\sim 0.14$ のうち、2相流パラメータ特性試験供試体のデータを適用。(2.40×10³ [kg/cm³])

② 間隙率

；スイス建築材料研究所試験データ⁶⁾、普通ポルトランドセメント、 $w/c=0.4\sim 0.7$ 、骨材/セメント=4.2～8.0、 $\phi \approx 0.06\sim 0.14$ のうち、2相流パラメータ特性試験供試体のデータを適用。(φ=0.13)

③ 絶対透過係数

；BES/OPCグラウト⁴⁾、 $w/c=0.4$ 、骨材/セメント=0、 $\phi \approx 0.3$ ($K=10^{-21}\sim 10^{-16}$ [m²])の中間的な値を設定($K=1.0\times 10^{-17}$ [m²])。

④ 熱伝導度

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] H-3レポート⁵⁾における堆積岩系岩盤に同等(2.3[W/m² K])と仮定。

⑤ 比熱

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] 動燃事業団

「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告－平成3年度－」（以下H-3レポート）⁵⁾における堆積岩系岩盤に同等(840[J/kg°K])と仮定。

⑥相対透過係数モデル

；スイス建築材料研究所試験データ⁶⁾、普通ポルトランドセメント、 $w/c=0.4\sim 0.7$ 、骨材/セメント=4.2 ~ 8.0 、 $\phi \approx 0.06\sim 0.14$ (Corey model, $S_v=0.30, S_{sr}=0.18$)を適用。

⑦毛管圧

；セメント系の材料で実証例のあるNarasimhan model を適用する。係数については廃棄体と同一値を適用した。

(Narasimhan model, $S_v = 0.30, S_{sr} = 0.18, P_c = 1.0 \times 10^5$ [Pa], $P_0 = 1.2 \times 10^6$ [Pa], $\eta = 1.3$)

⑧初期条件

- ・ 間隙水飽和度；処分場閉鎖後直ちに地下水によって間隙が飽和するものと仮定した(1.0[-])。
- ・ 間隙圧力；定置深さである地下200m付近の水頭圧(～2MP～)に等しいと仮定。
- ・ 温度；解析範囲に対して一定温度(30[°C])を仮定し、深さ方向への温度勾配は無視した。(30[°C])

(iii) 緩衝材

①密度

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] 動燃事業団が実施している高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の成果を適用した(2.70×10^3 [kg/cm³])。なお、乾燥密度は 1.80×10^3 [kg/cm³]とする。

②間隙率

；動燃事業団が実施している高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の成果を適用した0.33[-]。

③絶対透過係数

；動燃事業団が実施している高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の成果を適用した($K=2.5 \times 10^{-21}$ [m²])。

④熱伝導度

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] H-3レポート⁵⁾における緩衝材(飽和状態)に同等(1.7[W/m°K])と仮定。

⑤比熱

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] H-3レポート⁵⁾における緩衝材(飽和状態)に同等(1,000[J/kg°K])と仮定。

⑥相対透過係数モデル

；動燃事業団が実施している圧密ベントナイトの水分特性試験の成果を適用した。適用モデルは Sandia model である。(Sandia model, $S_{lr} = 0.09$, $S_{sr} = 0$, $\lambda = 0.52$)

⑦毛管圧

；動燃事業団が実施している圧密ベントナイトの水分特性試験の成果を適用した。適用モデルは Sandia model である。

S_{lr} , S_{sr} は相対透過係数について Sandia model で設定した数値と同じとし, P_0 , P_{max} , λ については動燃事業団の測定値 (乾燥密度 = $1.8[\text{g}/\text{cm}^3]$, $\phi = 0.33$) を適用した。

(Sandia model, $S_{lr} = 0.09$, $S_{sr} = 0$, $P_0 = 3.0 \times 10^8 [\text{Pa}]$, $P_{max} = 2.4 \times 10^7 [\text{Pa}]$, $\lambda = 0.52$)

⑧初期条件

- ・ 間隙水飽和度；処分場閉鎖後直ちに地下水によって間隙が飽和するものと仮定した(1.0[-])。
- ・ 間隙圧力；各部の間隙圧は, 各エレメント重心位置での深度に相当する静水圧を設定した。
- ・ 温度；解析範囲に対して一定温度 (30[°C]) を仮定し, 深さ方向への温度勾配は無視した。(30[°C])

(iv) 母岩

①密度

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] 表1.2-1に示す岩石, 及びPAGISプロジェクト⁷⁾等に用いられている岩石密度と同等の値を想定($2.70 \times 10^3 [\text{kg}/\text{cm}^3]$)。

②間隙率

；炭層中に貯溜されたメタンガスの回収に関する研究⁸⁾において測定された, 炭層の2相流特性試験結果 ($\phi = 0.028 \sim 0.036$) を適用した。($\phi = 0.03$)

③絶対透過係数

；炭層中に貯溜されたメタンガスの回収に関する研究⁸⁾において測定された, 炭層の2相流特性試験データを適用した。(K = $1.0 \times 10^{-16} [\text{m}^2]$)。

④熱伝導度

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] H-3レポート⁵⁾における結晶質岩系岩盤に同等($2.9 [\text{W}/\text{m}^\circ \text{K}]$)と仮定。

⑤比熱

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] H-3レポート

ト⁵⁾における結晶質岩系岩盤に同等(840[J/kg° K])と仮定。

⑥相対透過係数モデル

；炭層中に貯溜されたメタンガスの回収に関する研究⁸⁾において測定された、炭層の2相流特性試験結果(Brooks & Corey model, $S_{lr}=0.02\sim 0.14$, $S_{sr}=0$, $\lambda=0.36\sim 0.87$)を基にCorey modelとして適用した。(Corey model, $S_{lr}=0.08$, $S_{sr}=0$)

⑦毛管圧

；炭層中に貯溜されたメタンガスの回収に関する研究⁸⁾において測定された、炭層の2相流特性試験結果(Brooks & Corey model, $P_c=5.2\times 10^5\sim 1.4\times 10^6$ [Pa], $\lambda=0.36\sim 0.87$, $S_{lr}=0.02\sim 0.14$, $S_{sr}=0$)を基にNarasimhan modelとして適用した。

(Narasimhan model, $P_c=8.6\times 10^5$ [Pa], $P_0=0$ [Pa], $\eta=0.87$, $S_{lr}=0.08$, $S_{sr}=0$)

⑧初期条件

- ・間隙水飽和度；処分場閉鎖後直ちに地下水によって間隙が飽和するものと仮定した(1.0[-])。
- ・間隙圧力；各部の間隙圧は、各エレメント重心位置での深度に相当する静水圧を設定した。
- ・温度；解析範囲に対して一定温度(30[°C])を仮定し、深さ方向への温度勾配は無視した。(30[°C])

(v) ゆるみ域

ゆるみ域の厚さは、結晶質岩としては比較的大きい値と考えられる掘削半径と同等の厚さとした。

①密度

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである]母岩と同一値とした(2.70×10^3 [kg/cm³])。

②間隙率

；亀裂系媒体の平行平板モデルに従うものとし、間隙率の増加率は母岩に対する透過係数増加率の立方根に等しいものとした(0.14[-])。

③絶対透過係数

；昨年度調査結果²⁾より、母岩に対して2桁の増加を仮定した($K=1.0\times 10^{-14}$ [m²])。

④熱伝導度

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである]母岩と同一値とした(2.9[W/m° K])。

⑤比熱

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである]母岩と同一

値とした(840[J/kg° K])。

⑥相対透過係数モデル

；母岩と同一値とした(Corey model, $S_{fr} = 0.08$, $S_{sr} = 0$)。

⑦毛管圧

；母岩と同一値を適用した。

(Narasimhan model, $P_c = 8.6 \times 10^5$ [Pa], $P_0 = 0$ [Pa], $\eta = 0.87$, $S_{fr} = 0.08$, $S_{sr} = 0$)

⑧初期条件

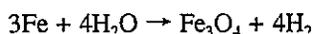
- ・ 間隙水飽和度；処分場閉鎖後直ちに地下水によって間隙が飽和するものと仮定した(1.0[-])。
- ・ 間隙圧力；各部の間隙圧は、各エレメント重心位置での深度に相当する静水圧を設定した。
- ・ 温度；解析範囲に対して一定温度 (30[°C]) を仮定し、深さ方向への温度勾配は無視した。(30[°C])

(vi) ガス発生速度

①発生するガスをH₂としたケース；金属の腐食を考慮

；無酸素条件下における銅の腐食速度は各国における試験結果⁹⁾によれば、ほぼ0.04～7[μm/y]の間にあるとされるところから、ここでは中間的な値としてガス発生に係わる腐食速度を1[μm/y]と仮定した。

想定した腐食反応式は以下の通りである。



- ・ ドラム缶の腐食によるH₂発生

廃棄体容器を全て200ℓドラム缶とし、図3.1.1-1、-2に従った定置方法の場合、廃棄体密度は1.58[200ℓドラム缶/m³]となる。ドラム缶の内外面双方に同時に腐食が進行するとすれば、1.32[mol/m³y] (0.030[(STP)/m³/m³y]) の発生速度で800年間、H₂の発生が継続することとなる。

- ・ 鋼製廃棄物の腐食によるH₂発生

全ドラム缶には12.8ℓの体積を持つ金属塊3個が収納されているものと仮定する。金属塊の形状を立方体に近似し、腐食の進行により表面積は変化しないこととすれば、0.145[mol/m³y] (0.0033[(STP)m³/m³y]) の発生速度と77,800[年]の発生期間が想定される。

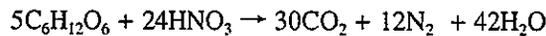
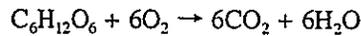
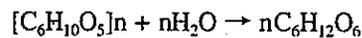
ここでは上記2種類の発生原の合計値を発生量として設定するものとした。

②発生するガスをCO₂としたケース；セルロースの微生物分解を考慮

；有機物の微生物による分解については定量的に発生量評価が行われた例が非常に少ないが、ここではAggr¹⁰⁾がGAMMONコードを用いて評価したCO₂発生速度を参考にする。同評価例によれ

ば、CO₂の最大発生速度は処分後約100年ほどで最大に達し、その値は0.6～1.2[mol/m³ y]程度であるとされている。

ここでは、上記の評価におけるセルロース含有量が明確でないこと、微生物分解により発生するガスはCO₂の他、H₂、CH₄等があり、発生量に関して未だ不確実な要素が多いことから、ドラム缶の腐食によるH₂発生量と同じ、0.145[mol/m³ y] (0.0033 [(STP)m³/m³ y]) の発生速度を仮定し、ドラム缶1個当たり10kgのセルロースが収納されているものとして、発生期間を350年と想定した。なお、セルロースの分解反応として想定されている現象はTOUGH2によって解析可能なCO₂の発生のみを考慮することとし、CO₂発生に係わる以下の反応式を対象として考慮した。



③発生するガスを空気としたケース；金属の腐食を考慮

；ガスの種類による影響を把握するため、ここでは昨年度使用したTOUGHコードで解析対象としている空気の実験データを用いた解析を行い、ガス種類を水素とした場合の結果と比較する。

このため、空気の発生量は金属の腐食を考慮して設定した水素ガスと同じ値を設定した。即ち、ドラム缶の腐食分相当として1.32[mol/m³ y] (0.030[(STP)m³/m³ y]) の発生速度で800年間空気の発生が継続し、さらに金属塊の腐食分相当として0.145 [mol/m³ y] (0.0033[(STP)m³/m³ y]) の発生速度で77,800[年]の間空気が発生が継続するものとした。

ここでは上記2種類の発生原の合計値を発生量として設定するものとした。

(2) ケース4、5（充填材がポーラスコンクリート；発生ガスは、それぞれH₂、CO₂）

(i) 廃棄体

基本ケースに同じとした。

(ii) 充填材

①密度

；本研究2.3節の不飽和透過特性試験で試験対象とした供試体の測定値を適用。

$$(2.60 \times 10^3 [\text{kg}/\text{cm}^3])$$

②間隙率

；本研究2.3節の不飽和透過特性試験で試験対象とした供試体の測定値を適用。

$$(\phi = 0.26)$$

③絶対透過係数

；本研究2.3節の不飽和透過特性試験で試験対象とした供試体の測定値を適用。

($K=2.2 \times 10^{-12} \text{ [m}^2\text{]}$)。

④熱伝導度

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] H-3レポート⁵⁾における堆積岩系岩盤に同等($2.3 \text{ [W/m}^\circ \text{ K]}$)と仮定。

⑤比熱

；[本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] 動燃事業団「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告－平成3年度－」(以下H-3レポート)⁵⁾における堆積岩系岩盤に同等($840 \text{ [J/kg}^\circ \text{ K]}$)と仮定。

⑥相対透過係数モデル

；本研究2.3節の不飽和透過特性試験で試験対象とした供試体の測定値から評価した関数を適用。

(Corey 変形 model, $S_{ir}=0.44$, $S_{sr}=0$)

⑦毛管圧

；本研究2.4節の毛管圧特性試験で試験対象とした供試体の測定値からカーブフィットした関数を適用。

(Narasimhan model, $S_{ir}=0.44$, $S_{sr}=0$, $P_c=0 \text{ [Pa]}$, $P_0=2.1 \times 10^4 \text{ [Pa]}$, $\eta=0.8$)

(iii) 緩衝材

基本ケースと同じとした。

(iv) 母岩

基本ケースと同じとした。

(v) ゆるみ域

基本ケースと同じとした。

(3) ケース 6, 7 (母岩が凝灰岩；発生ガスは、それぞれ H_2 , CO_2)

(i) 廃棄体

基本ケースと同じとした。

(ii) 充填材

基本ケースと同じとした。

(iii) 緩衝材

基本ケースと同じとした。

(iv) 母岩

①密度

; 本研究2.3節の不飽和透過特性試験で試験対象とした供試体の測定値を適用。

$$(2.70 \times 10^3 [\text{kg/m}^3])$$

②間隙率

; 本研究2.3節の不飽和透過特性試験で試験対象とした供試体の測定値を適用。

$$(\phi = 0.38)$$

③絶対透過係数

; 本研究2.3節の不飽和透過特性試験で試験対象とした供試体の測定値を適用。

$$(K = 5.9 \times 10^{-16} [\text{m}^2])$$

④熱伝導度

; [本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] H-3レポート⁵⁾における結晶質岩系岩盤に同等(2.9[W/m° K])と仮定。

⑤比熱

; [本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] H-3レポート⁵⁾における結晶質岩系岩盤に同等(840[J/kg° K])と仮定。

⑥相対透過係数モデル

; 本研究2.4節の毛管圧特性試験で試験対象とした供試体の測定値からカーブフィットした関数を適用。(Corey model, $S_{ir} = 0.31$, $S_{sr} = 0$)

⑦毛管圧

; 本研究2.4節の毛管圧特性試験で試験対象とした供試体の測定値からカーブフィットした関数を適用。

$$(\text{Narasimhan model, } P_c = 2.0 \times 10^3 [\text{Pa}] P_0 = 1.2 \times 10^6, [\text{Pa}], \eta = 0.80, S_{ir} = 0.31, S_{sr} = 0)$$

(v) ゆるみ域

ゆるみ域特性は、母岩のそれと同等した。

(4) ケース 8, 9 (緩衝材がベントナイト/砂混合材(ベントナイト20[wt%]含有); 発生ガスは、それぞれ H_2 , CO_2)

(i) 廃棄体

基本ケースに同じとした。

(ii) 充填材

基本ケースと同じとした。

(iii) 緩衝材

①密度

； [本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] 動燃事業団が実施している高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の成果を適用した(2.70×10^3 [kg/cm³])。

②間隙率

； 動燃事業団が実施している高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の成果を適用した0.33[-]。

③絶対透過係数

； 本研究2.3節の不飽和透過特性試験で試験対象とした供試体の測定値を適用。

($K=3.4 \times 10^{-15}$ [m²])。

④熱伝導度

； [本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] H-3レポート⁵⁾における緩衝材(飽和状態)に同等(1.7[W/m² K])と仮定。

⑤比熱

； [本解析では発熱の評価は考慮しないため算定結果に影響しないパラメータである] H-3レポート⁵⁾における緩衝材(飽和状態)に同等(1,000[J/kg² K])と仮定。

⑥相対透過係数モデル

； 本研究2.4節の毛管圧特性試験で試験対象とした供試体の測定値からカーブフィットした関数を適用。(Corey model, $S_{ir}=0.31$, $S_{sr}=0$)

⑦毛管圧

； MRS'94において穂刈らが報告¹¹⁾した、ベントナイト/砂混合物について測定されたブレイクスルー圧をCorey modelの P_c として用いた。

S_{ir} , S_{sr} は相対透過係数についてCorey modelで設定した数値と同じとした。

(Narasimhan model, $S_{ir}=0.31$, $S_{sr}=0$, $P_c=4.0 \times 10^4$ [Pa], $P_0=1.0 \times 10^5$ [Pa], $\eta=0.99$)

(iv) 母岩

基本ケースと同じとした。

(v) ゆるみ域

基本ケースと同じとした。

以上の設定値をまとめて表3.1.2-1に整理した。

表3.1.2-1 2相流解析ケース

(1/3)

パラメータ	ケース1:H ₂ , 2:空気, 3:CO ₂ (基本ケース)	ケース4:H ₂ , 5:CO ₂ (ホースコンクリート)	ケース6:H ₂ , 7:CO ₂ (凝灰岩)	ケース8:H ₂ , 9:CO ₂ (砂パン材付)
バリア形状・寸法 [解析対象モデル; 直方体近似 (2次元), 単位長さ当たりのフラックスを算定]				
処分施設外形 廃棄体 充填材 緩衝材厚さ 躯体厚さ ゆるみ域厚さ	11mH×13mW 7mH×7mW 1mT 1&2mT — 5mT	同左	同左	同左
バリア物性				
密度 [kg/m ³] 廃棄体 充填材 緩衝材 躯体 ゆるみ域 母岩	— 2.4×10 ³ 2.4×10 ³ 2.7×10 ³ — 2.7×10 ³ 2.7×10 ³	充填材; 2.6×10 ³	基本ケースに同じ	基本ケースに同じ
間隙率 [-] 廃棄体 充填材 緩衝材 躯体 ゆるみ域 母岩	— 0.30 0.13 0.33 — 0.14 0.03	充填材; 0.26	ゆるみ域; 0.38 母岩; 0.38	基本ケースに同じ
絶対透過係数 [m ²] 廃棄体 充填材 緩衝材 躯体 ゆるみ域 母岩	— 1.0×10 ⁻¹⁶ 1.0×10 ⁻¹⁷ 2.5×10 ⁻²¹ — 1.0×10 ⁻¹⁴ 1.0×10 ⁻¹⁶	充填材; 2.2×10 ⁻¹²	ゆるみ域; 5.9×10 ⁻¹⁶ 母岩; 5.9×10 ⁻¹⁶	緩衝材; 3.4×10 ⁻¹⁵
熱伝導度 [W/m °C] 廃棄体 充填材 緩衝材 躯体 ゆるみ域 母岩	— 2.30 2.30 1.70 — 2.90 2.90	同左	同左	同左
比熱 [J/kg °C] 廃棄体 充填材 緩衝材 躯体 ゆるみ域 母岩	— 840. 840. 1,000. — 840. 840.	同左	同左	同左

表3.1.2-1 2相流解析ケース

(2/3)

パラメータ	ケース 1 :H ₂ , 2 :空気, 3 :CO ₂ (基本ケース)	ケース 4 :H ₂ , 5 :CO ₂ (ホーラスコンクリート)	ケース 6 :H ₂ , 7 :CO ₂ (凝灰岩)	ケース 8 :H ₂ , 9 :CO ₂ (砂パンタイト)
2相流パラメータ				
相対透過係数 τ^* 廃棄体, 充填材 緩衝材 躯体 母岩, ゆるみ域	Corey τ^* $S_{lr}=0.30, S_{nr}=0.18$ Sandia τ^* $S_{lr}=0.09, S_{nr}=0$ $\lambda=0.52$ Brooks & Corey τ^* $S_{lr}=0.08, S_{nr}=0$	充填材 Corey 変形 τ^* $S_{lr}=0.44, S_{nr}=0$	母岩, ゆるみ域 Corey τ^* $S_{lr}=0.31, S_{nr}=0$	緩衝材 Corey τ^* $S_{lr}=0.185, S_{nr}=0$
毛管圧評価 τ^* 廃棄体, 充填材 緩衝材 躯体 母岩, ゆるみ域	Narasimhan τ^* $P_c=1.0 \times 10^5$ [Pa], $P_0=1.2 \times 10^6$ [Pa] $\eta=1.3$ Sandia τ^* $P_{max}=3 \times 10^8$ [Pa] $P_0=2.4 \times 10^7$ [Pa] $\lambda=0.52$ Narasimhan τ^* $P_c=0$ [Pa], $P_0=8.6 \times 10^5$ [Pa] $\eta=0.87$	充填材 Narasimhan τ^* $P_c=0$ [Pa], $P_0=2.1 \times 10^4$ [Pa] $\eta=0.8$	母岩, ゆるみ域 Narasimhan τ^* $P_c=2.0 \times 10^3$ [Pa], $P_0=1.2 \times 10^6$ [Pa] $\eta=0.8$	緩衝材 Narasimhan τ^* $P_c=4.0 \times 10^4$ [Pa], $P_0=1.0 \times 10^5$ [Pa] $\eta=0.99$
重力の効果	考慮する	同左	同左	同左
その他の初期条件				
間隙水飽和度 [-] 廃棄体 充填材 緩衝材 躯体 母岩, ゆるみ域	1.0 1.0 1.0 - 1.0	同左	同左	同左
温度	30 [°C]	同左	同左	同左
間隙圧力 [Pa] 廃棄体 充填材 緩衝材 躯体 母岩, ゆるみ域	2.0×10^6 2.0×10^6 2.0×10^6 - 2.0×10^6	同左	同左	同左

表3.1.2-1 2相流解析ケース

(3/3)

パラメータ	ケース1:H ₂ , 2:空気, 3:CO ₂ (基本ケース)	ケース4:H ₂ , 5:CO ₂ (ホ [○] -ラスコンクリート)	ケース6:H ₂ , 7:CO ₂ (凝灰岩)	ケース8:H ₂ , 9:CO ₂ (砂/セメント)
ガス発生速度	空気; 1.47 [mol/m ³ y] (0~800年間) 0.15 [mol/m ³ y] (800~70,000年間) H ₂ ; 1.47 [mol/m ³ y] (0~800年間) 0.15 [mol/m ³ y] (800~70,000年間) CO ₂ ; 1.47 [mol/m ³ y] (0~350年間)	H ₂ ; 1.47 [mol/m ³ y] (0~800年間) 0.15 [mol/m ³ y] (800~70,000年間) CO ₂ ; 1.47 [mol/m ³ y] (0~350年間)	同左	同左

- ・ H₂発生源は200ℓドラム内外面、及び金属鋳塊とし、H₂発生に係わる腐食速度は1[μm/y]とした。
- ・ 腐食反応は $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$ で代表させた。
- ・ CO₂発生源は廃棄物中のセルロース (10[kg/ドラム])とし、発生速度は1.5[mol/m³・y]とした。
- ・ 腐食反応は $5\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 24\text{HNO}_3 \rightarrow 30\text{CO}_2 + 12\text{N}_2 + 42\text{H}_2\text{O}$ 、及び
 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ で代表させた。

3.2 ガスの蓄積，移行に対する評価

本年度は2相流解析コードとして、 H_2 、 CO_2 ガスに対してそれらの移行挙動に影響を及ぼす粘度、水に対する溶解度等、各気体に固有の物性値を反映可能な2相流解析コードである「TOUGH2」を新たに適用した。評価対象とするガスの種類は、還元性雰囲気下における鉄の腐食によって発生する H_2 、セルロースの微生物分解によって発生する CO_2 とし、処分場内での圧力変化、間隙水流速への影響、ガスの到達範囲、処分場内間隙水の放出量等に注目してガス発生の影響を評価した。また、ガスの種類が昨年度と同じ空気である場合についても解析を行い、 H_2 、 CO_2 ガスの移行挙動との比較も行い、ガスの物性と移行挙動の相違について検討した。

3.2.1 解析結果

(1) ケース1（基本ケース，発生ガス；水素）

試算結果を図3.2.1-1～18に示す。ケース1は昨年度「TOUGH」による試算を行った条件とほぼ同じ条件であるが（母岩、充填材、及びガス発生量に新規データを適用したため、昨年度とはやや異なる）、発生ガスの種類を H_2 としたほか、昨年度パラメータサーベイの1ケースとして設定した毛管圧を各バリア層に適用した条件で解析を行っている。

①気泡の発生と移行；図3.2.1-1～5

処分場閉鎖後約4年ほどで廃棄体中に気泡が発生し、気泡は処分場閉鎖後約180年で充填材外側エリアに移行する。その後も廃棄体及び充填材エリアのガス飽和度は単調増加し、処分場閉鎖900年後に40%近くに達した後、ガス発生速度の低下により30%程度まで低下する。

緩衝材中には処分場閉鎖後約220年で気泡が移行するが、ガスの飽和度はほとんど上昇しない。これは相対透過係数モデルをSandia modelとし、 $S_{gr}=0$ と設定していることから、ガス飽和度が非常に低い時点から透過係数の上昇が大きいこと、一方、毛管圧はガスの飽和度が0.2%程度では約2.8[MPa]と小さいことから、ガスの移行にほとんど影響しないためと考えられる。

地層中には処分場閉鎖約240年後に気泡が移行するが、地層中のガスの相対透過係数はBrooks & Corey modelに従うとしたことから、低いガス飽和度におけるガスの相対透過係数が小さく気泡の移行が抑制されることから、その飽和度は処分場近傍ではほぼ最大7%程度まで上昇する。

②ガスの移行範囲；図3.2.1-2～5

緩衝材等のバリアの効果で気泡が処分場外に移行するのは上述のように処分場閉鎖後約240年であり、図3.2.1-2に示すように気泡は処分場内に止まっている。ところが図3.2.1-3に示すように430年時点にはガスは地表まで到達しており、飽和度6%程度のガスの移行経路が形成されている。図3.2.1-4はガス発生速度が低下する800年時点での処分場近傍のガス飽和度分布を示した。処分場上

方に飽和度6%を超える気泡の分布が見られる。処分場閉鎖後10,000年後にはガス発生速度が低下するため、図3.2.1-5に示すように処分場近傍のガス飽和度の低下が見られる。

③圧力の経時変化；図3.2.1-6～10

廃棄体、充填材、及び緩衝材の間隙圧力は廃棄体エリアでの気泡の発生と成長に伴って上昇し、間隙圧力の上昇に従って間隙水の移行が生じる。廃棄体エリアの間隙圧力は処分場閉鎖後約220年に緩衝材内側エリアに気泡が移行し始めるまで上昇し、最大約9.3[MPa]に達した後10,000年時点でほぼ3.1[MPa]まで低下する。

一方緩衝材中では、約180年後に充填材中に気泡が移行して充填材エリアのガス飽和度が上昇し、間隙水流量が低下することにより間隙圧力は低下を始める。緩衝材層に気泡が移行した後も上述のようにガスが相対的に容易に流出するため、間隙圧力の低下は持続する。

地層中では処分場閉鎖後約240年でゆるみ域に気泡が移行後、間隙圧力の上昇が観察されるがその量は0.05[MPa]程度に止まる。

④処分場の圧力分布；図3.2.1-7～10

図3.2.1-7～10に処分場近傍での間隙圧力分布の変化を示した。図3.2.1-7は廃棄体内に気泡が発生した時点での圧力分布であり、処分場を中心として僅かに圧力の上昇が見られる。図3.2.1-8は処分場内の間隙圧力が最大となった時点であり、水平方向距離4.5～6.5[m]の範囲にある透過性の最も小さい人工バリアである緩衝材層での圧力勾配が最も大きいことがわかる。また、処分場内での間隙圧力の上昇は処分施設近傍のほぼ数m以内で減衰し、その影響は処分場の極く近傍に止まることが明かである。地層へのガスの放出に従って間隙圧力は低下するが、この様子を図3.2.1-9, 10に示した。処分場閉鎖後10,000年時点においては、処分場周辺の前圧力はほぼ気泡生成時点の状態まで回復している。

⑤間隙水、ガスの流速、流向；図3.2.1-11～18

図3.2.1-11, 12に示すように、間隙水はガス発生によって処分場内の圧力が上昇している期間は、間隙圧力の勾配に従ってガス発生エリアを中心として放射状に移行することがわかる。このとき間隙水の最大流速は緩衝材中で 2.0×10^{-3} [m/y]であり、ゆるみ域では 1.9×10^{-2} [m/y]と非常に小さい値を示す。また、ガスの放出が進み処分場内の圧力が低下する時期においては、圧力勾配の低下と空隙の存在による毛管圧の効果によって、図3.2.1-13, 14に示すように間隙水の流出速度が低下し、やがて処分場外部から地下水が浸入することが予測される。

一方ガスの移行については、地下水に比較して密度の小さいガスは速度は図3.2.1-15に示すように大きく、ゆるみ域で0.5[m/y]、特に非常にガス飽和度の小さい条件でガスが移行する緩衝材層で

は100[m/y]と非常に大きい。また、移行方向については広域的には重力の効果で垂直上方への流れが卓越しているが、処分場内での動きは複雑であり間隙圧力の勾配と飽和度の分布によってその方向は影響を受けることが考えられる。

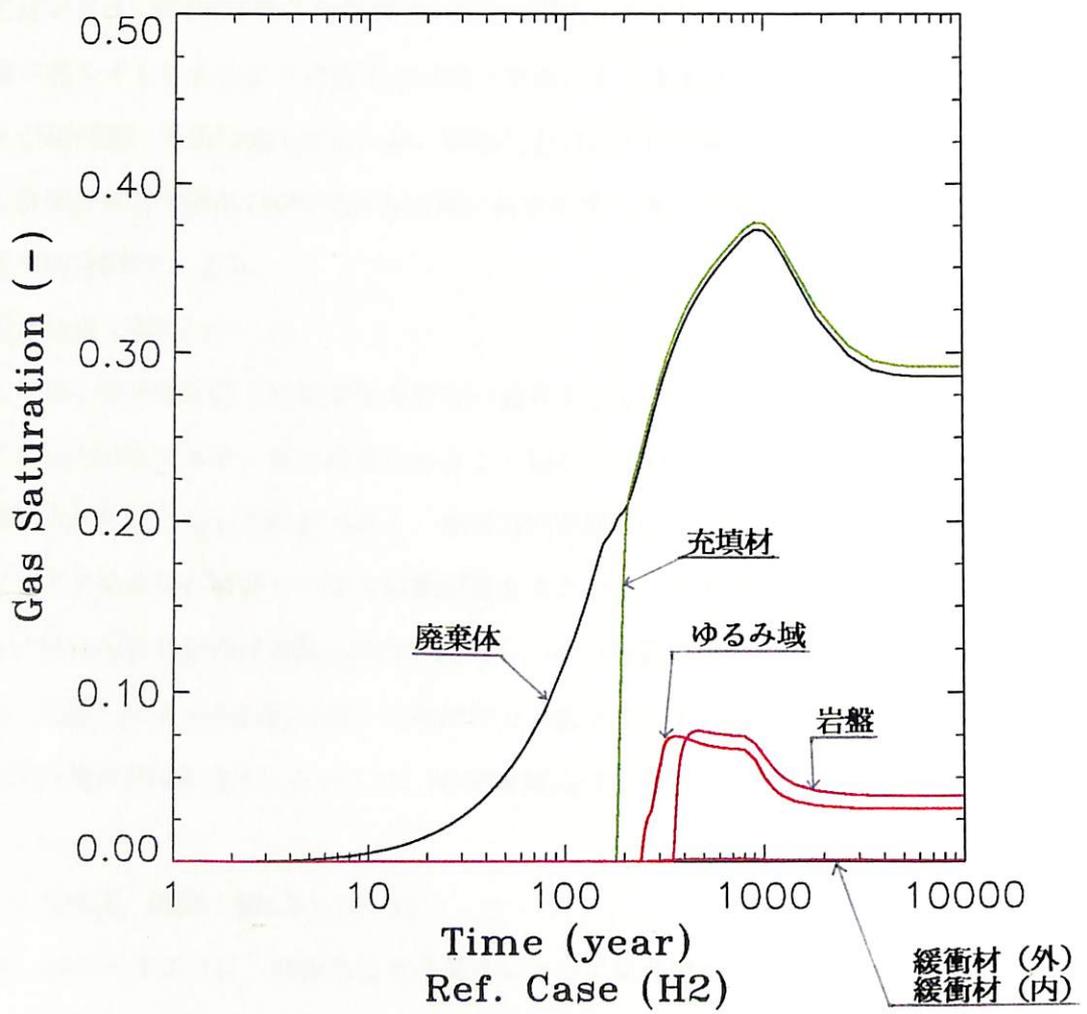


図 3.2.1-1 ガス飽和度 (H₂: 基本ケース)

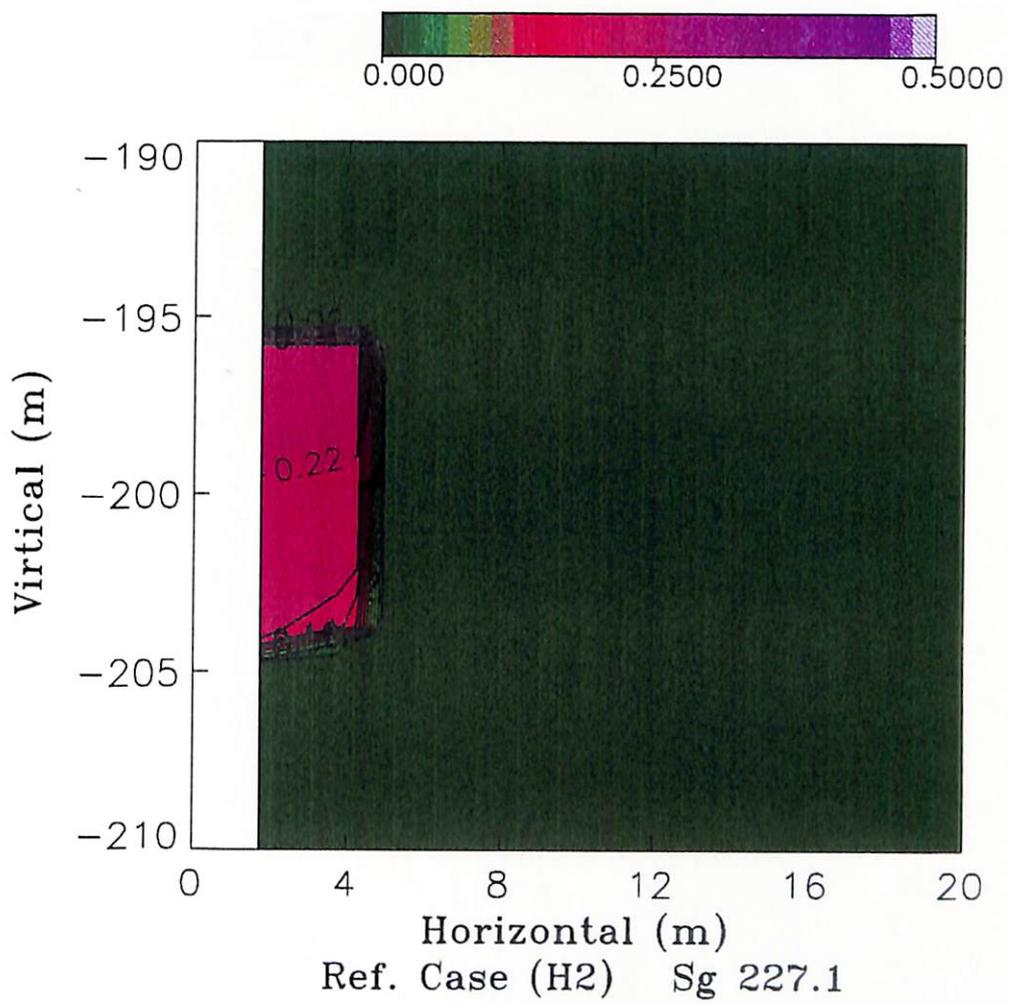


図 3.2.1-2 ガス飽和度分布-230 年度 (H₂: 基本ケース)

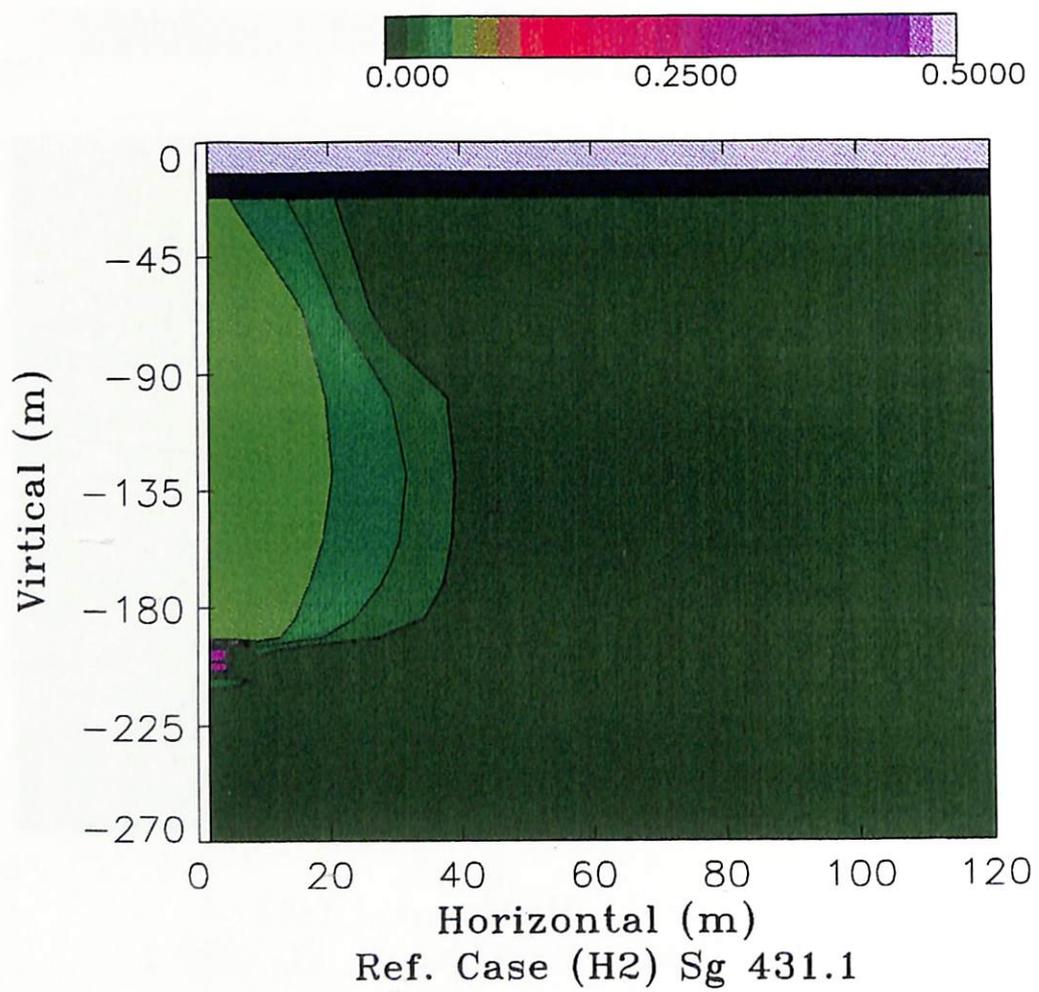


図 3.2.1-3 ガス飽和度分布-430 年度 (H₂: 基本ケース)

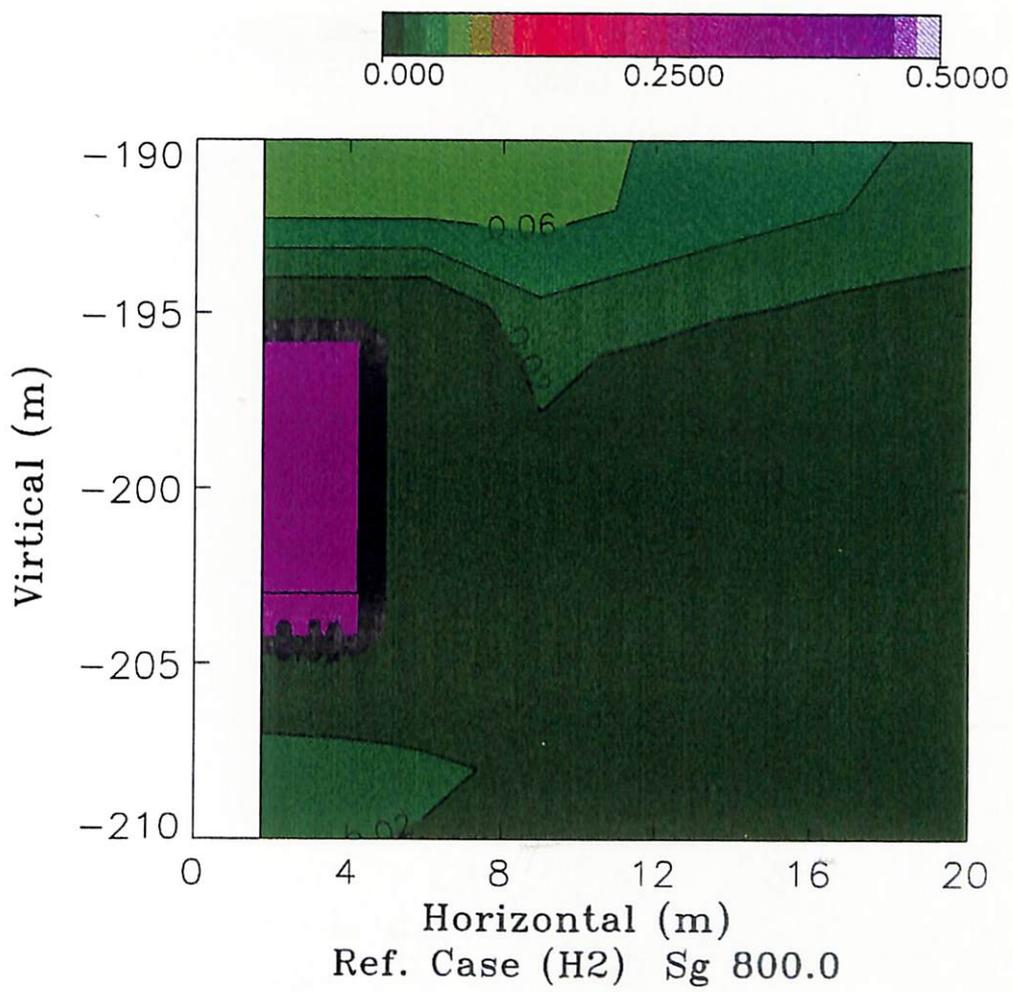


図 3.2.1-4 ガス飽和度分布-800 年度 (H₂: 基本ケース)

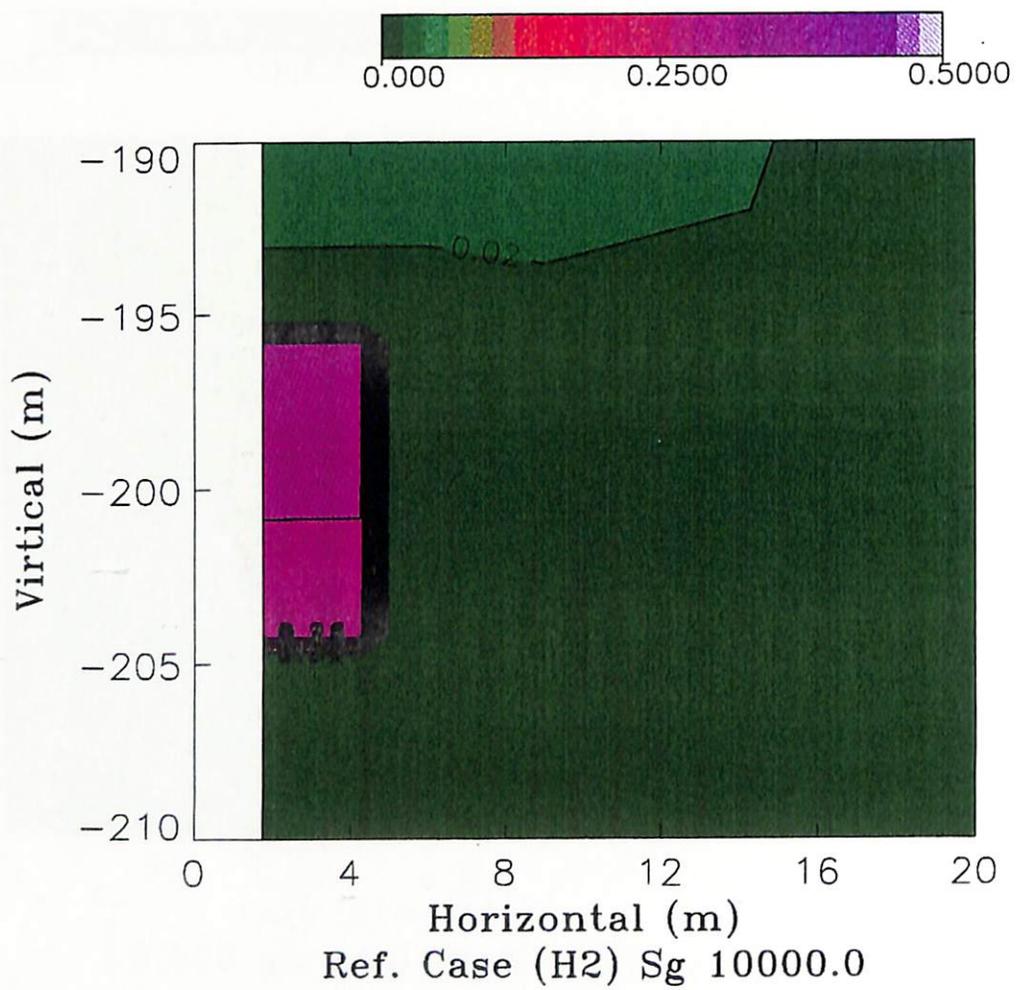


図 3.2.1-5 ガス飽和度分布—10,000 年度 (H₂: 基本ケース)

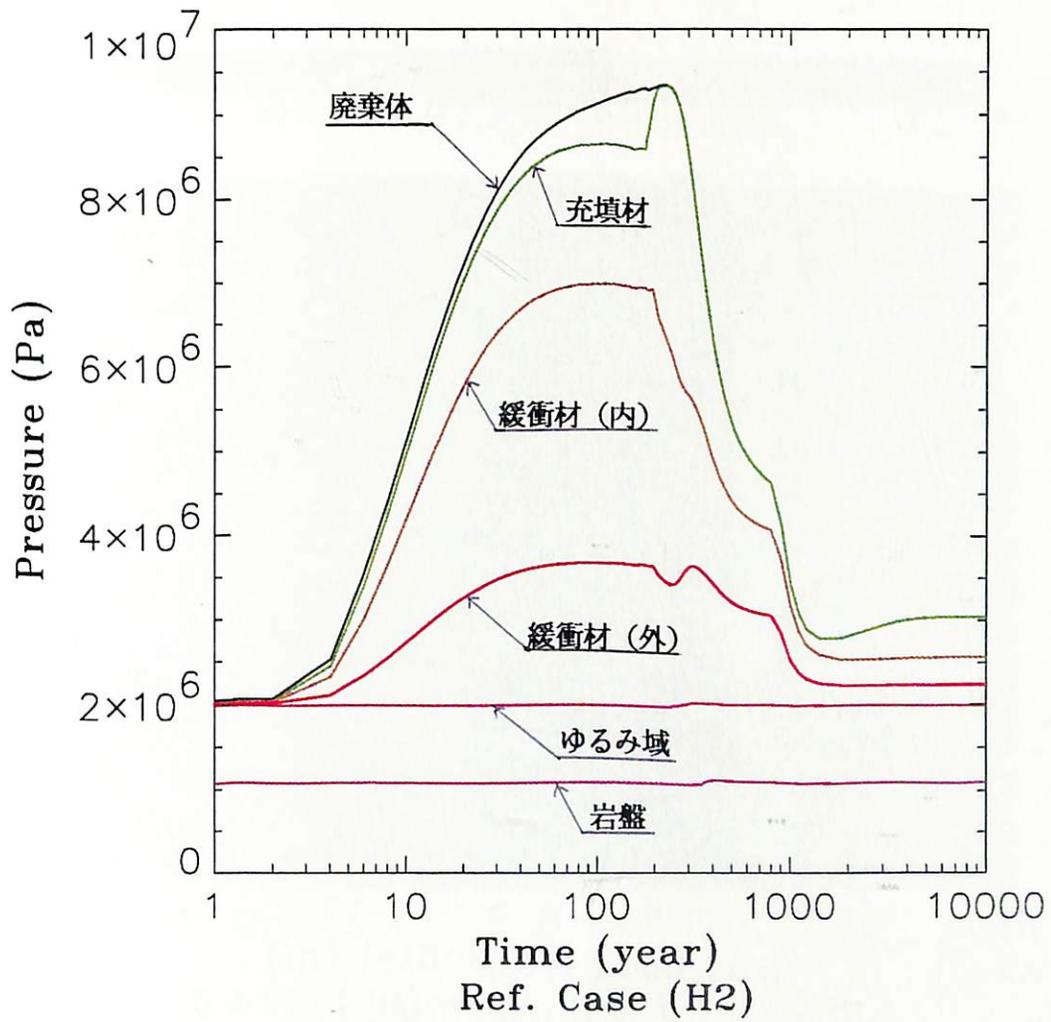


図 3.2.1-6 間隙圧力 (H₂ : 基本ケース)

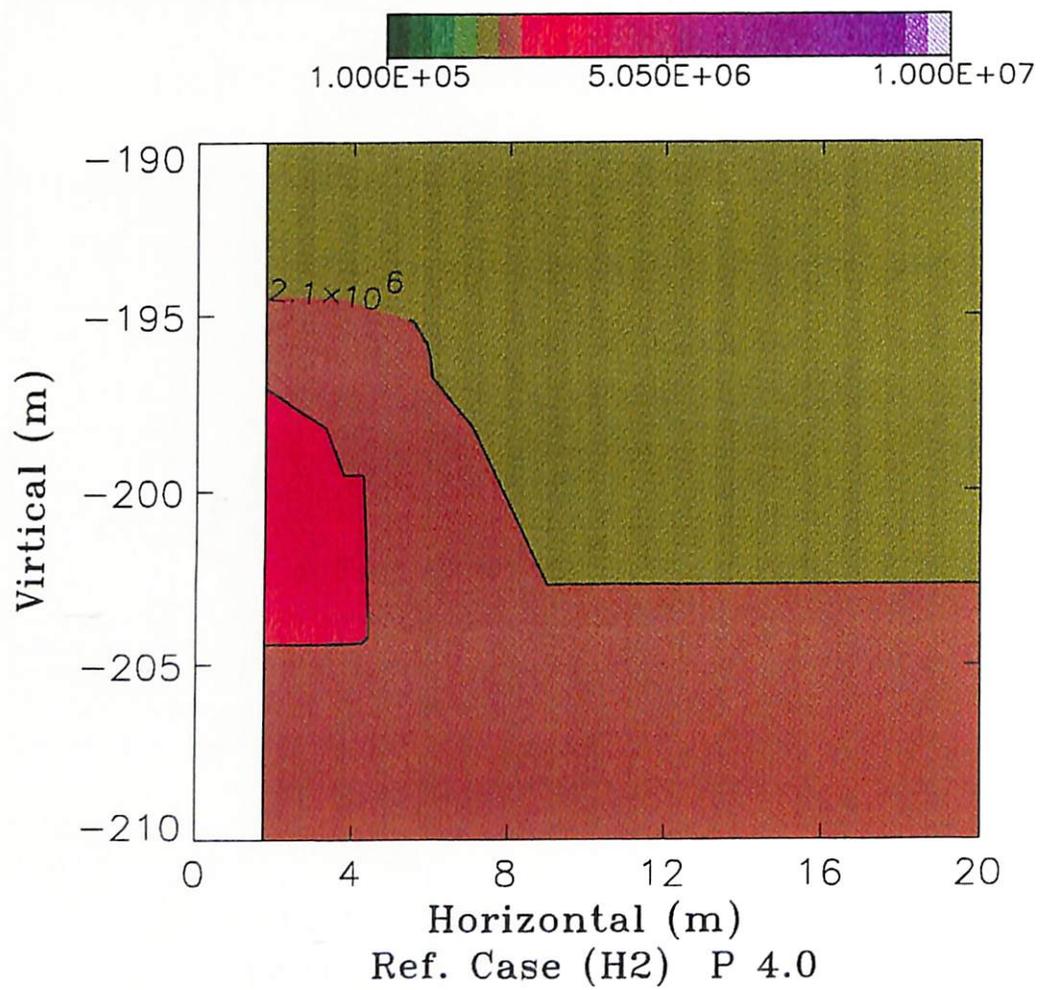


図 3.2.1-7 間隙圧力分布-4年後 (H₂: 基本ケース)

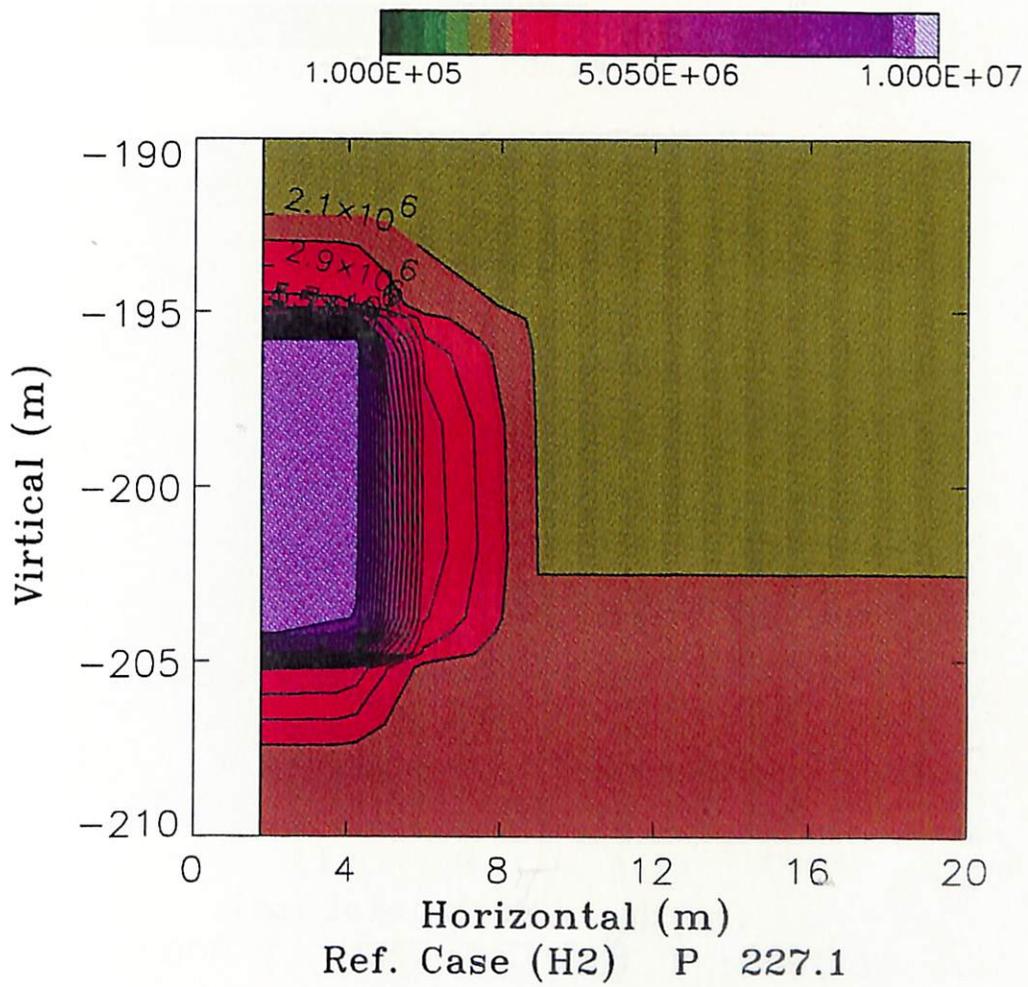


図 3.2.1-8 間隙圧力分布—230 年後 (H₂ : 基本ケース)

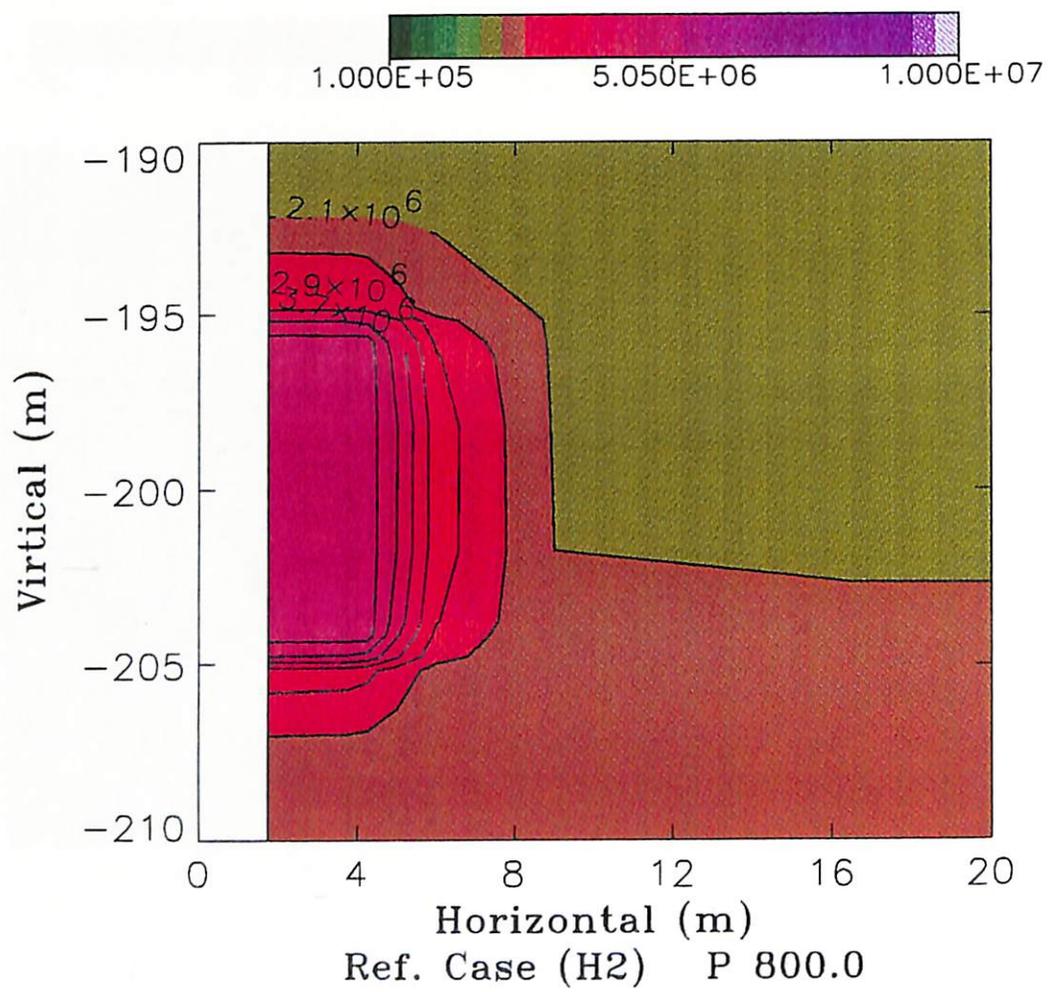


図 3.2.1-9 間隙圧力分布-800 年後 (H₂: 基本ケース)

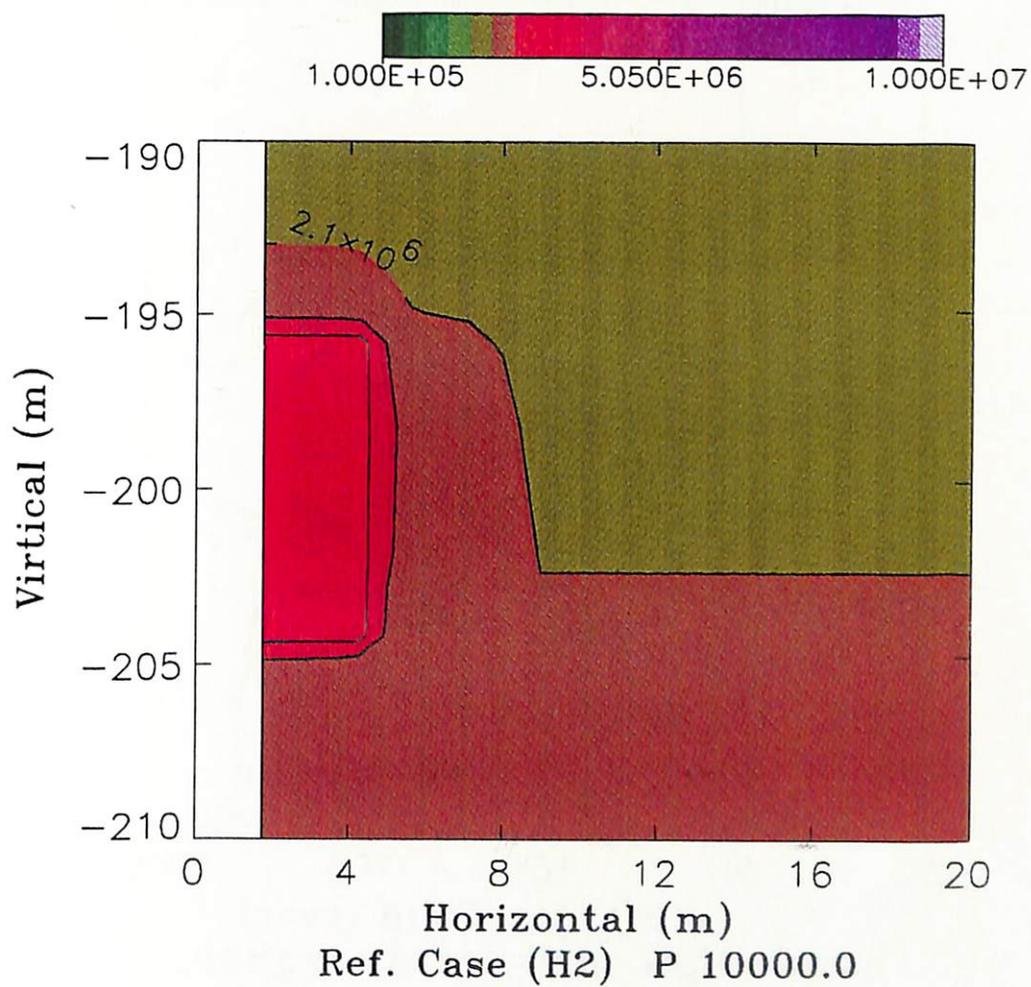


図 3.2.1-10 間隙圧力分布—10,000 年後 (H₂ : 基本ケース)

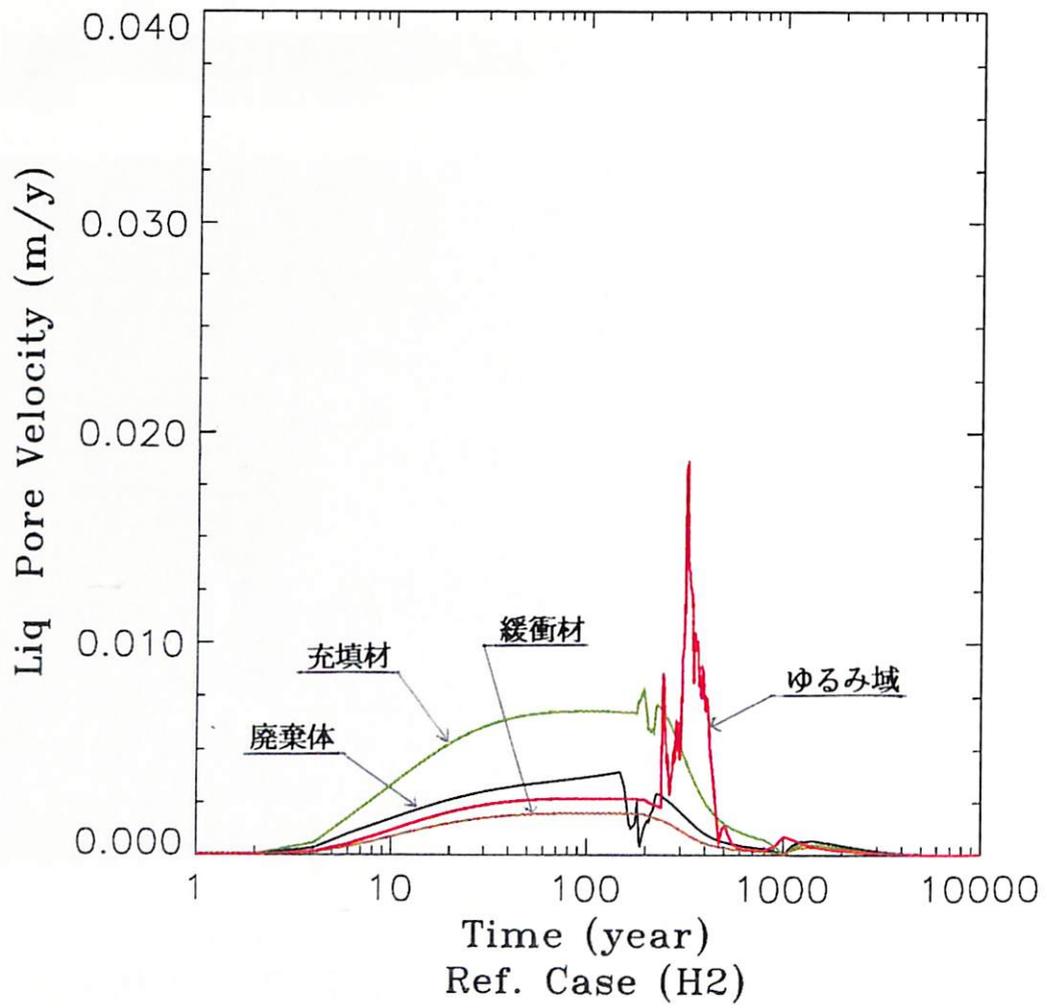


図 3.2.1-11 間隙水流速 (H₂: 基本ケース)

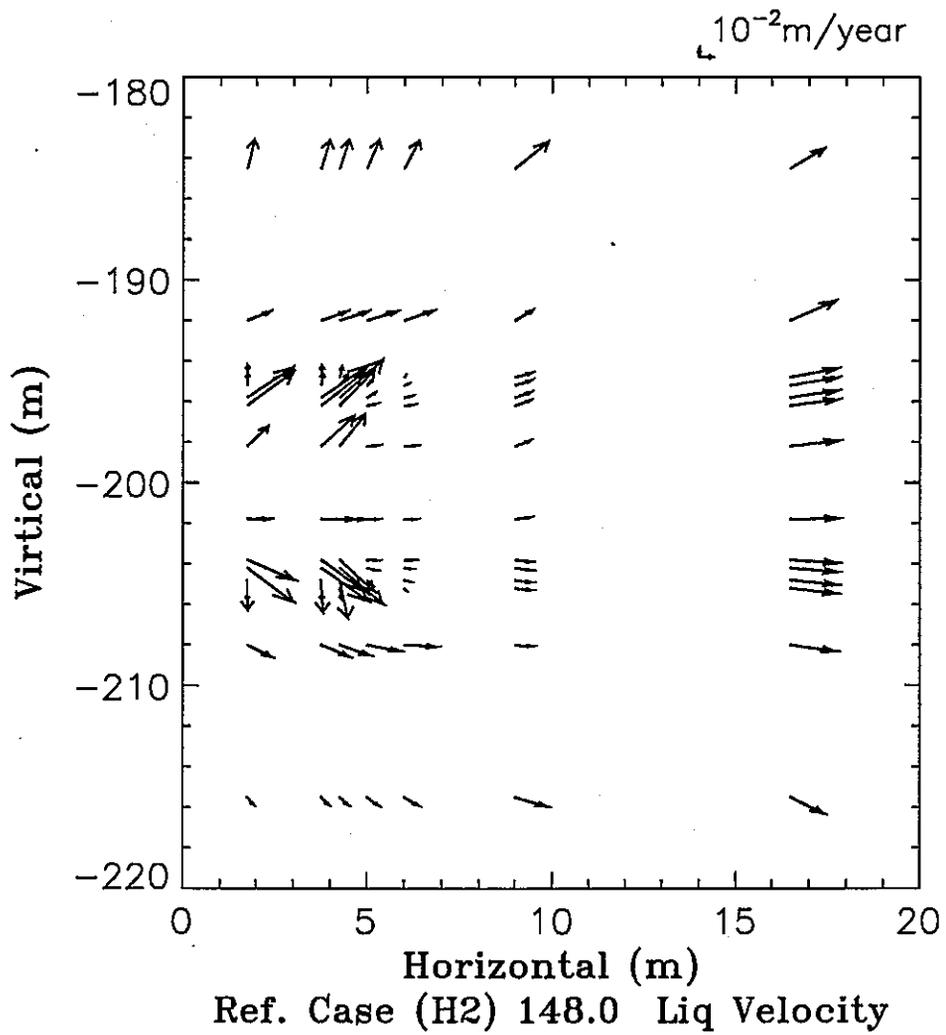


図 3.2.1-12 間隙水流速ベクトル—150 年後 (H₂: 基本ケース)

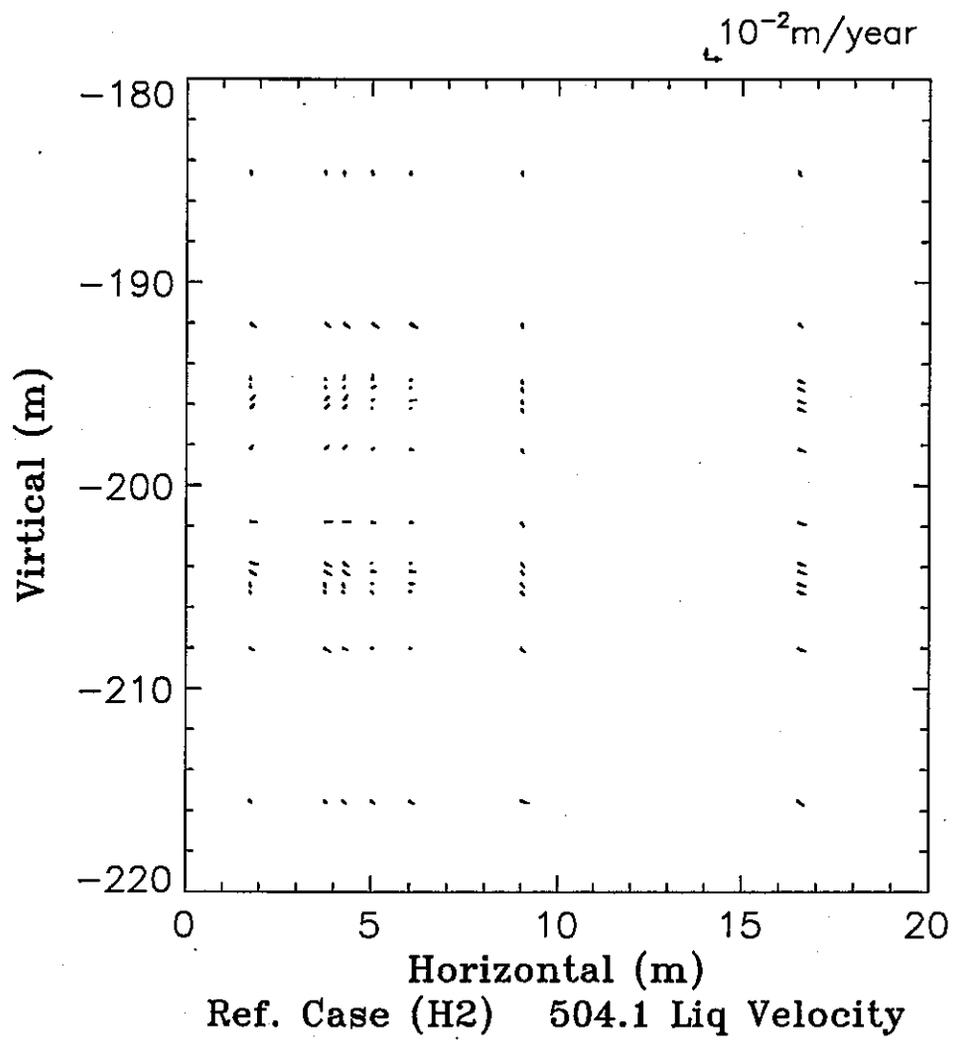


図 3.2.1-13 間隙水流速ベクトル—500 年後 (H₂: 基本ケース)

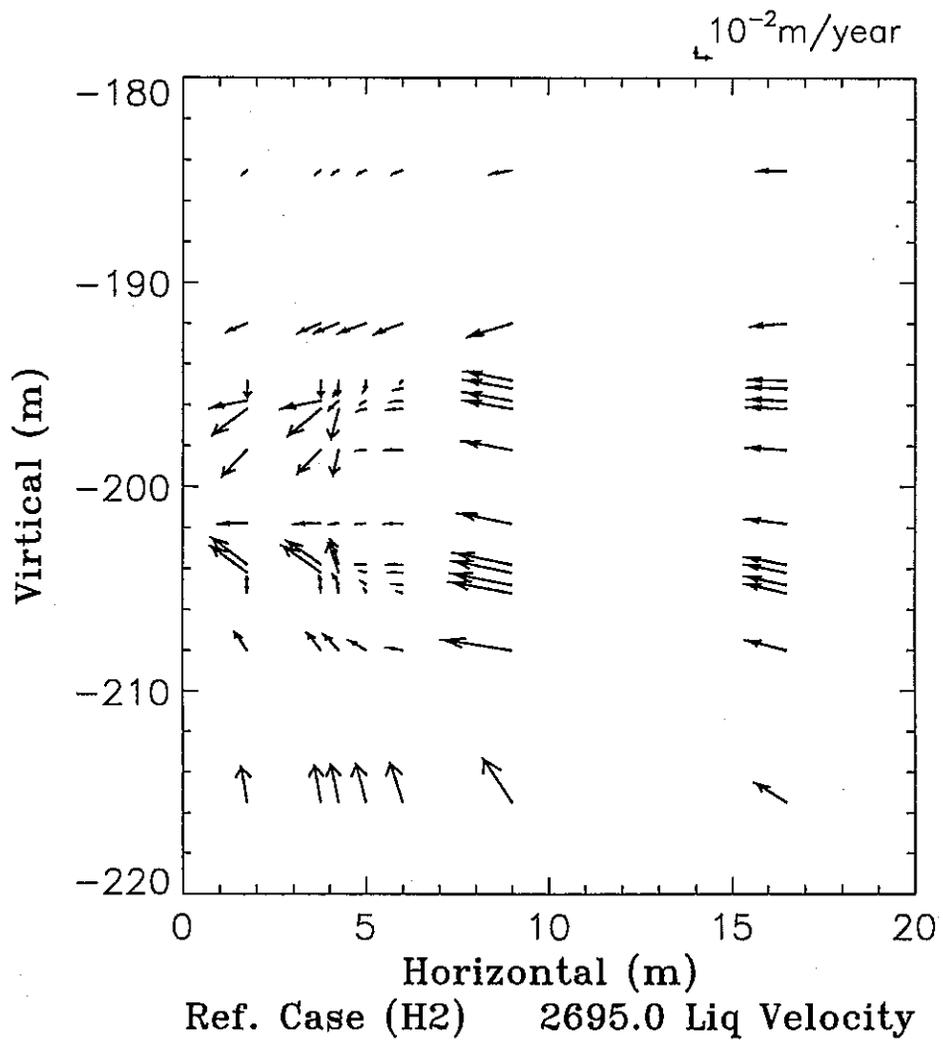


図 3.2.1-14 間隙水流速ベクトル—2,700 年後 (H₂: 基本ケース)

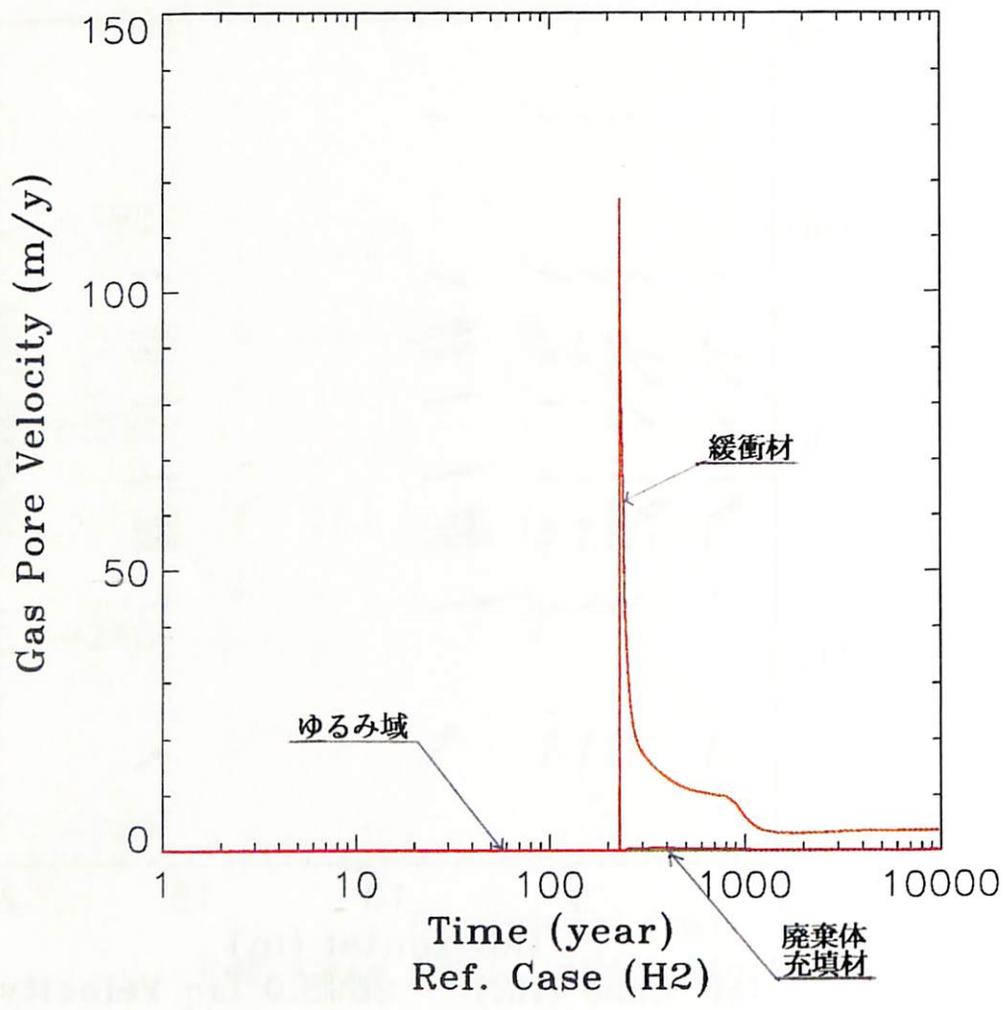


図 3.2.1-15 ガス流速 (H₂: 基本ケース)

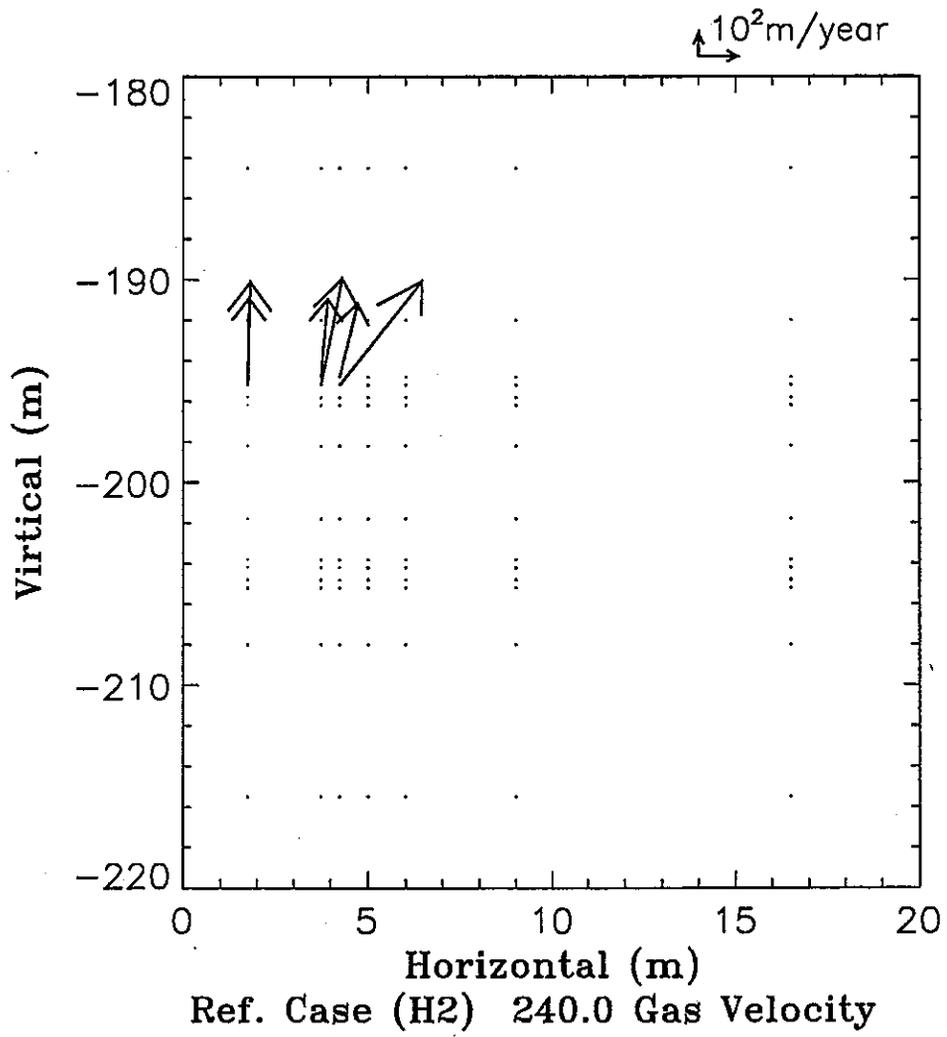


図 3.2.1-16 ガス流速ベクトル—240年後 (H₂: 基本ケース)

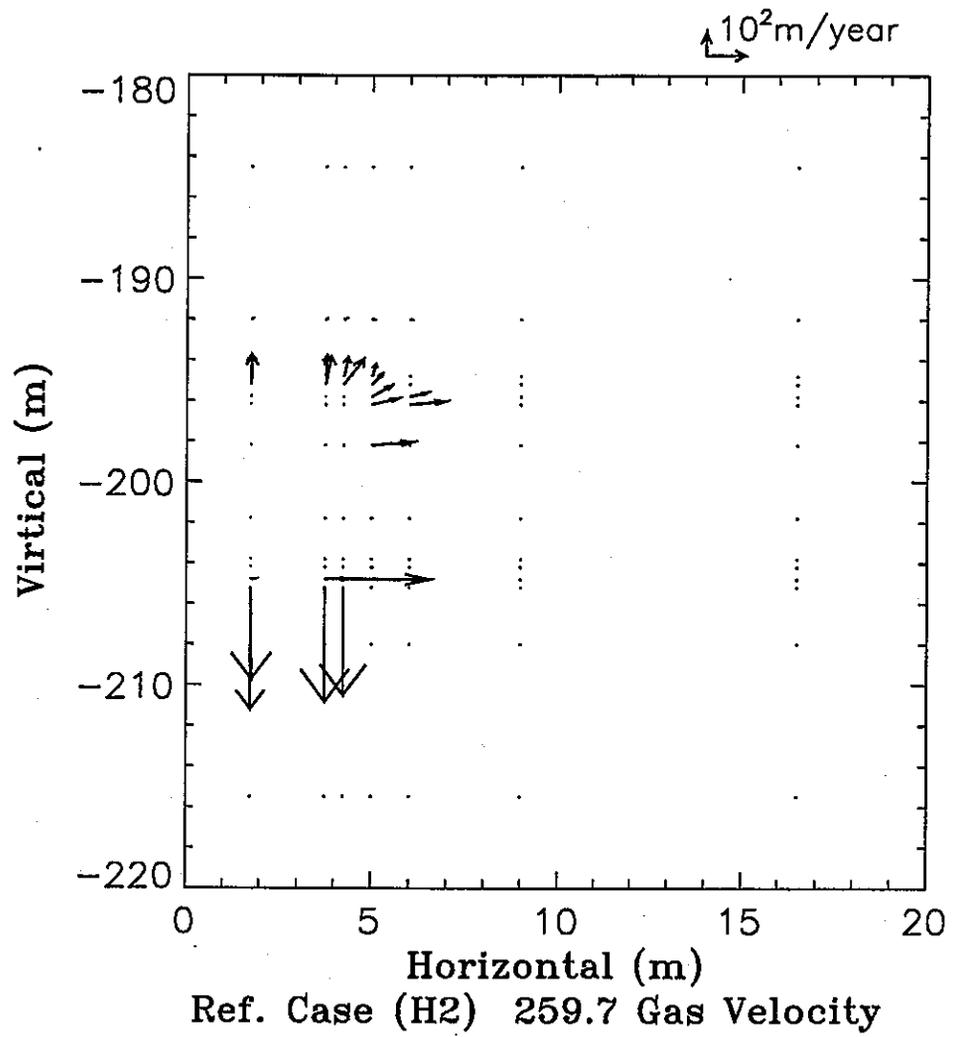


図 3.2.1-17 ガス流速ベクトル—260年後 (H₂: 基本ケース)

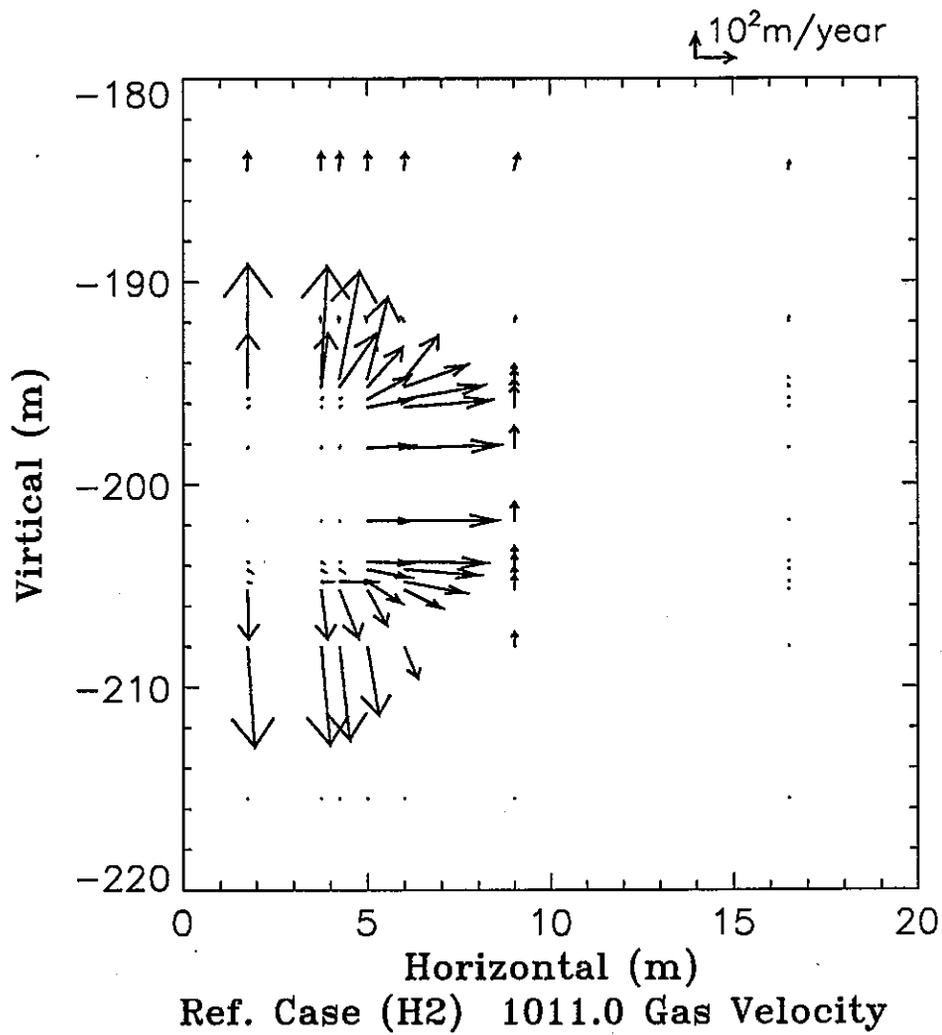


図 3.2.1-18 ガス流速ベクトル—1,010 年後 (H₂: 基本ケース)

(2) ケース2 (基本ケース, 発生ガス; 空気)

試算結果を図3.2.1-19～20に示す。ケース2はケース1と同じバリア条件下において、ガスの種類を昨年度の「TOUGH」コードによる試算で設定した空気として解析を行っている。

①気泡の発生と移行; 図3.2.1-19

H₂の場合と同じく処分場閉鎖後約4年ほどで廃棄体中に気泡が発生し、気泡は処分場閉鎖後約180年で充填材外側エリアに移行する。その後も廃棄体及び充填材エリアのガス飽和度は単調増加し、処分場閉鎖900年後に約40%に達した後、ガス発生速度の低下により33%程度まで低下する。

緩衝材中には処分場閉鎖後約230年で気泡が移行するが、ガスの飽和度はH₂の場合と同じくほとんど上昇しない。

地層中には処分場閉鎖約240年後に気泡が移行するが、地層中のガスの相対透過係数はBrooks & Corey modelに従うとしたことから、低いガス飽和度ではガスの相対透過係数が小さく気泡の移行が抑制されることから、その飽和度は処分場近傍ではほぼ最大9%程度まで上昇する。

以上のように、H₂に比較して空気は常温常圧で約2倍の粘性係数を有することから飽和度の値がやや大きく、ガスの移行がやや緩慢なことを除けば、ほとんどH₂と同じ挙動を示す。

②圧力の経時変化; 図3.2.1-20

廃棄体エリアの間隙圧力は処分場閉鎖後約240年に緩衝材内側エリアに気泡が移行し始めるまで上昇し、最大約9.4[MPa]に達した後10,000年時点ではほぼ2.6[MPa]まで低下する。

一方緩衝材中では、約180年後に充填材中に気泡が移行して充填材エリアのガス飽和度が上昇し、間隙水流量が低下することにより間隙圧力は低下を始める。緩衝材層に気泡が移行した後も上述のようにガスが相対的に容易に流出するため、間隙圧力の低下は持続する。

地層中では処分場閉鎖後約240年でゆるみ域に気泡が移行後、間隙圧力の上昇が観察されるがその量は0.05[MPa]程度に止まる。これらの挙動はほぼH₂の場合と同じである。

③処分場の圧力分布

処分場近傍の圧力分布については、H₂とほとんど同一であった。

④間隙水, ガスの流速, 流向

間隙水の流れはH₂と同様に間隙圧力の勾配に従ってガス発生エリアを中心として放射状に移行する。このとき間隙水の最大流速は緩衝材中で 2.0×10^3 [m/y]であり、ゆるみ域では 1.4×10^2 [m/y]でありH₂とほとんど同じ値を示した。また、ガスの放出が進み処分場内の圧力が低下する時期においては、圧力勾配の低下と空隙の存在による毛管圧の効果によって、間隙水の流出速度が低下し、やがて処分場外部から地下水が浸入する。

また、ガスの移行についてもゆるみ域で0.3[m/y]、緩衝材層では100[m/y]とH₂とほぼ同様の値を示す。

⑤ガスの移行範囲

前述のように空気の粘性係数がH₂の約2倍あることから、気泡の移行がH₂に比較してやや緩慢かつ広範囲に広がる傾向が見られる他は、H₂と同じ挙動を示すものと予測される。

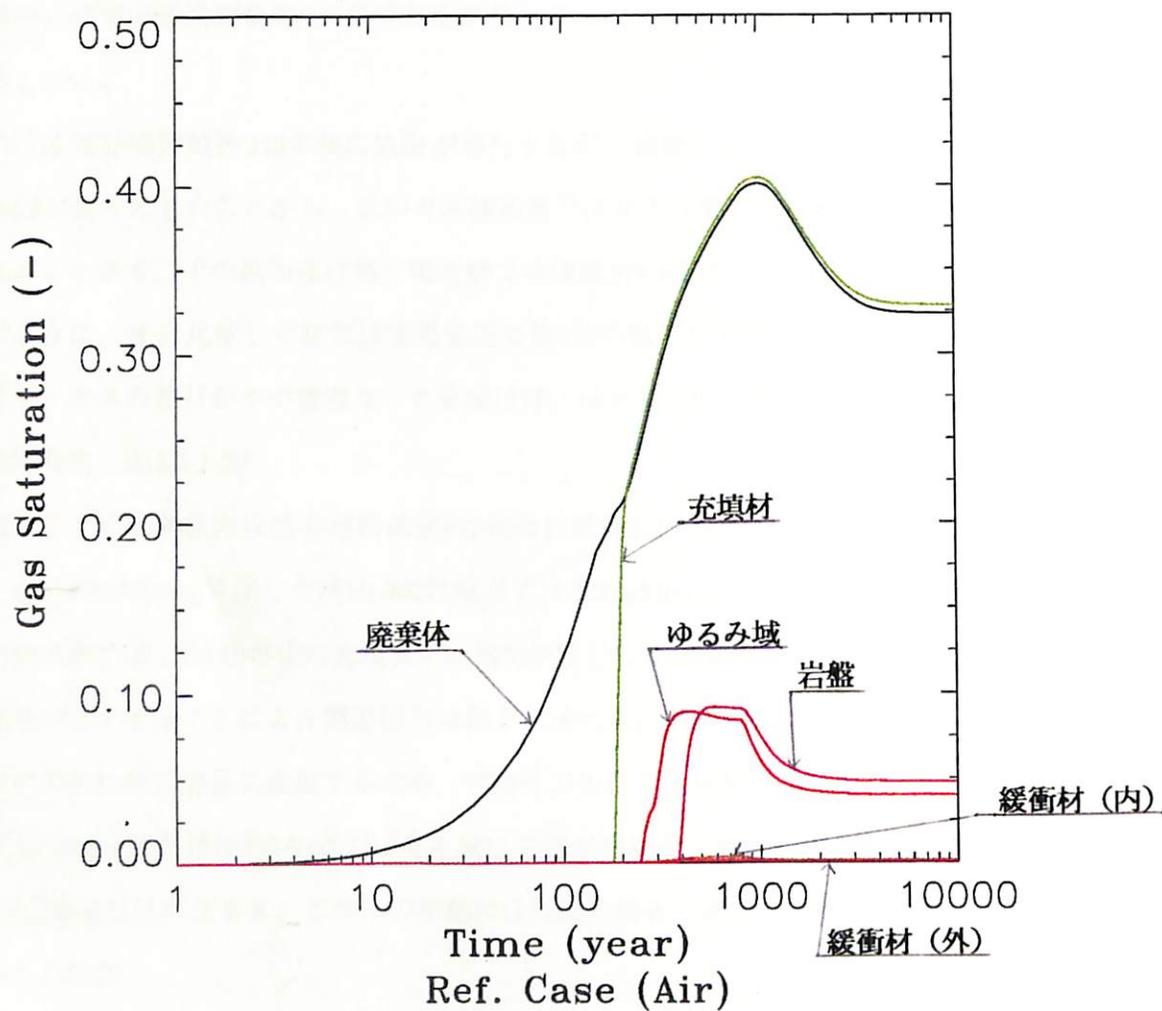


図 3.2.1-19 ガス飽和度 (空気：基本ケース)

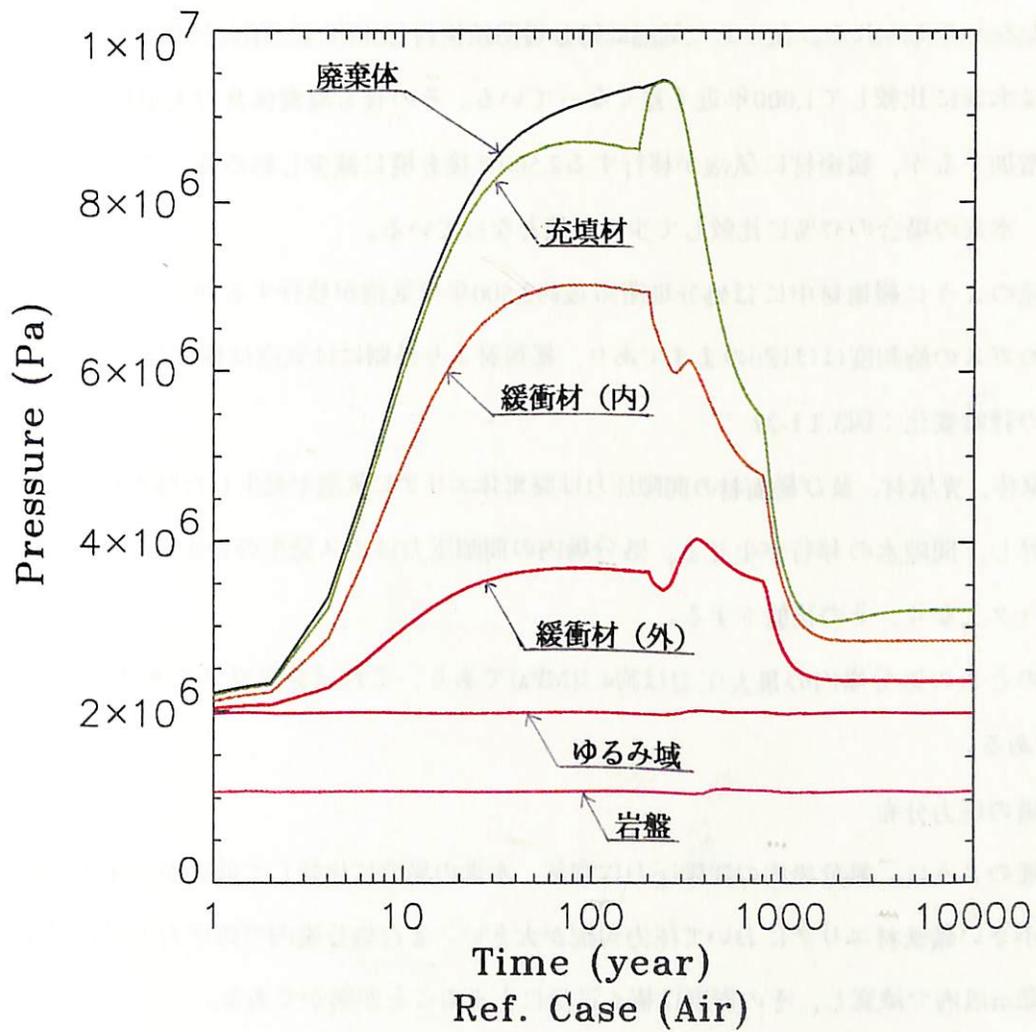


図 3.2.1-20 間隙圧力 (空気：基本ケース)

(3) ケース3 (基本ケース, 発生ガス; 二酸化炭素)

試算結果を図3.2.1-21~25に示す。ケース3は基本ケース1と同一条件下において発生ガスの種類を二酸化炭素として解析したものである。なお、前述のようにガスの発生量は空気と等モルであると仮定した。

①気泡の発生と移行; 図3.2.1-21

二酸化炭素の場合には処分場閉鎖後約260年近くまで廃棄体中に気泡が発生しない。これは二酸化炭素の純水中への溶解量が水素の約40倍(25℃)であること、及び発生期間が350年間と短いことによると考えられる。発生した気泡は処分場閉鎖後約1,140年で充填材外側エリアに移行するが、これは水素に比較して1,000年近く遅くなっている。その後も廃棄体及び充填材エリアのガス飽和度は増加するが、緩衝材に気泡が移行する2,500年後を境に減少し始める。このピーク値は25%であり、水素の場合の37%に比較して少ない値となっている。

上述のように緩衝材中には処分場閉鎖後約2,500年で気泡が移行するが、二酸化炭素は高溶解度のためガスの飽和度はほぼ0のままであり、緩衝材より外側には気泡は移行しないと予測される。

②圧力の経時変化; 図3.2.1-22

廃棄体、充填材、及び緩衝材の間隙圧力は廃棄体エリアに気泡が発生した時点からその成長に従って上昇し、間隙水の移行が生じる。処分場内の間隙圧力はガス発生停止直後の閉鎖後約380年後にピークとなり、その後低下する。

このときの処分場内の最大圧力は約4.3[MPa]であり、これは発生ガスを水素とした場合のほぼ1/2である。

③処分場の圧力分布

上述のように、処分場内の間隙圧力は空気、水素の場合に比較して低いが、圧力分布は透過性の最も小さい緩衝材エリアにおいて圧力勾配が大きい。また処分場内での圧力上昇はほぼ処分施設近傍の数m以内で減衰し、その影響は極く近傍に止まることが明かである。

以上の挙動は空気による解析と同一の傾向を示した。

④間隙水、ガスの流速、流向; 図3.2.1-23, 24

間隙水はガス発生によって処分場内の間隙圧力の増減に従って変化し、間隙圧力の勾配に従ってガス発生エリアを中心として放射状に移行する。また、ガスの発生終了後も緩衝材から外側に気泡が移行していないことから、すぐには毛管圧の効果による水の浸入は生じず、間隙圧力の勾配に従ってガス発生エリアを中心として放射状に移行する。ガスが緩衝材中を移行中の閉鎖後約3,000年頃から内部の間隙圧力の低下により水の浸入が開始する。最大間隙水流速は緩衝材中で 6.4×10^{-4}

[m/y], ゆるみ域でも 8.5×10^{-4} [m/y]であり, 水素の場合のほぼ40%程度である。

一方ガスの移行については, 10,000年間で処分場外に気泡がほとんど放出されないことから予測されるように, ガスの流速は緩衝材中で1.1 [m/y]であり水素の場合に比べ1/100程度となっている。

⑤ガスの移行範囲；図3.2.1-25

二酸化炭素は水に対する溶解度が高いため, 空気, 水素に比較して気泡の発生する体積が少なく, したがって間隙圧力の上昇も少ない。このため気泡の移行が緩慢となり, 図3.2.1-25に示すようにガスの発生が停止した後も処分施設外への気泡の放出は生じていないことが明かである。

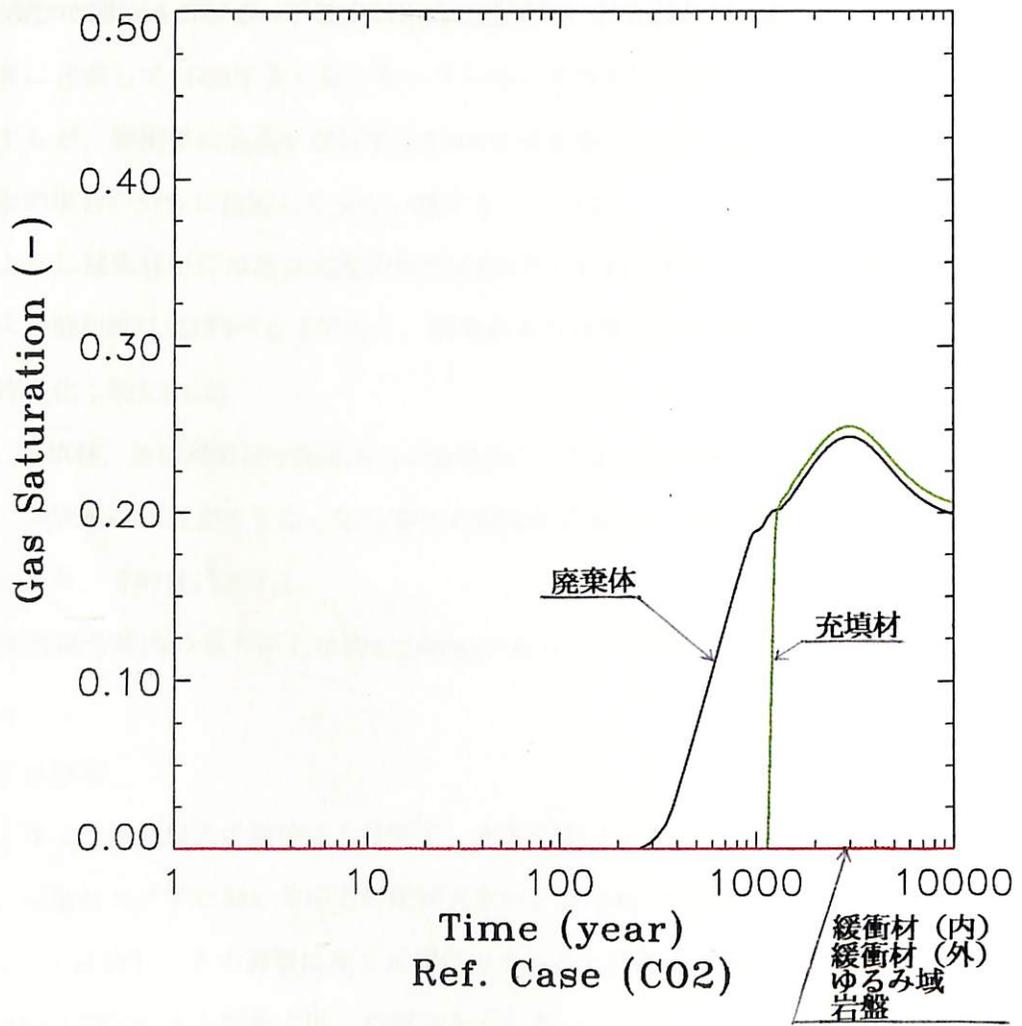


図 3.2.1-21 ガス飽和度 (CO₂: 基本ケース)

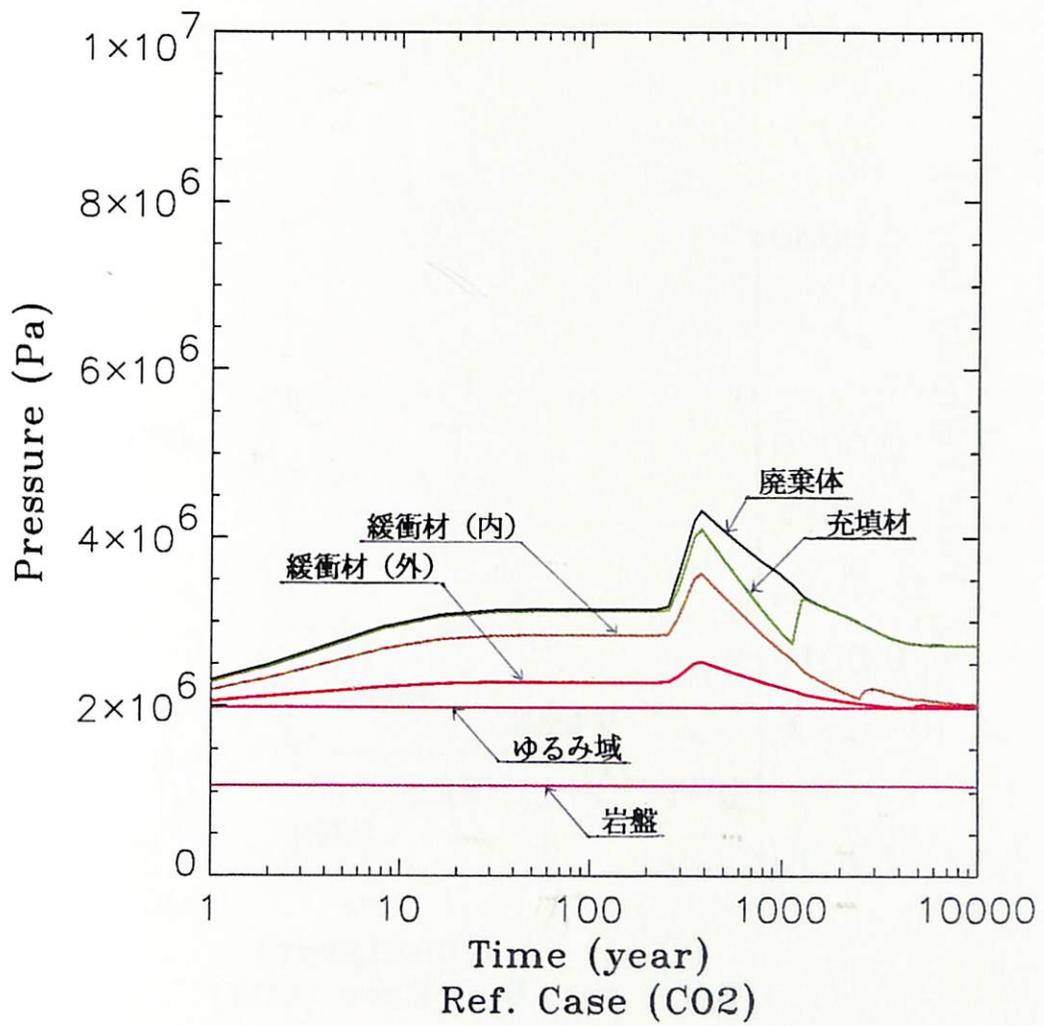


図 3.2.1-22 間隙圧力 (CO₂: 基本ケース)

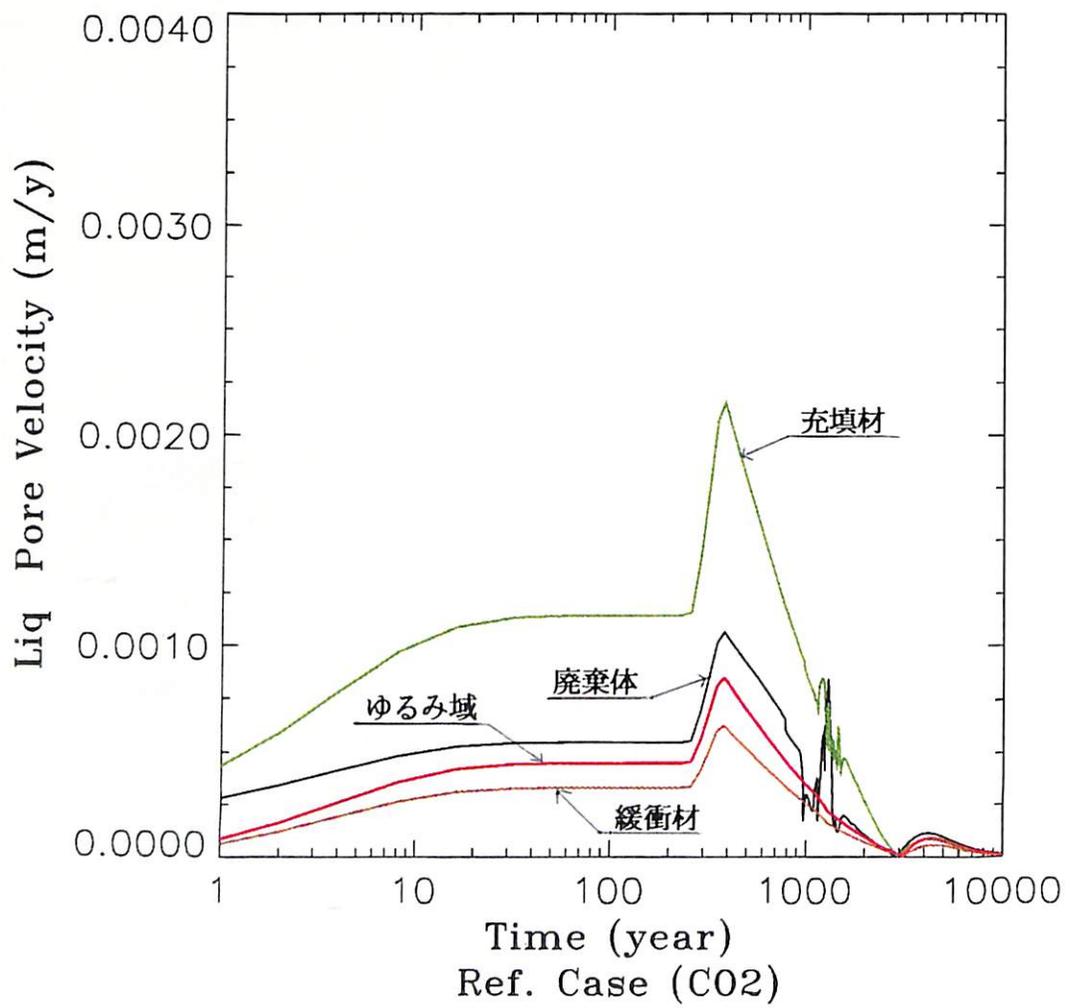


図 3.2.1-23 間隙水流速 (CO₂: 基本ケース)

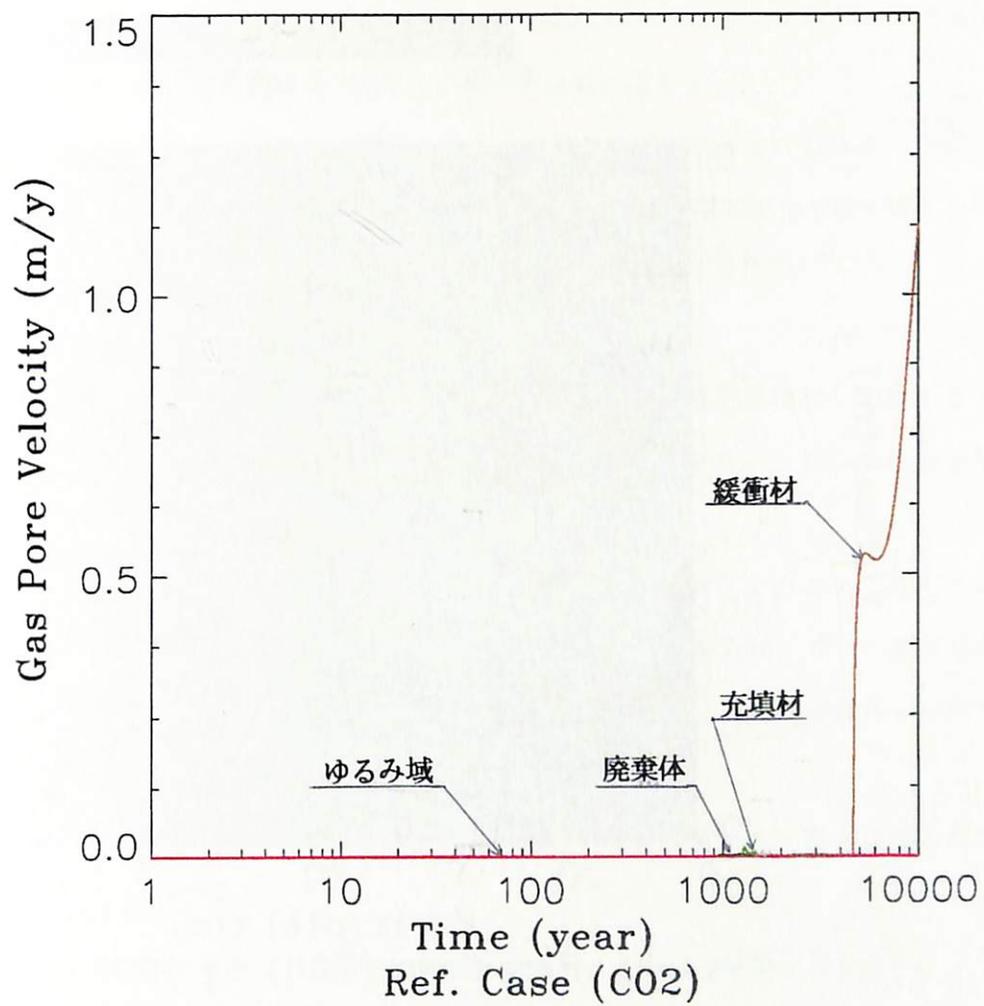


図 3.2.1-24 ガス流速 (CO₂: 基本ケース)

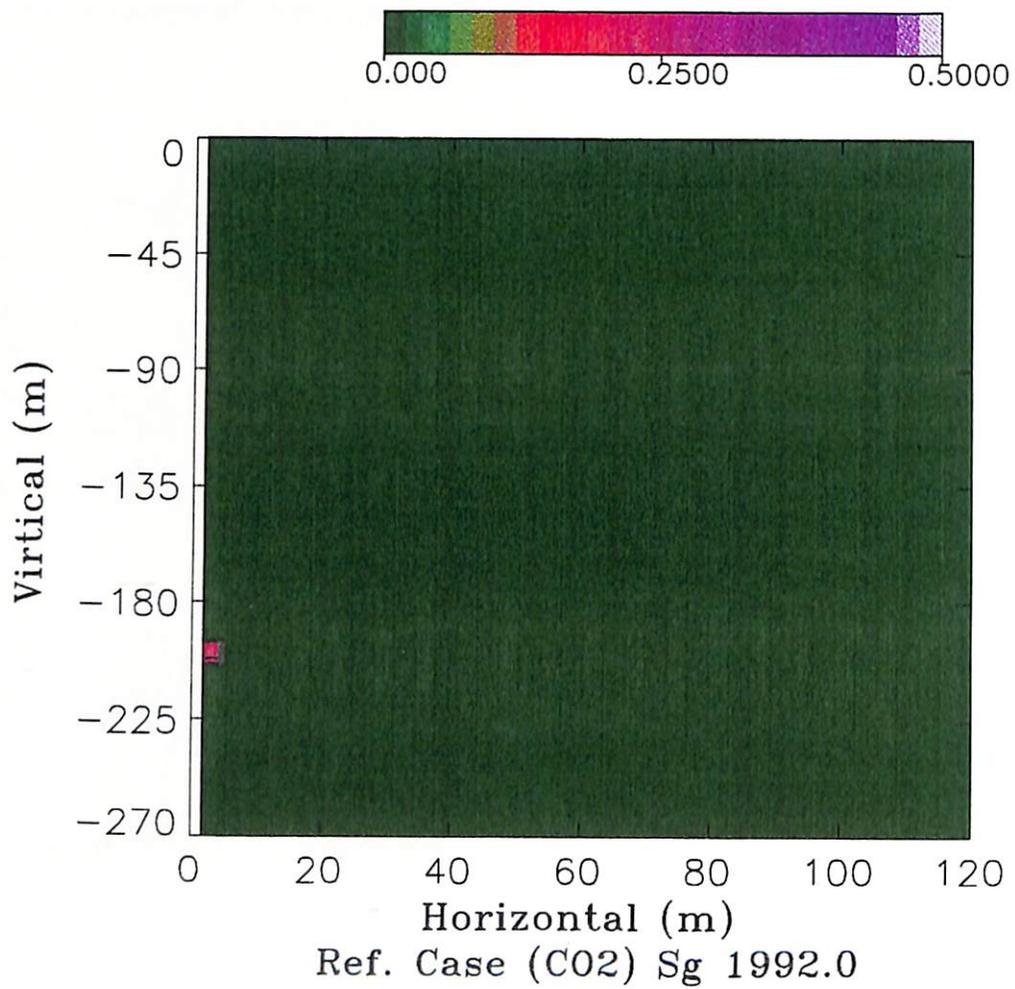


図 3.2.1-25 ガス飽和度分布-1,990 年度 (CO₂: 基本ケース)

(4) ケース4 (ポーラスコンクリート, 発生ガス; 水素)

試算結果を図3.2.1-26～30に示す。ケース4はケース1の解析条件を基礎として、充填材の特性については2.3及び2.4節で特性試験を実施したポーラスコンクリートの値を適用したものである。

①気泡の発生と移行; 図3.2.1-26

処分場閉鎖後約6年ほどで廃棄体中に気泡が発生し、気泡は処分場閉鎖後約160年時点でガス飽和度が残留飽和度の18%に達したところで充填材エリアに移行する。充填材としてポーラスコンクリートを用いた場合、廃棄体に対して間隙率が2倍、絶対透過係数が 2.2×10^4 倍と大きいいため、発生したガスは急速に充填材層に移行し、廃棄体エリアのガス飽和度の上昇は停止する。一方充填材のガス飽和度は増加を続け、処分場閉鎖後10,000年後において44%に達する。

このように高透過性物質を充填材として用いた場合、ガスの移行フロントは基本ケースに比較して数十年早く移動し、廃棄体エリアのガス飽和度が上昇しない。また閉鎖後10,000年後においても間隙水の浸入がないことも相異点である。

②圧力の経時変化; 図3.2.1-27

廃棄体エリアの間隙圧力は処分場閉鎖後約150年に充填材エリアに気泡が移行し始めるまで上昇し、最大約9.3[MPa]に達した後10,000年時点でほぼ3.2[MPa]まで低下する。これらの圧力は発生ガスを水素とした場合とほぼ等しい。

一方緩衝材中では、約150年後に充填材中に気泡が移行して廃棄体エリアのガスが放出され、間隙水の流量が低下し間隙圧力は低下を始める。緩衝材層に気泡が到達した後、ガスの流入量が基本ケースに比較して多いことから、飽和度の増加と毛管圧の効果による一時的な間隙圧力の増加が顕著となる。

地層中では処分場閉鎖後約170年でゆるみ域に気泡が移行して間隙圧力の上昇が観察されるが、その量は0.08[MPa]程度に止まる。

以上のようにガスの移行がやや早いことを除けば基本ケースと同様の挙動を示した。

③処分場の圧力分布

処分場内の間隙圧力が最大となった時点での圧力分布では、廃棄体/充填材間に圧力差が見られるほかは、基本ケースと同様に緩衝材層での圧力勾配が最も大きく、ガス発生による間隙圧力の上昇の影響も処分場の極く近傍に止まる。

④間隙水, ガスの流速, 流向; 図3.2.1-28～29

図3.2.1-28に示すように、間隙水の最大流速は緩衝材中で 2.0×10^3 [m/y]であり、ゆるみ域では 2.9×10^2 [m/y]と基本ケースに比較してやや大きい。一方充填材中の流速は間隙率が大きくなったこと

から60%程に低下している。いずれにしてもこれらの数値は非常に小さい値であることに変わりはない。

一方ガスの移行については、ゆるみ域で1.1[m/y]と基本ケースの2倍以上であるが、これはガス放出量が基本ケースに比較して大きくなっていることによると思われる。また、ガス飽和度の小さい条件でガスが移行する緩衝材層では13.5[m/y]とこちらは基本ケースの1/8程度である。これは緩衝材中のガス飽和度が大きくなっているほか、基本ケースで見られるピーク値が無くなっていることによるものである。

⑤ガスの移行範囲；図3.2.1-30

図3.2.1-30はガス発生速度が低下する800年時点での処分場近傍のガス飽和度分布を示したものであるが、処分場上方に飽和度6%を超える気泡の分布が見られること等、処分場近傍のガス飽和度分布は基本ケースと同様である。一方処分場内部は相対的に透過性の小さい廃棄体と透過性の大きい充填材で構成されることから、飽和度の分布が形成され、重力の効果により処分場上方にガス飽和度の高い領域が存在することがわかる。

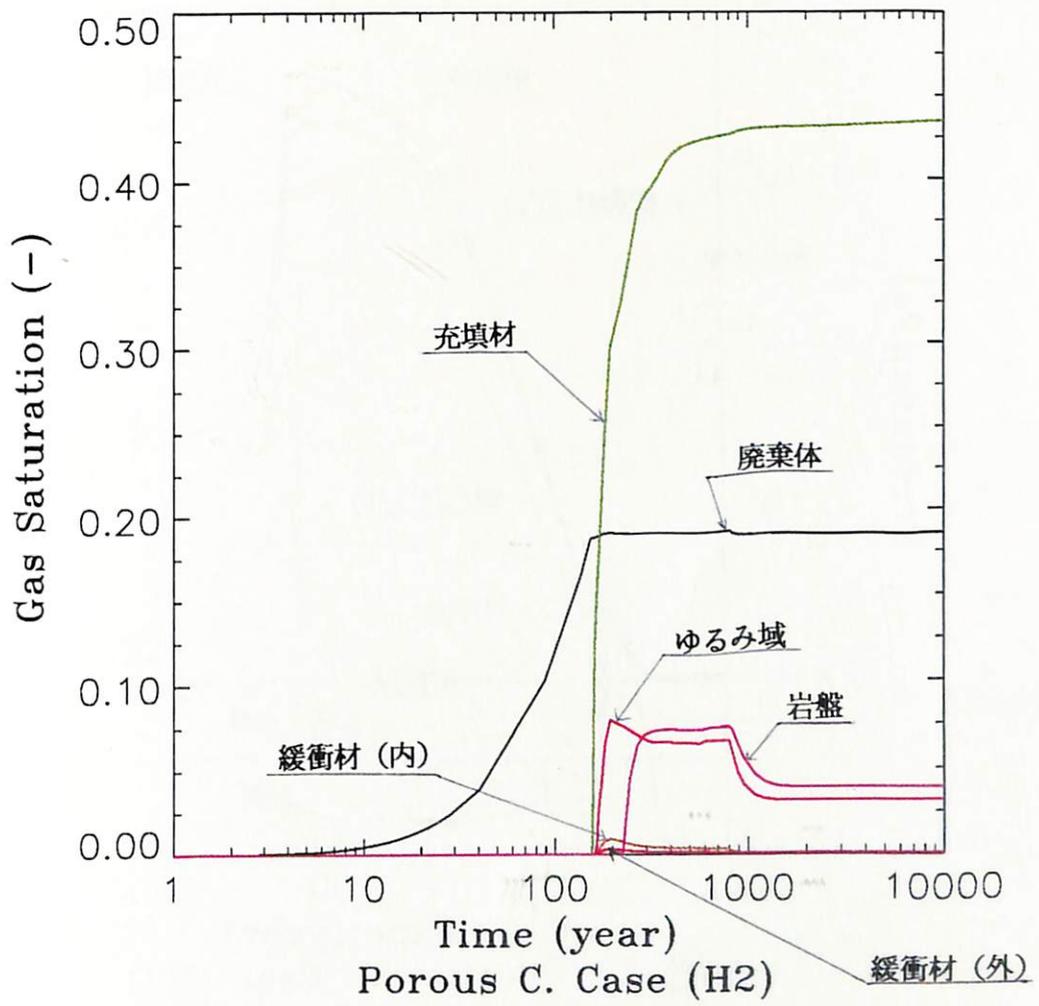


図 3.2.1-26 ガス飽和度 (H₂: ポーラスコンクリート)

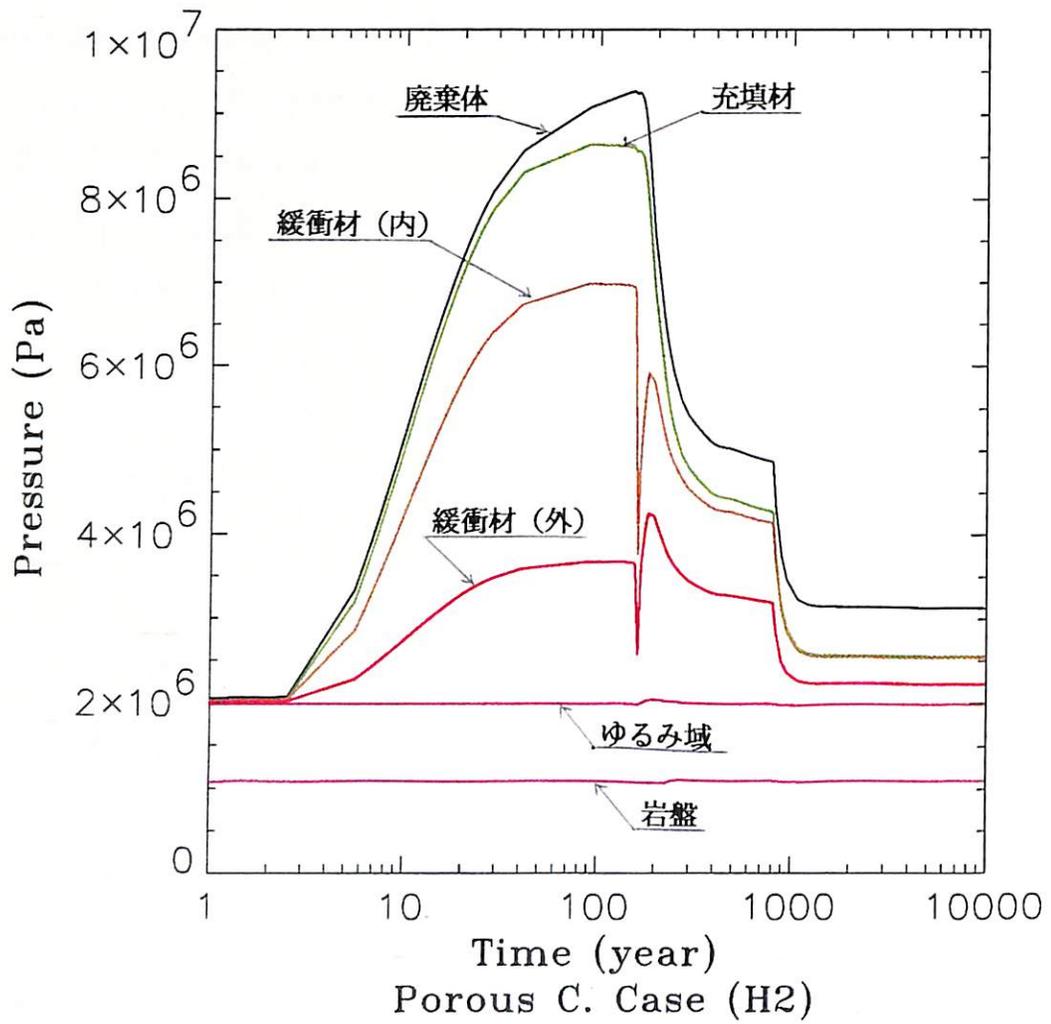


図 3.2.1-27 間隙圧力 (H₂: ポーラスコンクリート)

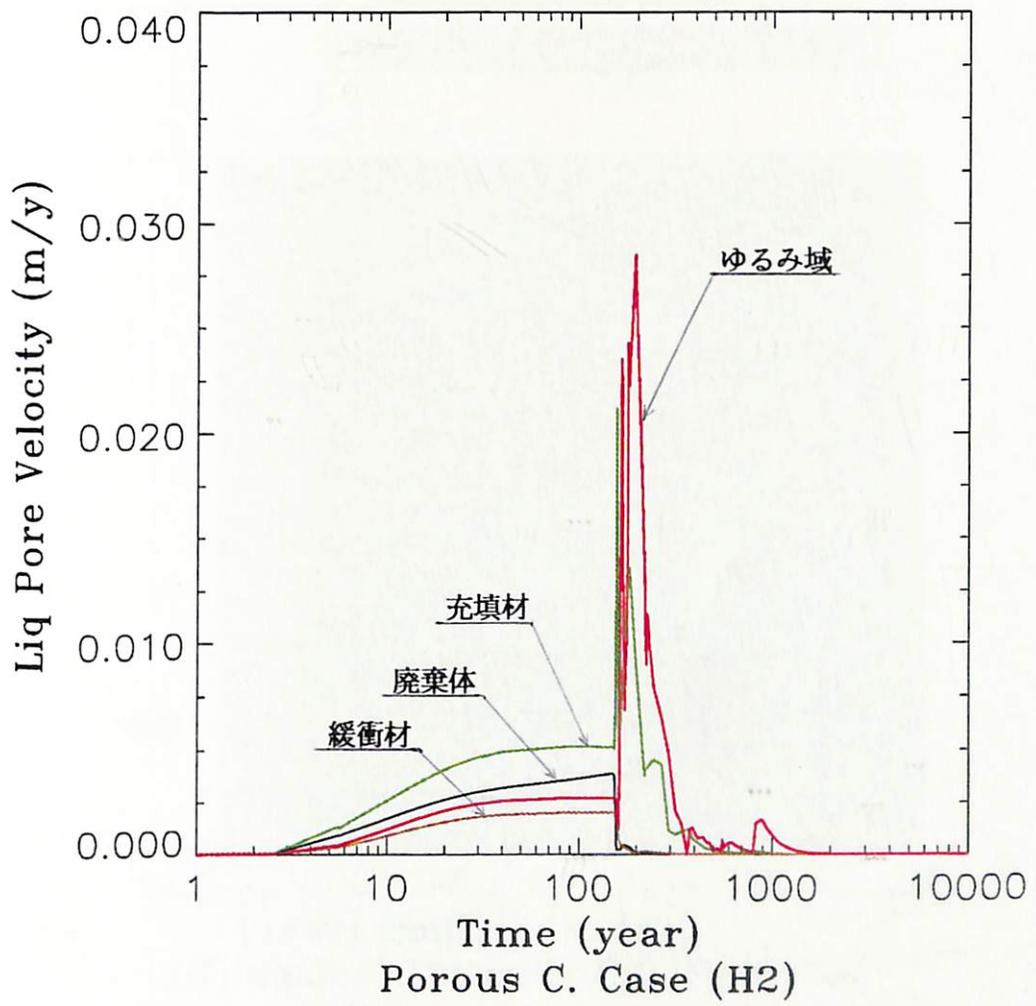


図 3.2.1-28 間隙水流速 (H₂: ポーラスコンクリート)

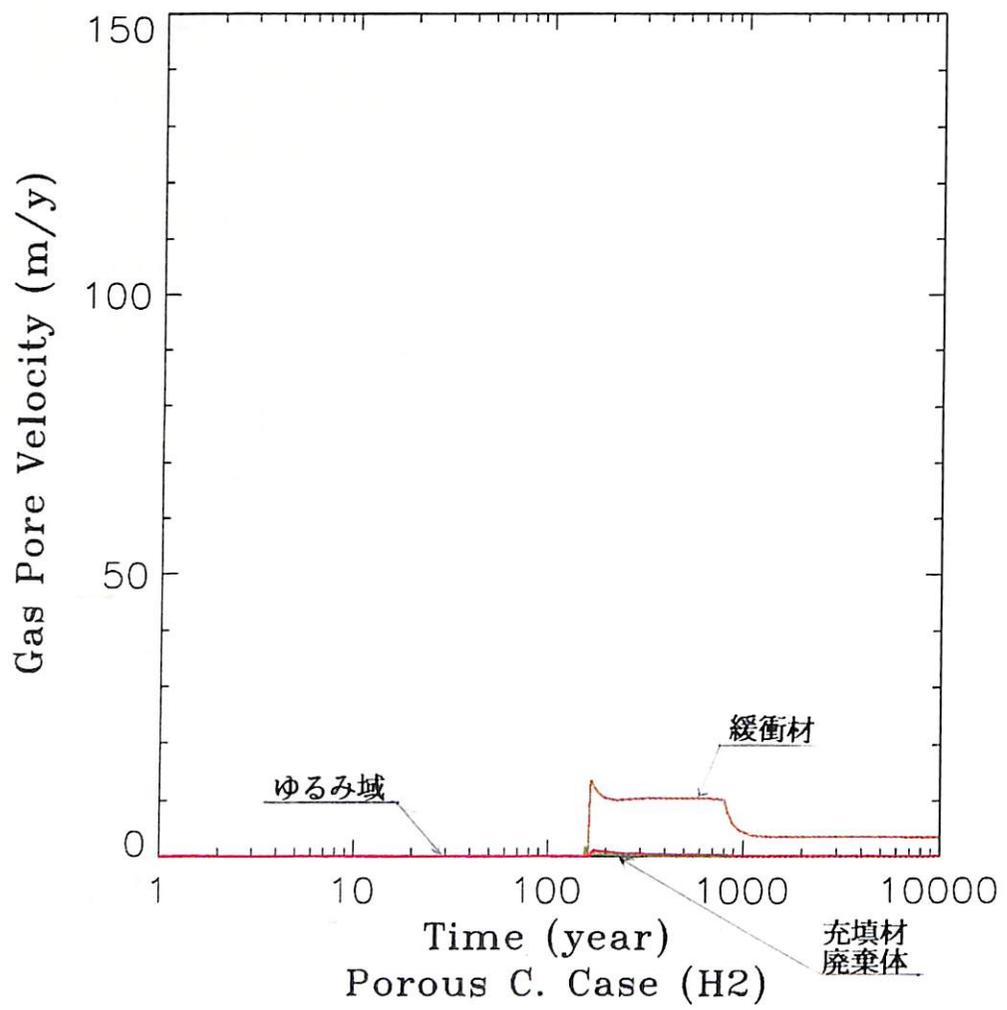


図 3.2.1-29 ガス流速 (H₂ : ポーラスコンクリート)

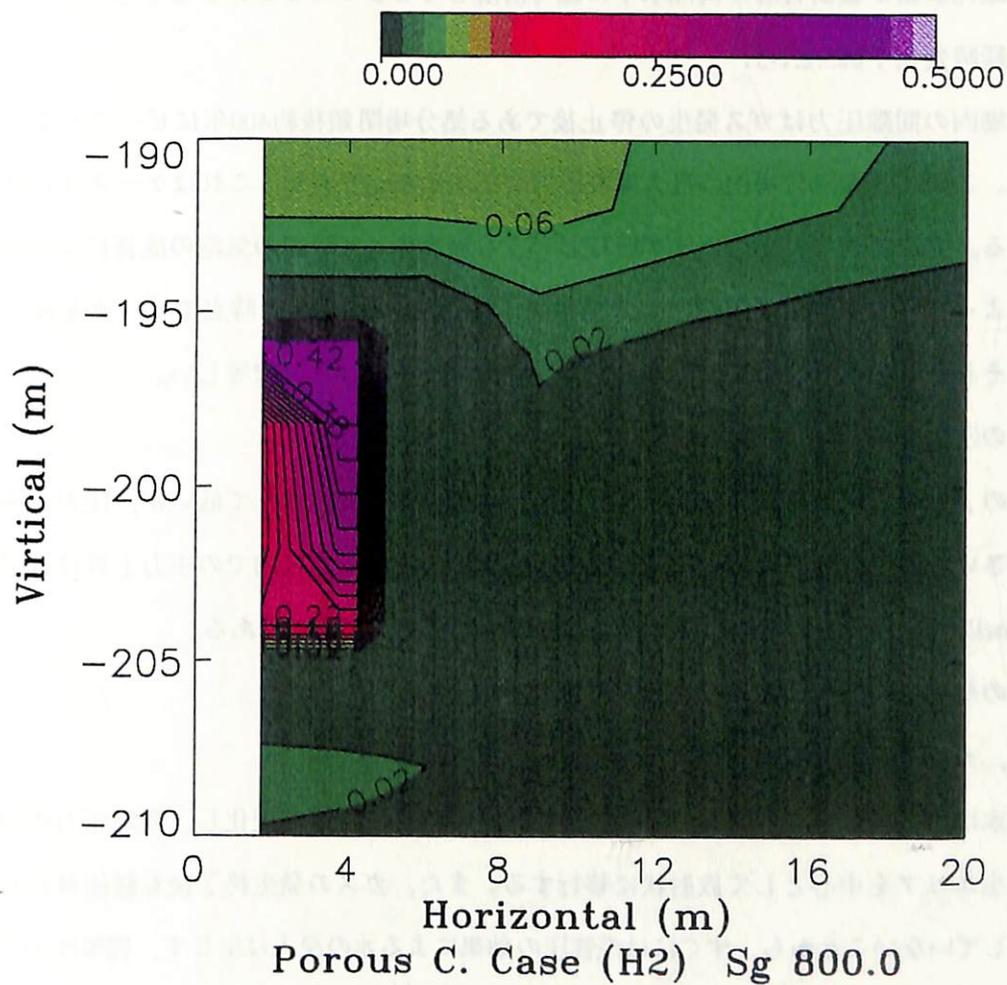


図 3.2.1-30 ガス飽和度分布-800 年度 (H₂: ポーラスコンクリート)

(5) ケース5 (ポーラスコンクリート, 発生ガス; 二酸化炭素)

試算結果を図3.2.1-31に示す。ケース5はケース3を基礎として、充填材として2.3, 及び2.4節で特性試験を行ったポーラスコンクリートを適用した場合について解析を行ったものである。

①気泡の発生と移行

二酸化炭素の場合には処分場閉鎖後約200年で廃棄体中に気泡が発生する。これは基本ケースと比較して約60年程早い。ところが本ケースでは発生した気泡は緩衝材エリアに現れない。これは充填材として設定したポーラスコンクリートの間隙率が26%とケース3の2倍であることから、発生した二酸化炭素が緩衝材層の間隙水中に総て溶解してしまったことによると考えられる。

②圧力の経時変化; 図3.2.1-31

処分場内の間隙圧力はガス発生が停止後である処分場閉鎖後約400年にピークとなり、その後低下する。このときの処分場内の最大間隙圧力は約4.4[MPa]であり、これはケース3とほとんど同じ値である。充填材から外側のバリア層においても廃棄体エリアでの気泡の成長による間隙水の押し出しによって圧力が増加するが、ガス発生終了後の閉鎖後400年の時点でピークを迎え、以後減少する。それぞれのバリア層における最大間隙圧力はケース3にほぼ等しい。

③処分場の圧力分布

上述のように、処分場内の間隙圧力は空気、水素の場合に比較して低いが、圧力分布は透過性の最も小さい緩衝材エリアにおいて圧力勾配が大きい。また処分場内での圧力上昇はほぼ処分施設近傍の数m以内で減衰し、その影響は極く近傍に止まることが明かである。

以上の挙動は空気による解析と同一の傾向を示した。

④間隙水, ガスの流速, 流向

間隙水はガス発生によって処分場内の間隙圧力の増減に従って変化し、間隙圧力の勾配に従ってガス発生エリアを中心として放射状に移行する。また、ガスの発生終了後も緩衝材から外側に気泡が移行していないことから、すぐには毛管圧の効果による水の浸入は生じず、間隙圧力の勾配に従ってガス発生エリアを中心として放射状に移行する。ガスが緩衝材中を移行中の閉鎖後約3,000年頃から内部の間隙圧力の低下により水の浸入が開始する。最大間隙水流速は緩衝材中で 6.4×10^{-4} [m/y], ゆるみ域でも 8.5×10^{-4} [m/y]であり、水素の場合のほぼ40%程度である。

一方ガスの移行については、10,000年間で処分場外に気泡がほとんど放出されないことから予測されるように、ガスの流速は緩衝材中で1.1 [m/y]であり水素の場合に比べ1/100程度となっている。

⑤ガスの移行範囲

二酸化炭素は水に対する溶解度が高いため、空気、水素に比較して気泡の発生する体積が少なく、

したがって間隙圧力の上昇も少ない。このため気泡の移行が緩慢となり、ガスの発生が停止した後も処分施設外への気泡の放出は生じていない。

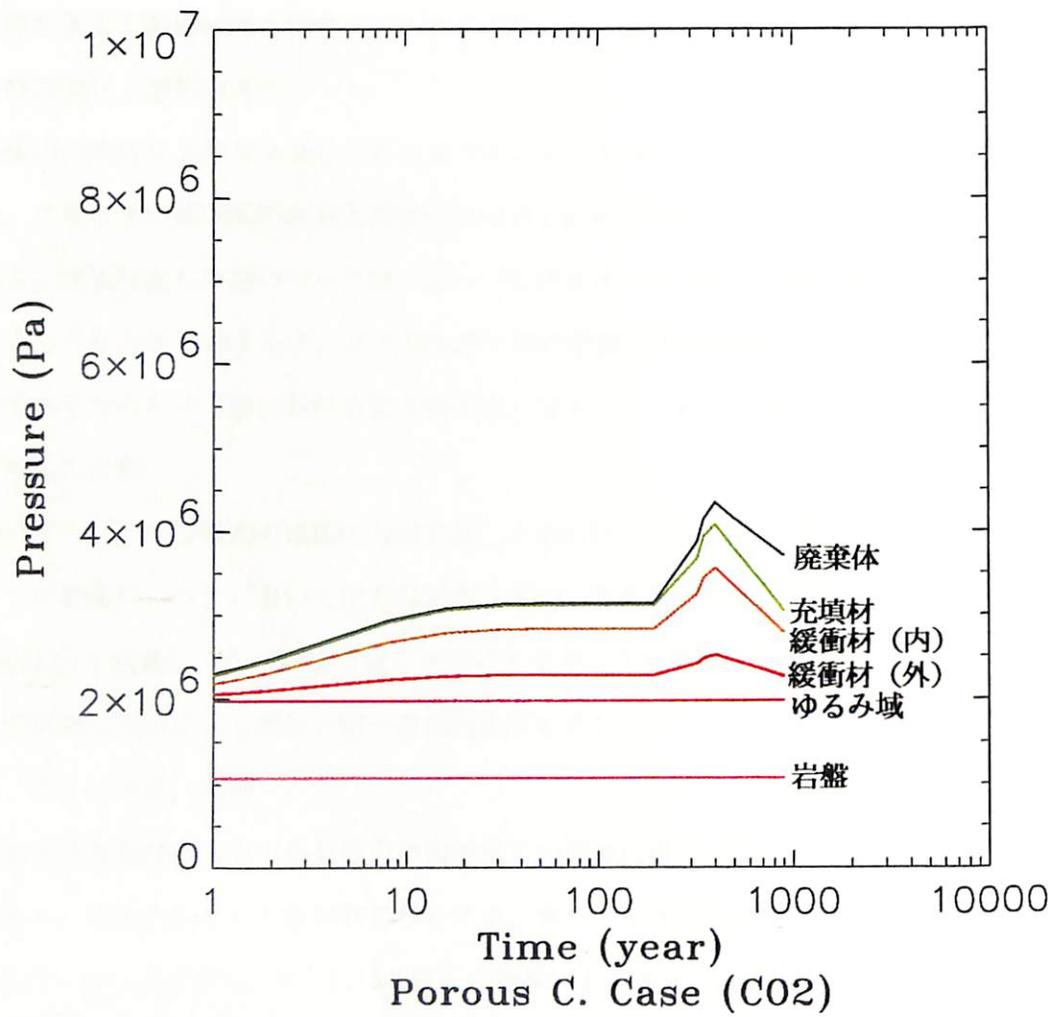


図 3.2.1-31 間隙圧力 (CO₂ : ポーラスコンクリート)

(6) ケース6 (凝灰岩, 発生ガス; 水素)

試算結果を図3.2.1-32~37に示す。ケース6はケース1の解析条件を基礎として、地層(ゆるみ域, 岩盤)の特性を2.3及び2.4節で特性試験を実施した東濃凝灰岩の値を適用したものである。

①気泡の発生と移行; 図3.2.1-32

ケース1と同じく処分場閉鎖後約4年ほどで廃棄体中に気泡が発生し、気泡は処分場閉鎖後約160年時点でガス飽和度が残留飽和度の18%に達したところで充填材エリアに移行する。地層に凝灰岩のデータを用いた場合でも処分場内のガス移行フロントの動きに変化はない。地層中に移行後のガス飽和度はゆるみ域で最大3%、岩盤で最大3~4%であり、ケース1の1/2程度となっている。これは本ケースの地層の物性が、ケース1に比較して間隙率がゆるみ域で2倍、岩盤で12.7倍、絶対透過係数がそれぞれ 5.6×10^2 倍、5.6倍と大きいため、発生したガスは小さい飽和度でも移行することによる。

このように比較的高透過性の地層を適用した場合も、処分場内のガスの移行にはほとんど変化がないことが確認された。

②圧力の経時変化; 図3.2.1-33

廃棄体エリアの間隙圧力は、処分場閉鎖後約150年に充填材エリアに気泡が移行し始めるまで上昇し、最大約9.3[MPa]に達した後10,000年時点ではほぼ3.2[MPa]まで低下する。これらの圧力は発生ガスを水素としたケース1に等しい。

緩衝材中においても、処分場閉鎖後約150年後に充填材中に気泡が移行して廃棄体エリアのガスが放出され、間隙水の流量が低下し間隙圧力は低下を始める。

地層中では処分場閉鎖後約170年でゆるみ域に気泡が移行して間隙圧力の上昇が観察されるが、その量は0.01[MPa]とケース1よりさらに小さい。

以上のように地層中で間隙圧力が小さいことを除けば基本ケースと同様の挙動を示した。

③処分場の圧力分布

処分場内の間隙圧力が最大となった時点での圧力分布では、基本ケースと同様に緩衝材層での圧力勾配が最も大きく、ガス発生による間隙圧力の上昇の影響も処分場の極く近傍に止まる。

④間隙水, ガスの流速, 流向; 図3.2.1-34~35

図3.2.1-34に示すように、間隙水の最大流速は緩衝材中で 2.0×10^3 [m/y]でケース1と同一であるが、ゆるみ域では 8.0×10^3 [m/y]と基本ケースに比較して1/2近くになっている。

一方ガスの移行については図3.2.1-35に示すように、ゆるみ域で1.1[m/y]と基本ケースの2.4倍であるが、ガス飽和度の小さい条件でガスが移行する緩衝材層では280[m/y]とこちらも基本ケースの

2.3倍程である。これは本評価のように比較的ガスの透過し易い条件下では、ガスの移行は間隙水より地層の透過性の影響をより強く受けるためと考えられる。

⑤ガスの移行範囲；図3.2.1-36～37

図3.2.1-36は、処分場から放出されたガスが地表に到達した後の、閉鎖後約450年時点でのガスの飽和度分布である。ケース1に比較して地表に至るガスの移行経路においてガス飽和度が小さいことがわかる。これは前述のようにケース1に比較して地層の間隙率、絶対透過係数が増加していることによるものである。また、図3.2.1-37はガス発生速度が低下する800年時点での処分場近傍のガス飽和度分布を示したものであるが、ここでも図3.2.1-36と同様の傾向が現れている。

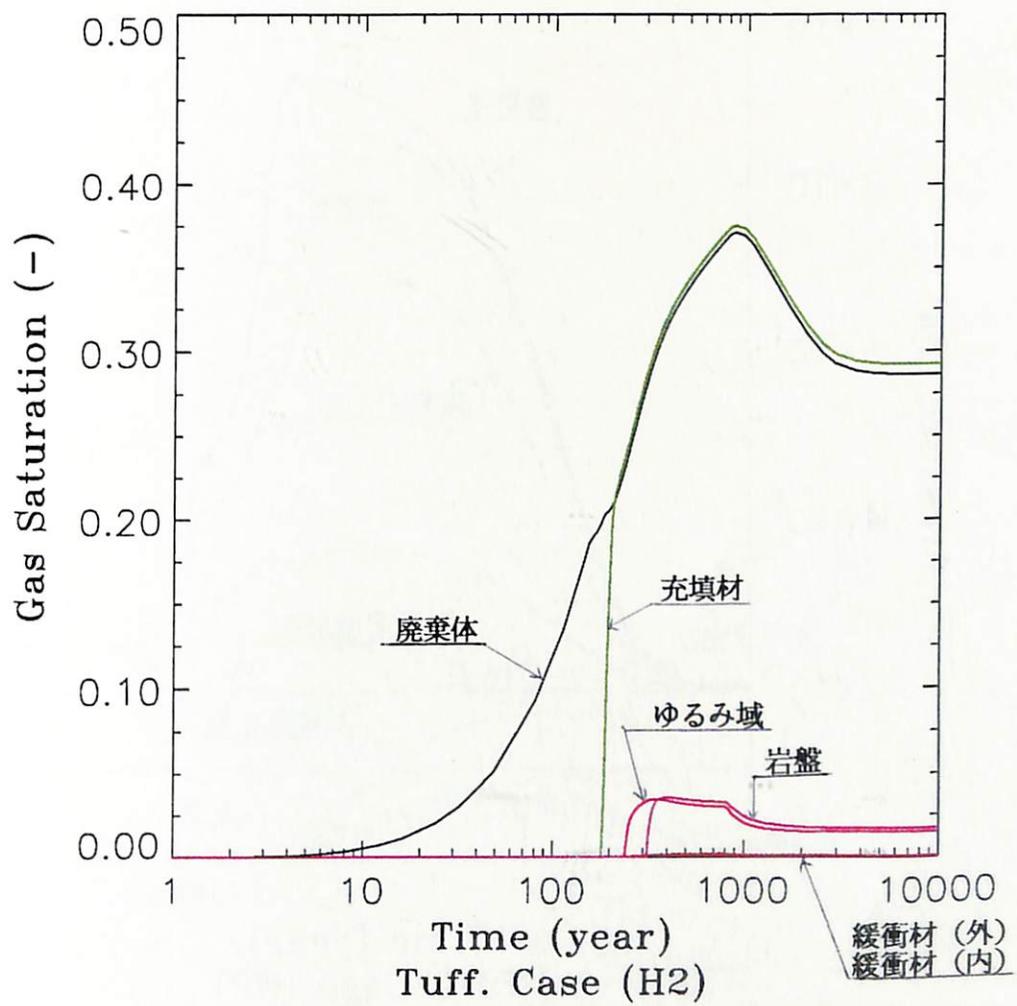


図 3.2.1-32 ガス飽和度 (H₂: 凝灰岩)

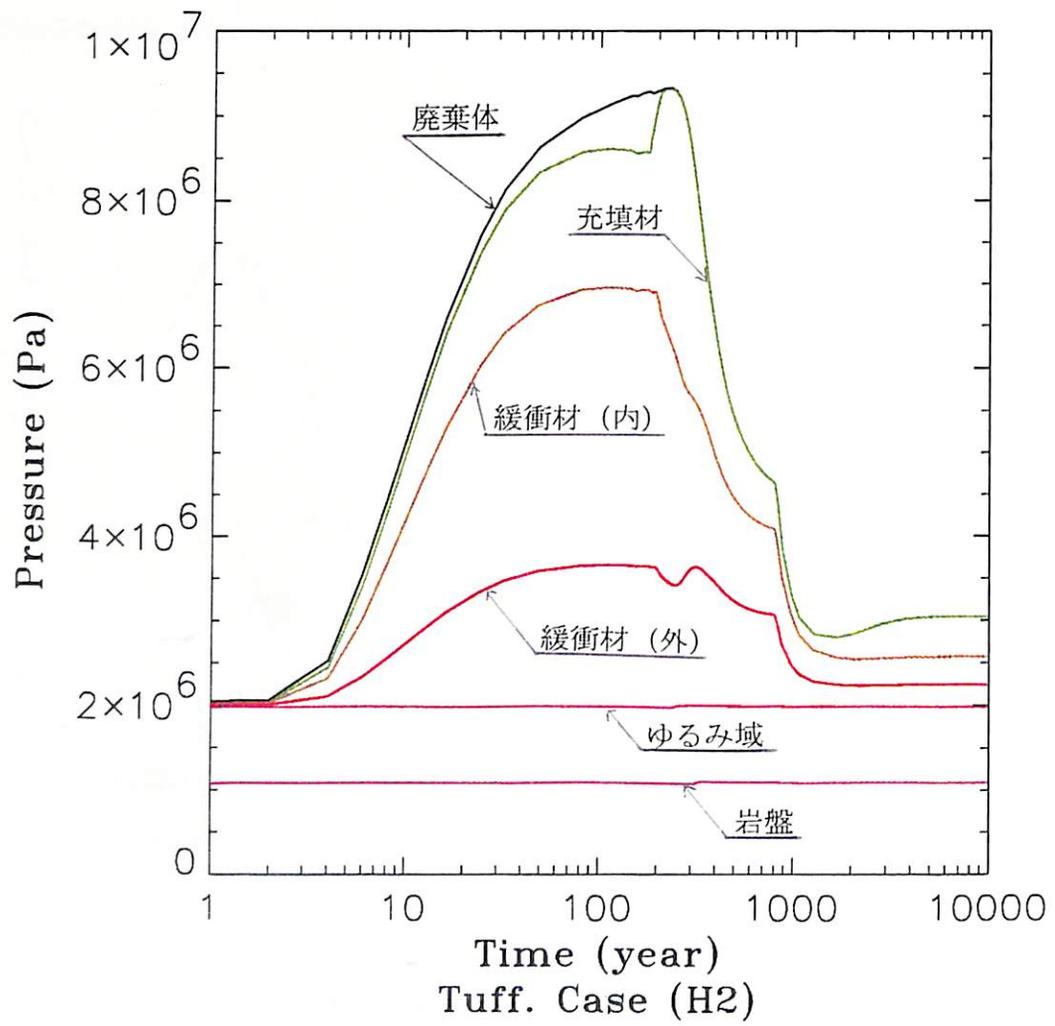


図 3.2.1-33 間隙圧力 (H₂: 凝灰岩)

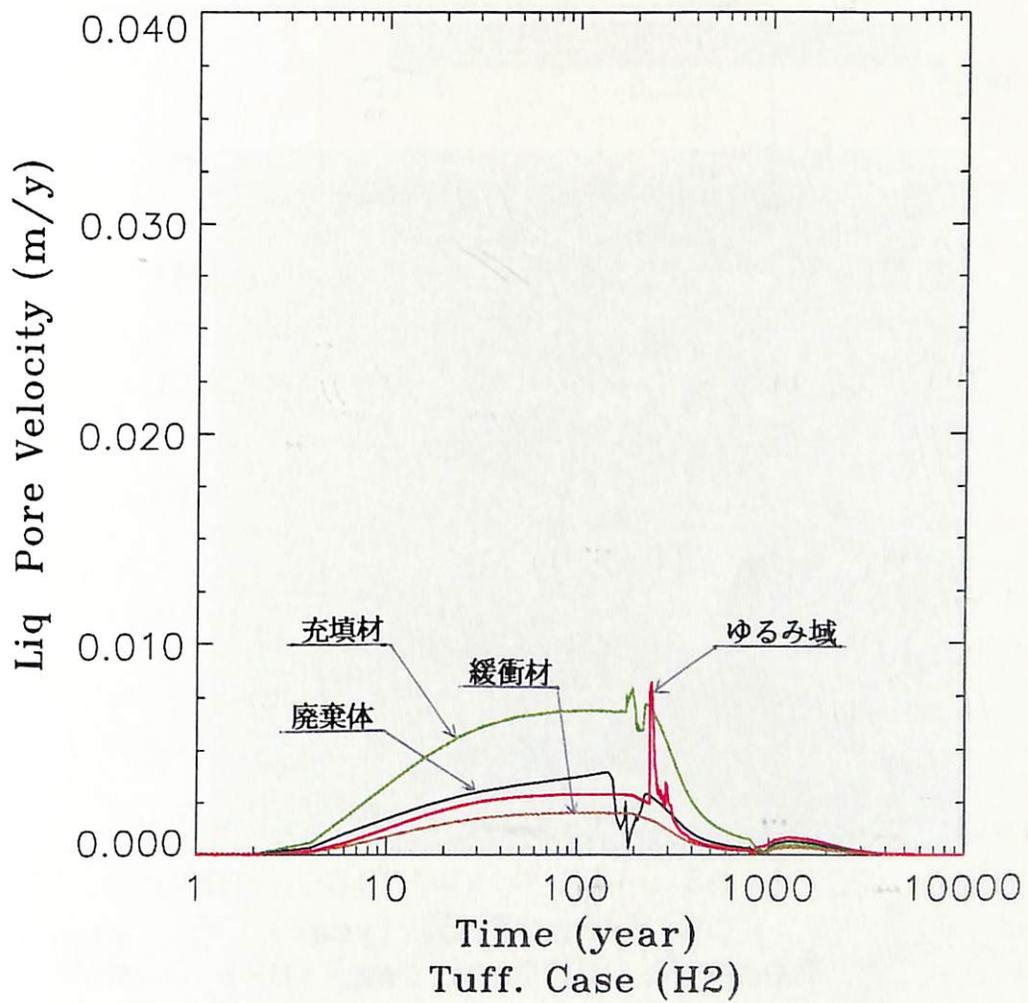


図 3.2.1-34 間隙水流速 (H₂: 凝灰岩)

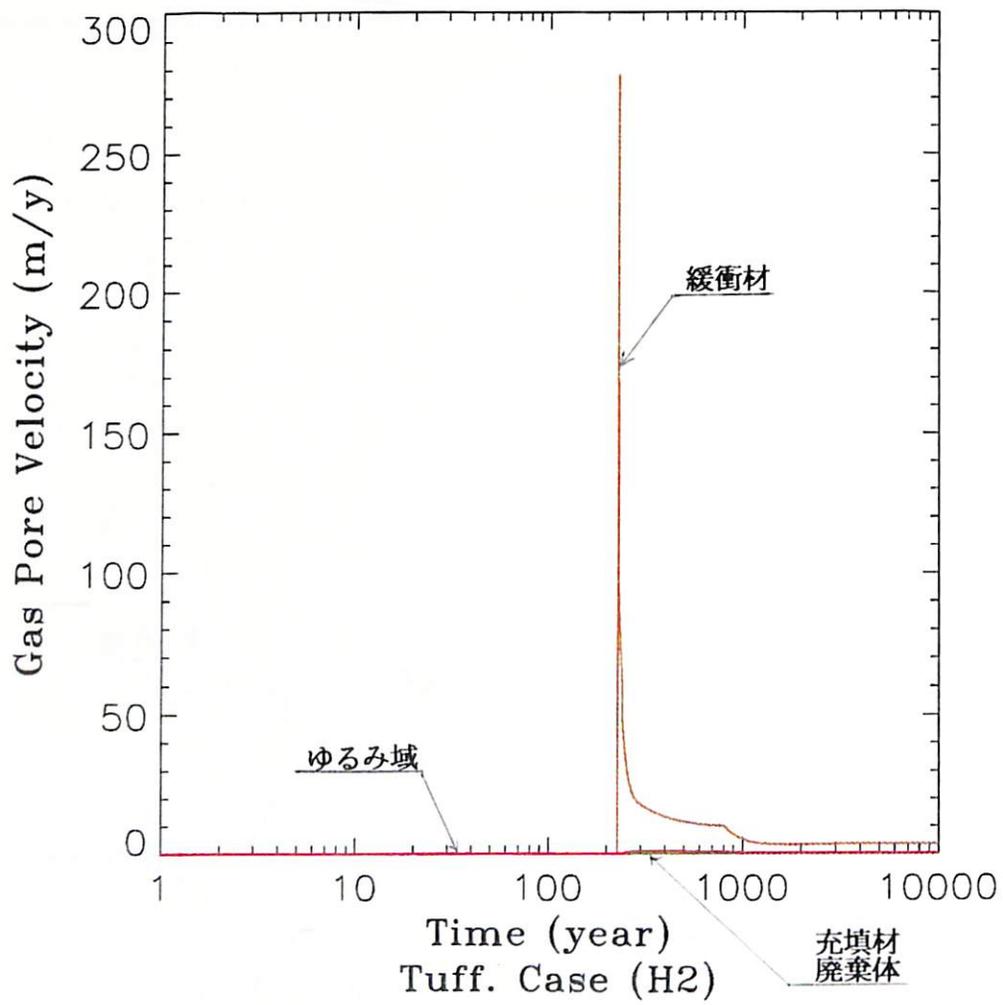


図 3.2.1-35 ガス流速 (H₂: 凝灰岩)

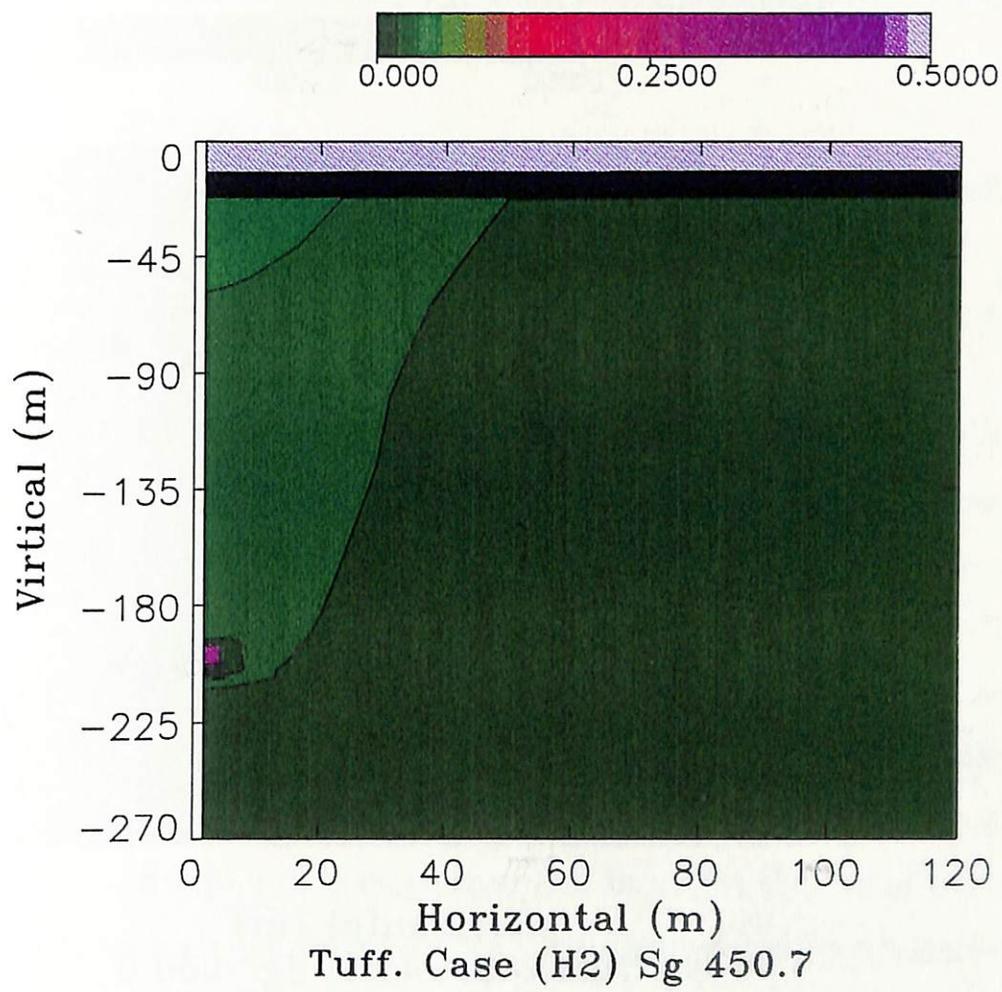


図 3.2.1-36 ガス飽和度分布—450 年度 (H₂: 凝灰岩)

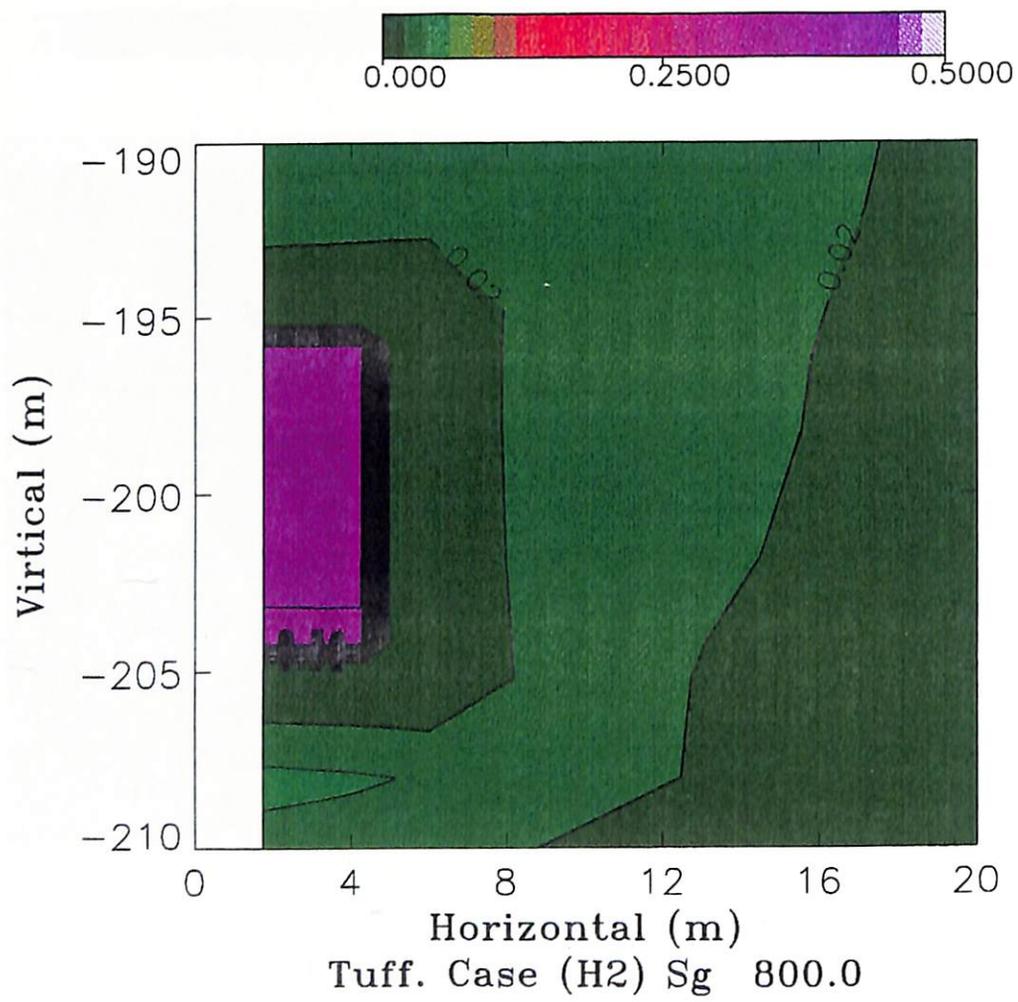


図 3.2.1-37 ガス飽和度分布-800 年度 (H₂: 凝灰岩)

(7) ケース7 (凝灰岩, 発生ガス; 二酸化炭素)

試算結果を図3.2.1-38～39に示す。ケース7はケース3を基礎として、地層(ゆるみ域, 岩盤)の特性を2.3及び2.4節で特性試験を実施した東濃凝灰岩の値を適用したものである。

①気泡の発生と移行; 図3.2.1-38

本ケースは処分場閉鎖後約260年近くまで廃棄体中に気泡が発生しない。また、発生した気泡は処分場閉鎖後約1,130年で充填材外側エリアに移行するが、これもケース3とほぼ同じである。その後も廃棄体及び充填材エリアのガス飽和度は増加するが、緩衝材に気泡が移行する2,500年後に境に減少し始める。このピーク値は25%であり、緩衝材より外側には気泡は移行しない。これもケース3と同じである。

②圧力の経時変化; 図3.2.1-39

処分場内の間隙圧力はガス発生停止直後の閉鎖後約380年後にピークとなり、その後低下する。このときの処分場内の最大圧力は約4.3[MPa]であり、これはケース3と同じである。また、その他のバリア層における圧力の上昇、ピーク値、ピーク値到達時期も全てケース3と同様であった。

③処分場の圧力分布

上述のように、処分場内の間隙圧力は空気、水素の場合に比較して低いが、圧力分布は透過性の最も小さい緩衝材エリアにおいて圧力勾配が大きい。また処分場内での圧力上昇はほぼ処分施設近傍の数m以内で減衰し、その影響は極く近傍に止まることが明かである。

以上の挙動は空気による解析、及びケース3と同一の傾向を示した。

④間隙水, ガスの流速, 流向

間隙水はガス発生によって処分場内の間隙圧力の増減に従って変化し、間隙圧力の勾配に従ってガス発生エリアを中心として放射状に移行する。また、ガスの発生終了後も緩衝材から外側に気泡が移行していないことから、すぐには毛管圧の効果による水の浸入は生じず、間隙圧力の勾配に従ってガス発生エリアを中心として放射状に移行する。ガスが緩衝材中を移行中の閉鎖後約3,000年頃から内部の間隙圧力の低下により水の浸入が開始する。最大間隙水流速は緩衝材中で 6.3×10^{-4} [m/y]、ゆるみ域でも 9.1×10^{-4} [m/y]であり、ケース3と同様である。

一方ガスの移行についても、ケース3と同様二酸化炭素の水に対する溶解量が多いことから、ガス発生が継続中である処分場閉鎖後10,000年間経過後においても処分場外に気泡が放出されることはなく、緩衝材中でのガスの最大流速1.1 [m/y]についてもケース3と同じであった。

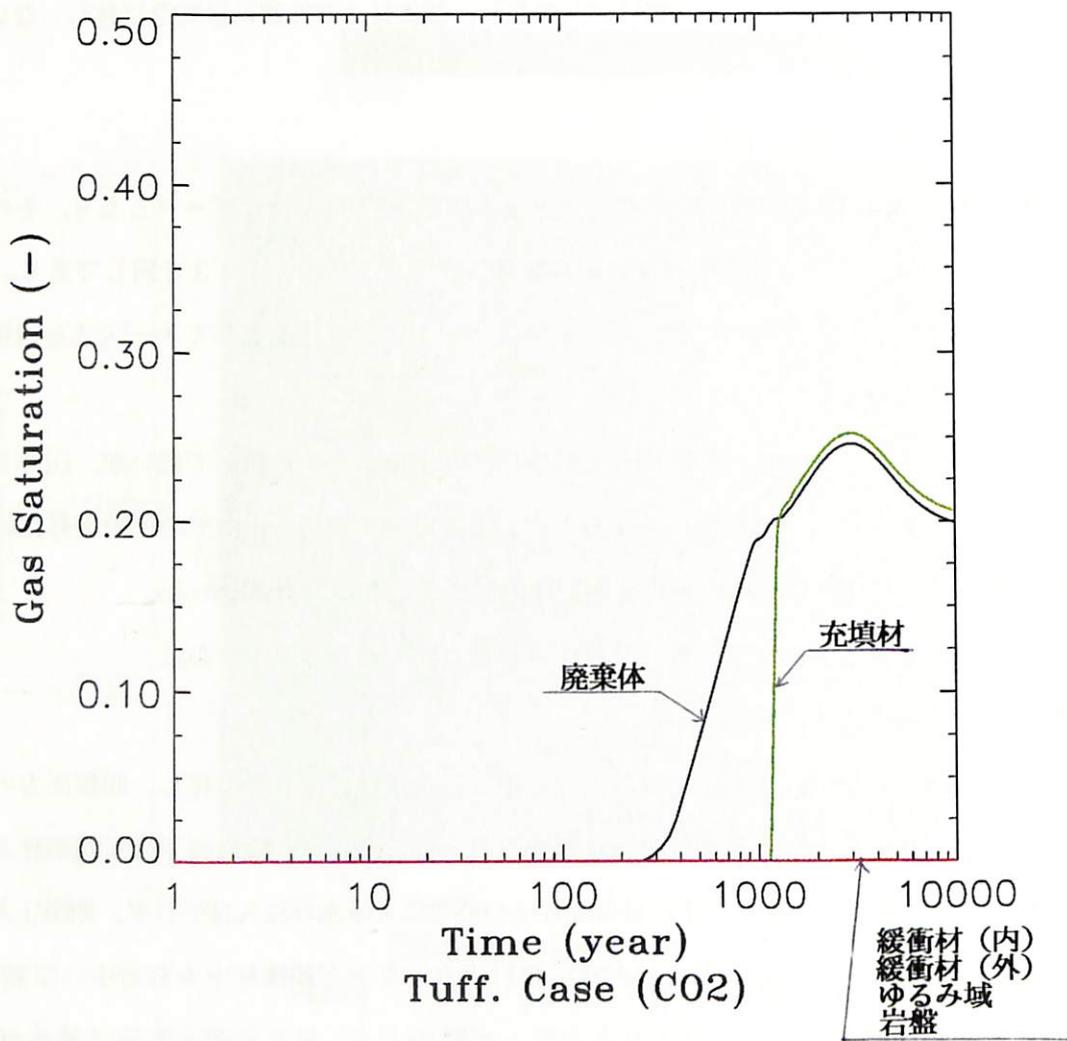


図 3.2.1-38 ガス飽和度 (CO₂: 凝灰岩)

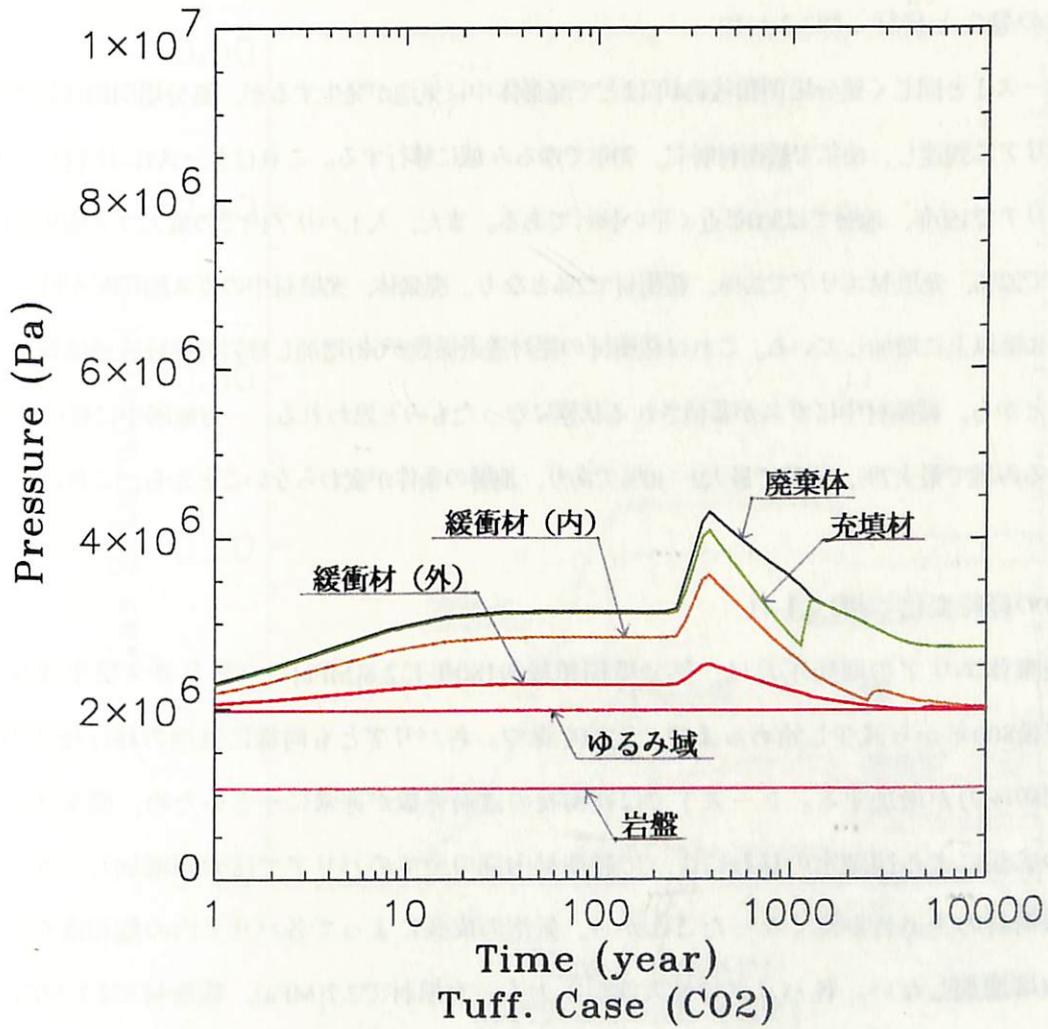


図 3.2.1-39 間隙圧力 (CO₂: 凝灰岩)

(8) ケース 8 (ベントナイト/砂, 発生ガス; 水素)

試算結果を図3.2.1-40～43に示す。ケース 8 はケース 1 の解析条件を基礎として、緩衝材の特性を 2.3 及び 2.4 節で特性試験を実施したベントナイト/砂混合材 (重量比; 20/80) の値を適用したものである。

なお、ベントナイト/砂混合材の特性試験については、2.3 及び 2.4 節で述べたように間隙水の飽和の達成の問題、測定中の側面リークの問題、間隙率、毛管圧測定上の問題等解決すべき課題が多かったことから、ここではあくまで参考ケースとして示すこととする。

① 気泡の発生と移行; 図3.2.1-40

ケース 1 と同じく処分場閉鎖後約 4 年ほどで廃棄体中に気泡が発生するが、処分場閉鎖後約 55 年で充填材外側エリアに到達し、63 年で緩衝材層に、70 年でゆるみ域に移行する。これはケース 1 に比較して充填材等内側のバリアで 150 年、地層では 300 年近く早い移行である。また、人工バリア内での最大ガス飽和度は、廃棄体エリアで 22%、充填材エリアで 20%、緩衝材で 2% となり、廃棄体、充填材中のガス飽和度が低下し、緩衝材中では 10 倍以上に増加している。これは緩衝材の絶対透過係数が 6 桁増加し母岩の絶対透過係数より大きくなったことから、緩衝材中にガスが蓄積される状態になったものと思われる。一方地層中に移行後のガス飽和度はゆるみ域で最大 7%、岩盤で最大 9～10% であり、地層の条件が変わらないことから、これはケース 1 に等しい。

② 圧力の経時変化; 図3.2.1-41

廃棄体エリアの間隙圧力は、処分場閉鎖後約 180 年に 2.8 [MPa] に上昇しガス発生速度の低下する閉鎖後 800 年から減少し始めるまで一定値を保つ。各バリアとも同様に気泡の移行後その成長に従って間隙圧力が増加する。ケース 1 では緩衝材の透過係数が非常に小さいため、廃棄体エリアでの気泡の成長による間隙水の移行によって緩衝材内部の全てのバリアで圧力が増加したが、本ケースでは緩衝材の透過性が高くなったことから、気泡の成長によって各バリア内の飽和度が上昇するまで圧力は増加しない。各バリアの最大間隙圧力も、充填材で 2.7 [MPa]、緩衝材で 2.1 [MPa]、ゆるみ域で 2.0 [MPa] とケース 1 に比較して圧力上昇幅は非常に小さい。

③ 間隙水, ガスの流速, 流向; 図3.2.1-42～43

図3.2.1-42に示すように、間隙水の最大流速は透過性を大きくした緩衝材中で 8.7×10^{-3} [m/y] とケース 1 の約 4 倍であるが、ゆるみ域では 1.8×10^{-2} [m/y] と基本ケースほぼ同一値である。

一方ガスの移行については図3.2.1-43に示すように、ゆるみ域で 7.2×10^{-1} [m/y] と基本ケースの 1.6 倍であるが、緩衝材層では 1.1 [m/y] と基本ケースの 1/100 となっている。これは緩衝材中では透過係数が 6 桁増加し、また毛管圧が小さくなったことからガス飽和度が 10 倍以上増加したためケース 1 と同程度の放出量であっても流速が大きく低下することによるものと考えられる。

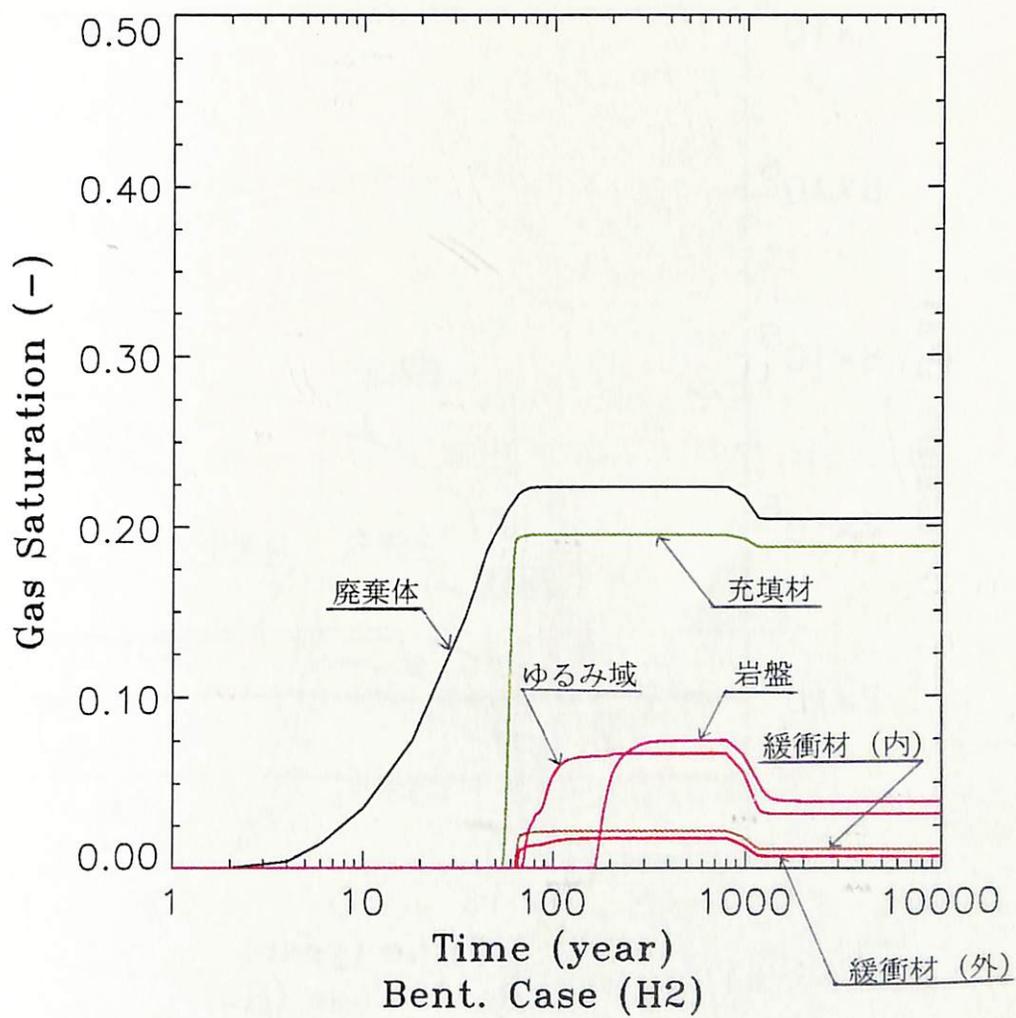


図 3.2.1-40 ガス飽和度 (ベントナイト/砂 : H₂)

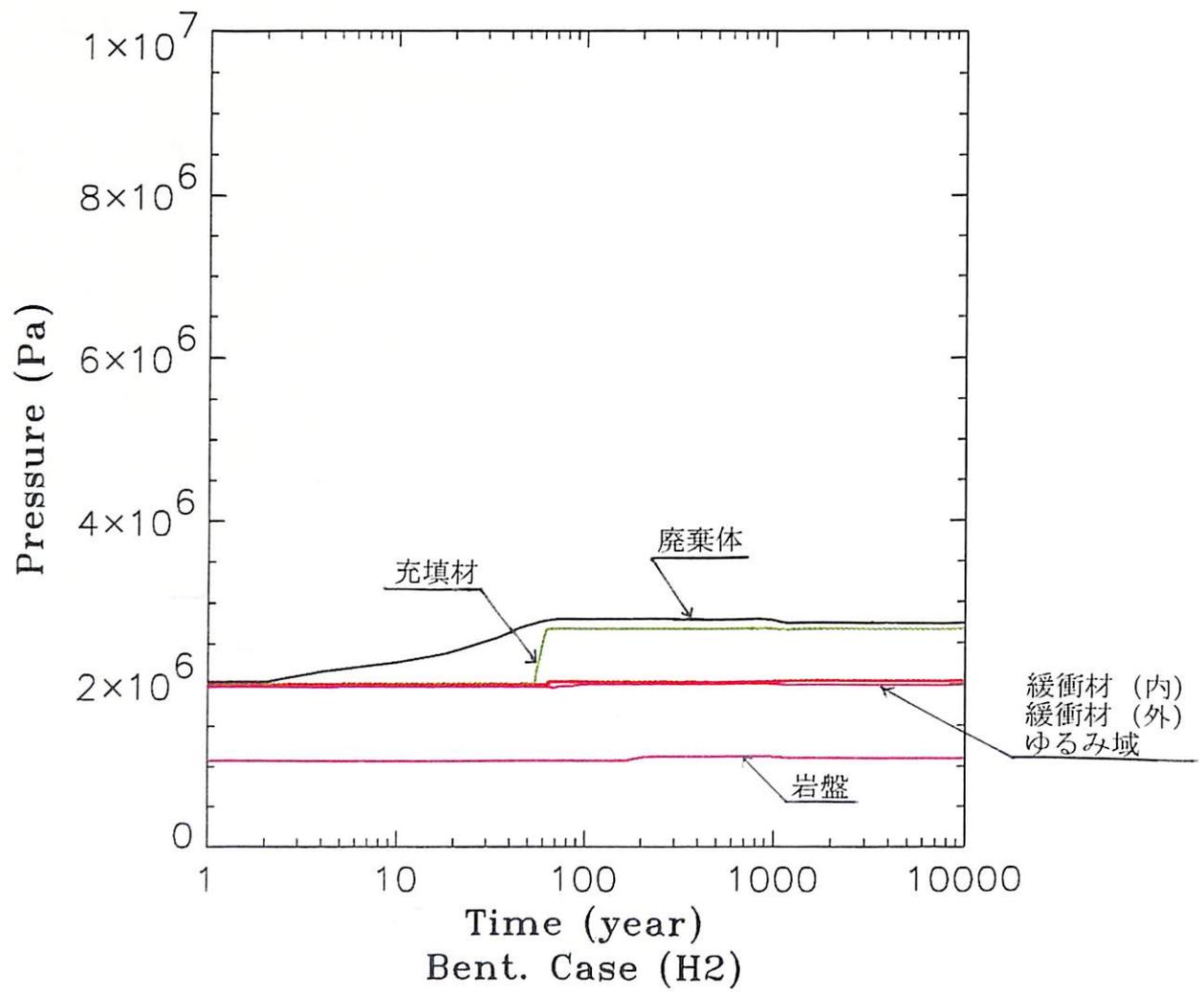


図 3.2.1-41 間隙圧力 (ベントナイト/砂 : H₂)

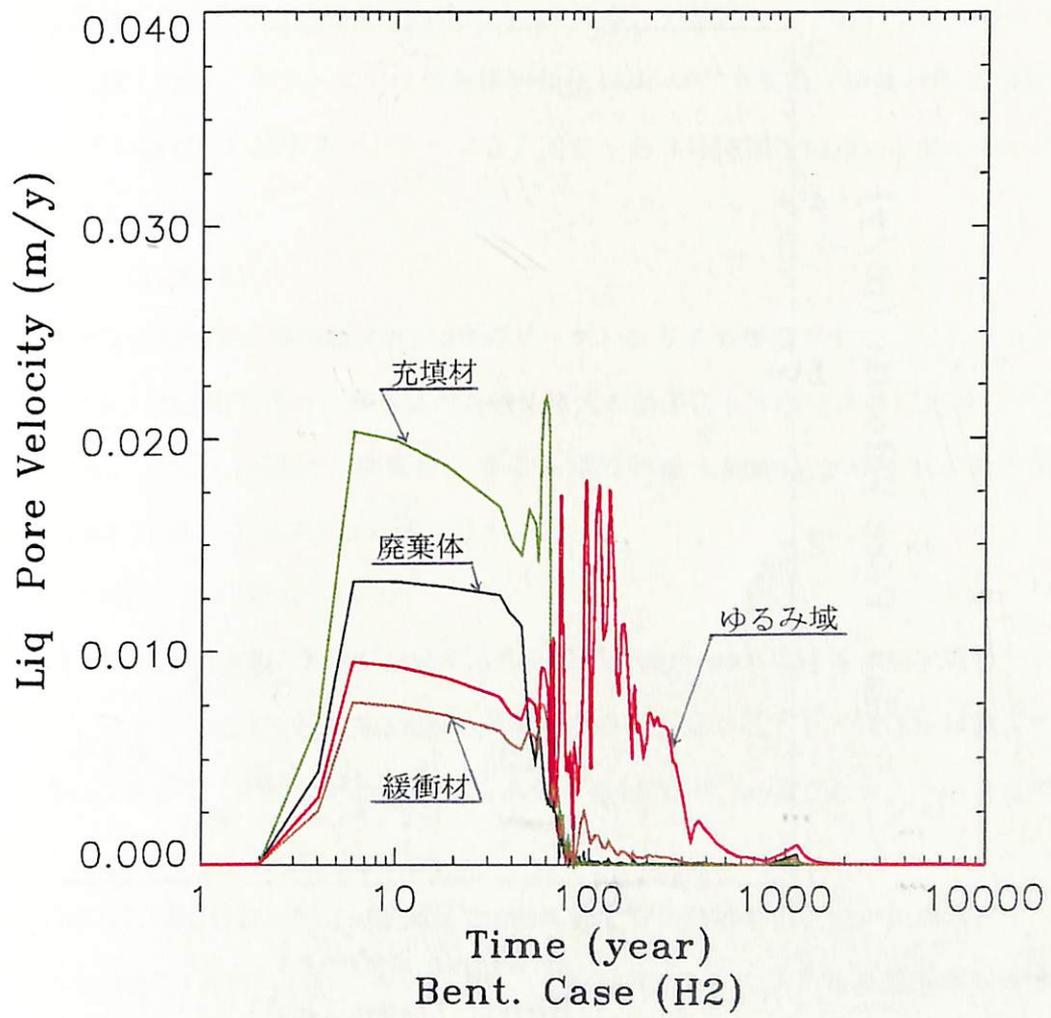


図 3.2.1-42 間隙水流速 (ベントナイト/砂 : H₂)

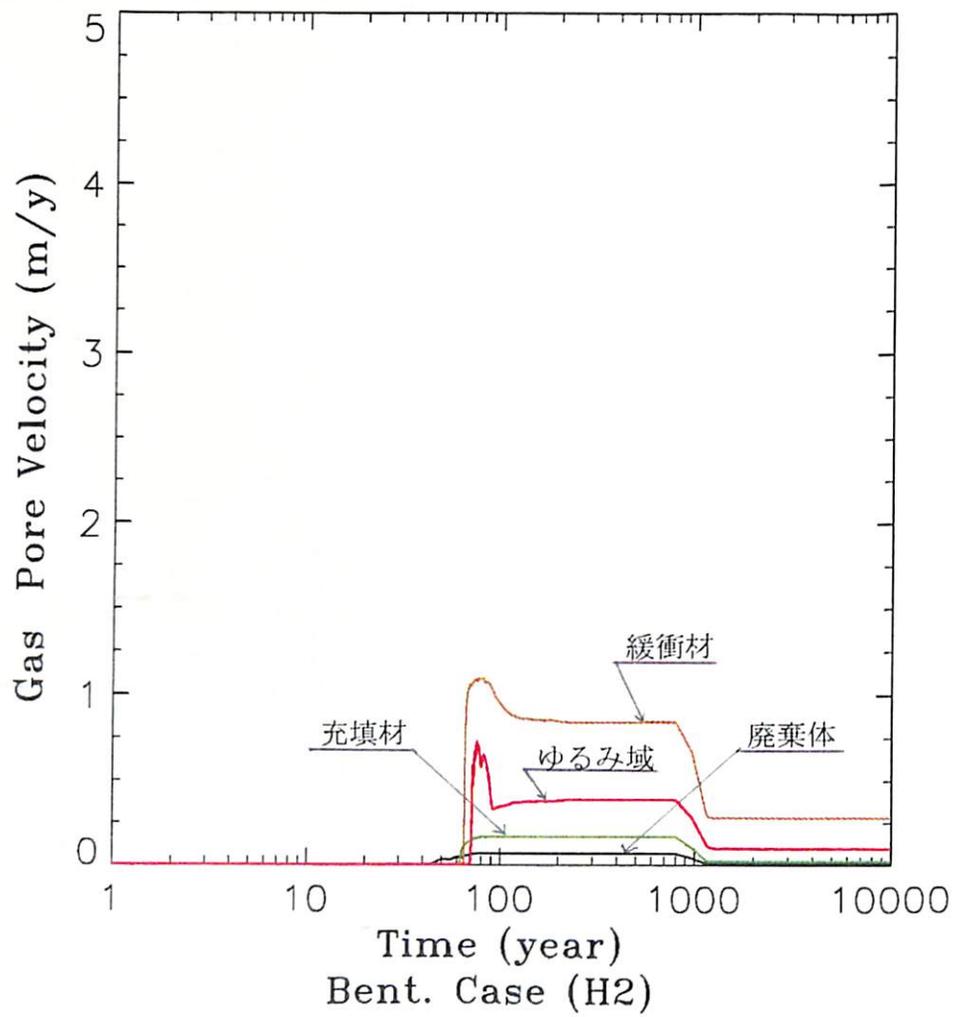


図 3.2.1-43 ガス流速 (ベントナイト/砂 : H₂)

(9) ケース 9 (ベントナイト/砂, 発生ガス; 二酸化炭素)

試算結果を図3.2.1-44～47に示す。ケース 9 はケース 3 を基礎として, 緩衝材の特性を2.3及び2.4節で特性試験を実施したベントナイト/砂混合材 (重量比; 20/80) の値を適用したものである。

①気泡の発生と移行; 図3.2.1-44

本ケースではケース3に比較して間隙圧力の増加が少ないことから二酸化炭素の溶解量が少なくなり, 80年ほど早く, 処分場閉鎖後約180年で廃棄体中に気泡が発生する。また, 発生した気泡は処分場閉鎖後約290年で充填材外側エリアに移行するが, これもケース3と比較して840年ほど早い。廃棄体及び充填材エリアのガス飽和度は急速に増加した後, 外側のバリア層に気泡が移行すると僅かに低下し一定値となる。本ケースでは処分場閉鎖後340年ほどで気泡が緩衝材中に移行し0.4～0.7%の有意なガス飽和度に達するが, ケース3と同じく処分場閉鎖後10,000年後においても地層中への気泡の放出はない。

②圧力の経時変化; 図3.2.1-45

処分場内の間隙圧力は処分場閉鎖後約350年にピークとなりその後低下する。このときの処分場内の最大圧力は約2.8[MPa]であり, 緩衝材の透過性増大の効果によりケース3に比較して1.5[MPa]低くなっている。また, 充填材, 緩衝材, ゆるみ域での最大間隙圧力はそれぞれ2.7[MPa], 2.1[MPa], 2.0[MPa]でありケース3より低下している。

③間隙水, ガスの流速, 流向図3.2.1-46～47

地下水流速は廃棄体エリアに気泡が生成する処分場閉鎖後約180年以降各バリア層について増加し, 充填材層に気泡が生成する閉鎖後300年以降間隙水の移行量が低下して間隙圧は減少する。最大間隙水流速は緩衝材中で 3.6×10^{-3} [m/y], ゆるみ域でも 4.4×10^{-3} [m/y]であり, ケース3の5～6倍である。

一方ガスの移行については, 処分場閉鎖後10,000年間でも処分場外に気泡が放出されず, 緩衝材中でのガスの流速は 5.7×10^{-2} [m/y]であり, ケース3の1/20であった。これは発生ガスが水素の場合と同様に, 緩衝材中では透過係数が6桁増加し, また毛管圧が小さくなったことからガス飽和度が10倍以上増加したためケース1と同程度の放出量であっても流速が大きく低下することによると考えられる。

以上の解析結果について各バリア層における気泡生成年, 最大間隙圧力, 最大ガス飽和度, 最大間隙水流速, 最大ガス流速とそれらの到達時期, さらに処分場から放出される間隙水, 及びガスの累積放出量を表3.2.1-1にまとめて整理した。

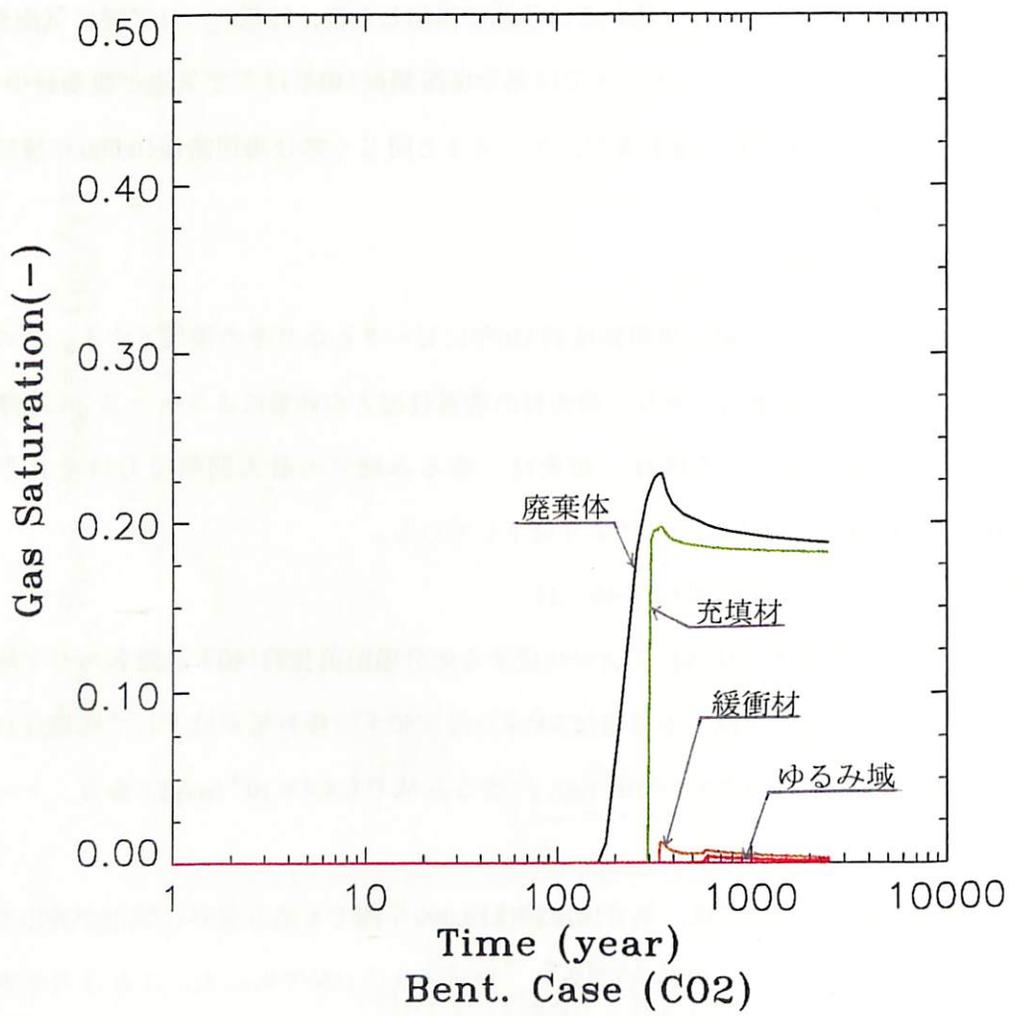


図 3.2.1-44 ガス飽和度 (ベントナイト/砂 : CO₂)

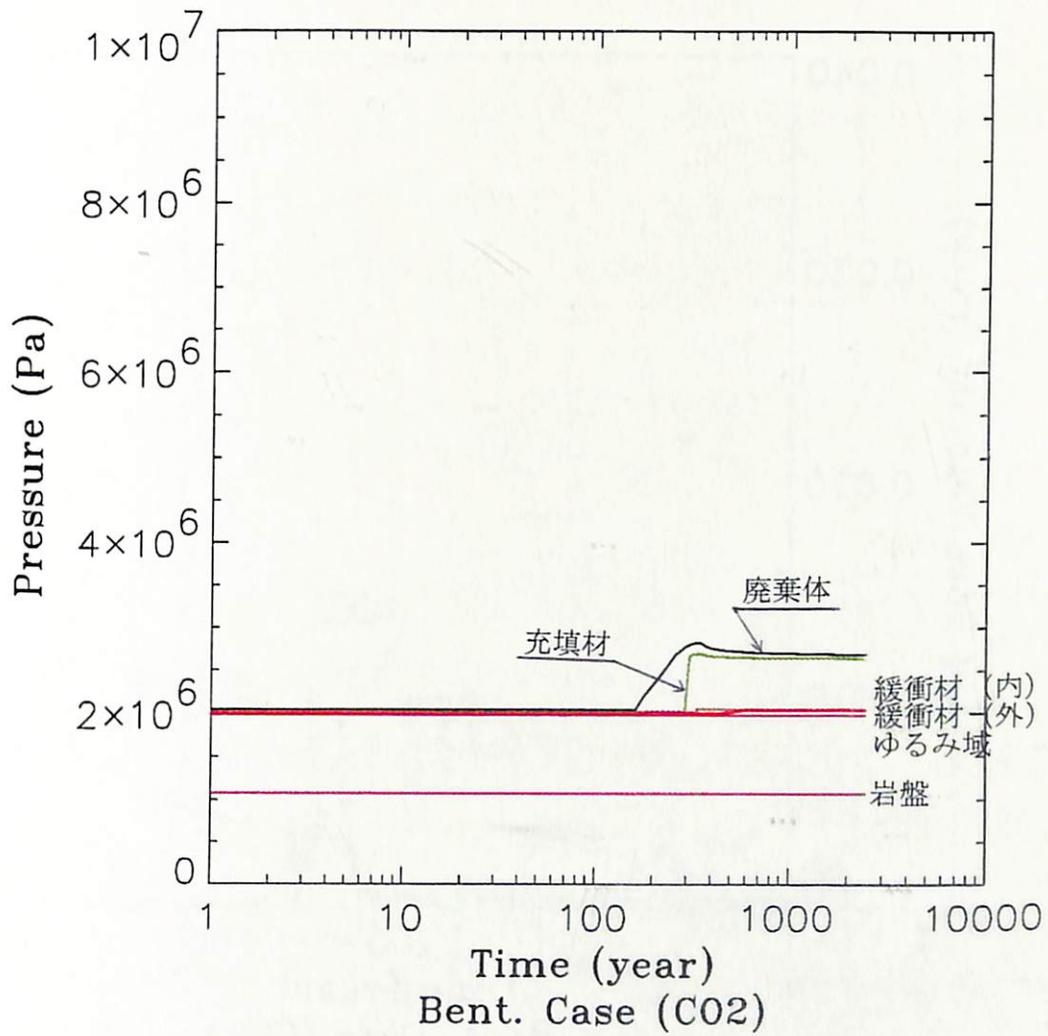


図 3.2.1-45 間隙圧力 (ベントナイト/砂 : CO₂)

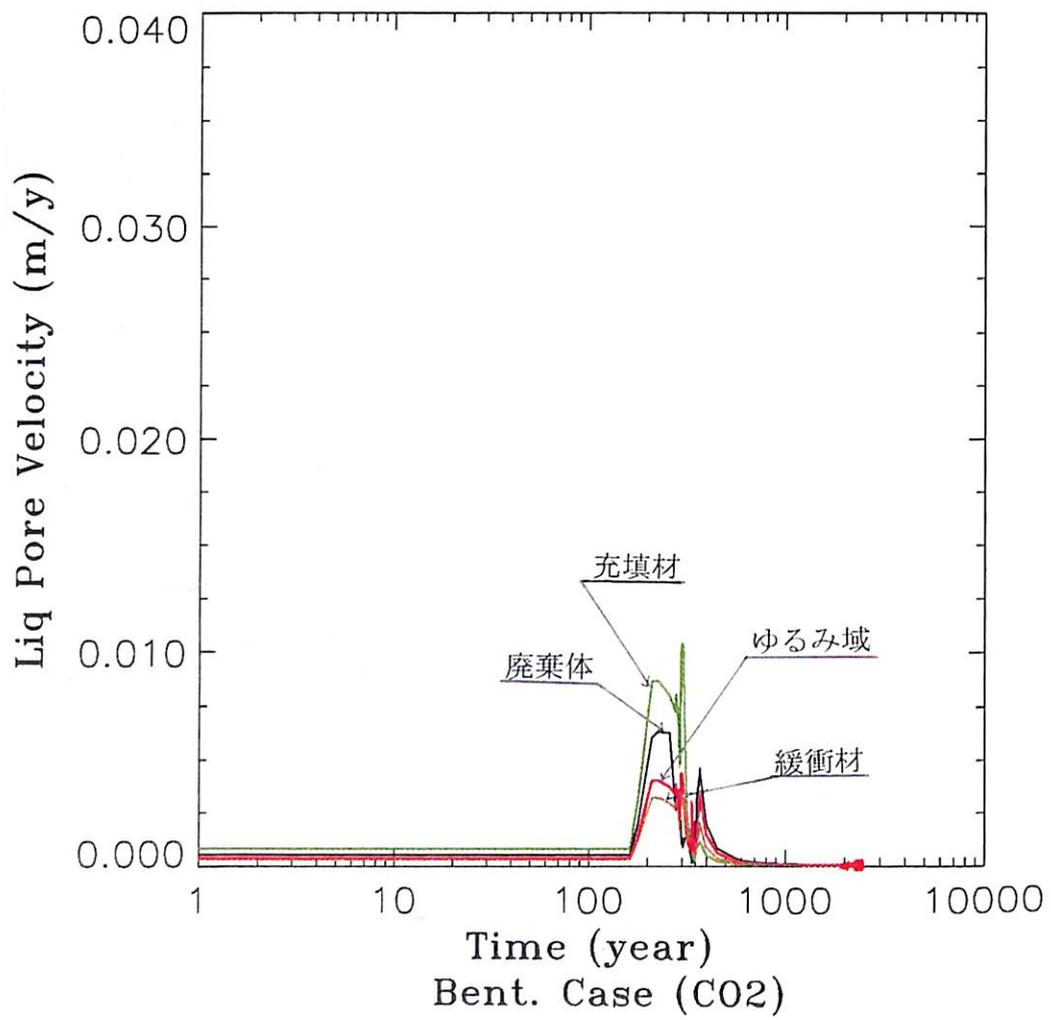


図 3.2.1-46 間隙水流速 (ベントナイト/砂 : CO₂)

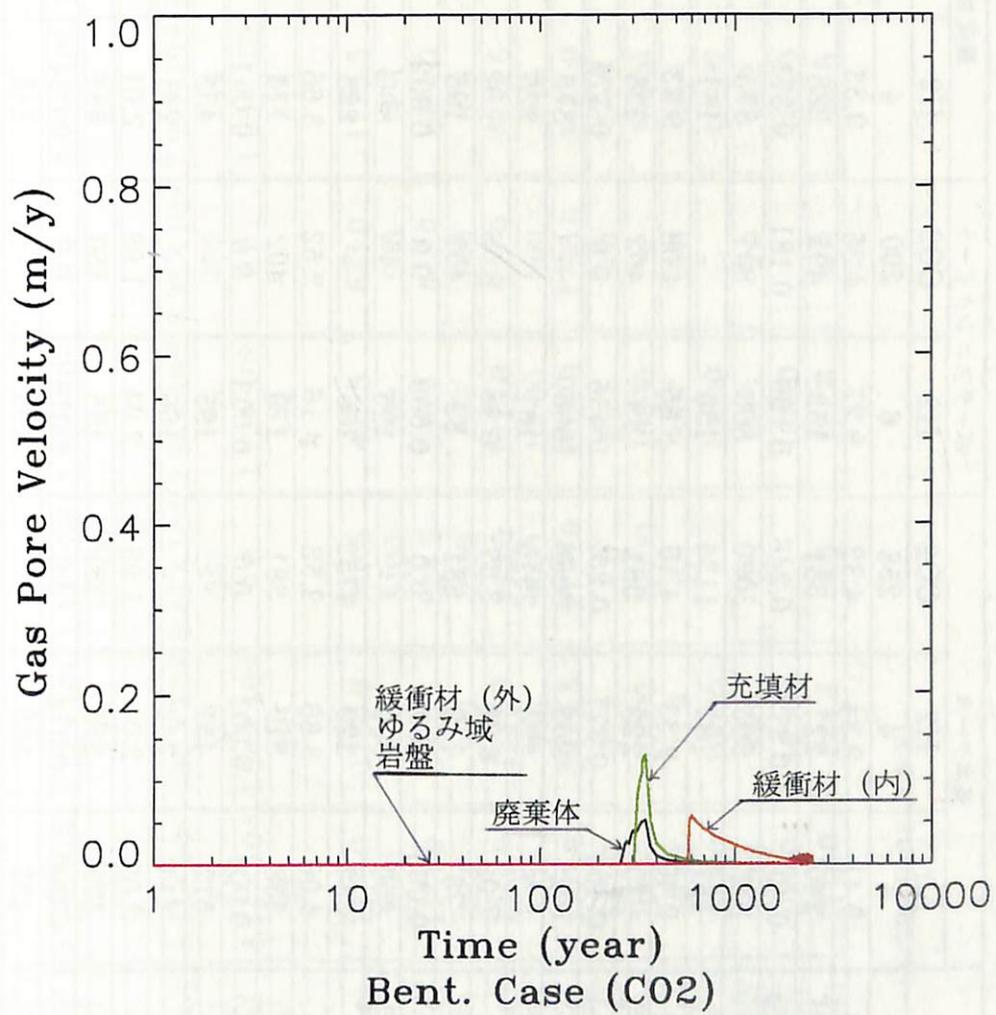


図 3.2.1-47 ガス流速 (ベントナイト/砂 : CO₂)

表 3.2.1-1 TOUGH2 による解析結果一覧表

(1/2)

名 称		基本ケース			ポーラスコンクリート		凝灰岩		ベントナイト	
		Air	H2	CO2	H2	CO2	H2	CO2	H2	CO2
廃棄体 (mesh:2111)	気相生成年	4	4	258	6	200	4	258	4	178
	最大圧力(Mpa)	9.41	9.34	4.32	9.27	4.35	9.33	4.32	2.81	2.83
	同 出現時期(年)	240	227	381	152	402	228	381	176	350
	最大ガス飽和度(-)	0.401	0.372	0.246	0.190	0.181	0.371	0.246	0.223	0.230
	同 出現時期(年)	1027	905	3030	800	897	875	3005	118	350
充填材(外側) (mesh:2311)	気相生成年	181	182	1135	156	-	181	1133	55	292
	最大圧力(Mpa)	9.40	9.33	4.10	8.65	4.08	9.33	4.10	2.70	2.70
	同 出現時期(年)	240	228	381	89	402	228	381	85	350
	最大ガス飽和度(-)	0.405	0.377	0.252	0.435	0.0	0.375	0.252	0.195	0.198
	同 出現時期(年)	1027	905	3030	10000	-	875	3005	118	350
緩衝材(内側) (mesh:2411)	気相生成年	226	224	2515	161	-	225	2513	63	336
	最大圧力(Mpa)	7.02	6.99	3.57	6.98	3.56	6.92	3.57	2.06	2.05
	同 出現時期(年)	75	112	381	89	402	195	381	71	586
	最大ガス飽和度(-)	0.003	0.002	0.0	0.009	0.0	0.002	0.0	0.021	0.007
	同 出現時期(年)	800	800	-	195	-	800	-	82	586
緩衝材(外側) (mesh:2511)	気相生成年	232	229	4752	166	-	228	4820	65	565
	最大圧力(Mpa)	4.06	3.66	2.52	4.16	2.52	3.66	2.52	2.05	2.04
	同 出現時期(年)	358	319	381	179	402	114	381	85	628
	最大ガス飽和度(-)	0.001	0.001	0.0	0.003	0.0	0.001	0.0	0.017	0.004
	同 出現時期(年)	512	431	-	195	-	435	-	167	600
ゆるみ域 (mesh:2611)	気相生成年	244	242	-	166	-	241	-	70	-
	最大圧力(Mpa)	2.05	2.04	1.98	2.04	1.98	2.01	1.98	2.00	1.98
	同 出現時期(年)	399	365	381	195	350	331	381	79	280
	最大ガス飽和度(-)	0.090	0.074	0.0	0.079	0.0	0.034	0.0	0.067	0.0
	同 出現時期(年)	431	365	-	195	-	345	-	267	-

mesh: ; 各バリア領域を代表させたエレメントの位置 (図 3.1.1-1 参照)

表 3.2.1-1 TOUGH2 による解析結果一覧表

(2/2)

名 称		基本ケース			ポーラスコンクリート		凝灰岩		ベントナイト	
		Air	H2	CO2	H2	CO2	H2	CO2	H2	CO2
緩衝材(外側) (mesh:2511)	最大地下水流速(m/y)	2.00×10^{-3}	1.99×10^{-3}	6.26×10^{-4}	1.99×10^{-3}	6.20×10^{-4}	1.98×10^{-3}	6.26×10^{-4}	8.71×10^{-3}	3.59×10^{-3}
	同 出現時期(年)	75	112	381	89	402	114	381	65	299
	最大ガス流速(m/y)	1.19×10^2	1.17×10^2	1.13×10^0	1.35×10^1	0.0	2.78×10^2	1.13×10^0	1.10×10^0	5.71×10^{-2}
	同 出現時期(年)	232	229	10000	167	-	228	10000	82	600
ゆるみ域 (mesh:2611)	最大地下水流速(m/y)	1.43×10^{-2}	1.85×10^{-2}	8.46×10^{-4}	2.86×10^{-2}	8.39×10^{-4}	7.99×10^{-3}	9.09×10^{-4}	1.80×10^{-2}	4.41×10^{-3}
	同 出現時期(年)	342	323	381	195	402	244	381	96	299
	最大ガス流速(m/y)	3.11×10^{-1}	4.54×10^{-1}	0.0	1.12×10^0	0.0	1.03×10^0	0.0	7.23×10^{-1}	0.0
	同 出現時期(年)	431	361	-	174	-	344	-	76	-
処分場からの 放出フラックス (累積)	地下水(上側) (Kg)	1276.0	1180.0	940.5	493.5	623.0	1175.5	940.5	571.0	701.0
	同 出現時期 (年)	1000	900	3100	200	900	875	3130	78	350
	地下水(側面) (Kg)	1141.0	1055.5	824.5	596.5	545.0	1051.0	824.7	1114.0	1137.0
	同 出現時期 (年)	1025	900	3050	800	900	875	3010	450	350
	地下水(下側) (Kg)	1340.0	1237.0	945.0	1015.0	625.0	1232.5	945.2	1049.0	660.5
	同 出現時期 (年)	1030	910	3000	10000	900	875	3005	10000	350
	地下水(合計) (Kg)	3757.0	3472.5	2710.0	2105.0	1793.0	3459.0	2710.4	2734.0	2498.5
	ガス(上側) (Kg)	663.0	51.5	4.5	62.1	0.0	50.9	4.5	90.0	2.4
	同 出現時期 (年)	10000	10000	10000	10000	-	10000	10000	10000	2500
	ガス(側面) (Kg)	523.2	37.8	0.0	39.7	0.0	36.8	0.0	36.0	0.0
	同 出現時期 (年)	10000	10000	-	10000	-	10000	-	10000	-
	ガス(下側) (Kg)	525.8	35.0	0.0	20.0	0.0	33.9	0.0	3.3	0.0
同 出現時期 (年)	10000	10000	-	10000	-	10000	-	10000	-	
ガス(合計) (Kg)	1712.0	124.3	4.5	121.8	0.0	121.6	4.5	129.3	2.4	

mesh: : 各バリア領域を代表させたエレメントの位置 (図 3.1.1-1 参照)

3.3 まとめと今後の課題

本年度実施した2相流解析の結果明かとなった項目を整理した。

(1) 解析結果のまとめ

a) ガスの種類による移行挙動の相違

- ①表3.3-1及び図3.3-1に示すように、空気は水素の約2倍の粘性率を有する。このため図3.1-1の(5)式に示すように見かけの透過係数は1/2となるが、水中への溶解量が空気とほとんど変わらないため、移行がやや緩慢になることによって緩衝材中での間隙圧力が若干高まる程度であり、移行挙動に大きな相違はない。
- ②表3.3-1及び図3.3-1に示すように、二酸化炭素は溶解度が25[°C]で水素の40倍以上あることから、発生したガスは水素に比較して多量に間隙水中に溶解することから気泡の発生量が小さくなる。したがって間隙圧力の上昇は小さくなり、ガスは気泡として処分場外へ放出されない。
- ③発生ガスを水素とした場合、基本ケースのバリア条件で処分場内の最大間隙圧力は約9.3[MPa]、緩衝材中での間隙水の流速は 2.0×10^{-3} [m/y]に達する。これに対して発生ガスを二酸化炭素とした場合には、処分場内の最大間隙圧力は約4.3[MPa]、緩衝材中での間隙水の流速は 6.3×10^{-4} [m/y]に止まる。
- ④表3.2.1-1に示すように処分場内から気泡との置換によって放出される間隙水の量はガス移行挙動の傾向に等しく、発生ガスが水素及び空気の場合についてはほぼ同じである。一方発生ガスを二酸化炭素とした場合には、間隙水中への溶解量の差により処分場内の間隙水の放出量は水素に比較して80%以下となり、期間も3,000年と3.3倍遅延している。
- ⑤図3.3-2～4及び表3.2.1-1に示すように発生ガスを水素とした場合、約1,000年間で処分場内の間隙水の約17%がガスの移行により放出される。
- ⑥基本ケースにおいて処分場から10,000年間に放出されるガスの発生量に対する割合は、概算で水素、空気、二酸化炭素についてそれぞれ98%、94%、0.8%となった。

表3.3-1 気体の粘性係数と溶解度

気体の種類	粘性係数[Polse]	溶解量[ml gas/ml water]	備考
空気	1.84×10^{-4}	1.71×10^{-2}	25[°C]での値
水素	8.9×10^{-5}	1.75×10^{-2}	
二酸化炭素	1.49×10^{-4}	7.59×10^{-1}	

b) バリア特性値による挙動の相違

- ① 充填材がポーラスコンクリート等の透過性の高い物質である場合、各バリア層への気泡の到達時期と間隙圧の低下時期がやや早まるが、各バリア層での最大間隙圧力に大きな差はない。
充填材層の透過性が高いため気泡が充填材層移行後急速にガスが放出され、処分場内部の間隙圧力が低下することにより間隙水の放出が抑制される。これにより処分場からの間隙水の放出量は基本ケースの約60%に低下している。
- ② 母岩を凝灰岩とした場合も、絶対透過係数、毛管圧の変化が基本ケースと大きく変わらない設定であったことから、間隙圧力、処分場内のガス飽和度、及び処分場からの間隙水、ガスの放出量共に大きな相違はない。
- ③ 緩衝材の透過性が高まり毛管圧が低下することにより、廃棄体及び充填材層の間隙圧は大幅に低下する。また充填材をポーラスコンクリートとしたケースと同様に、廃棄体、及び充填材層でのガス飽和度が上昇しないため、間隙水の放出が抑制される傾向が示された。

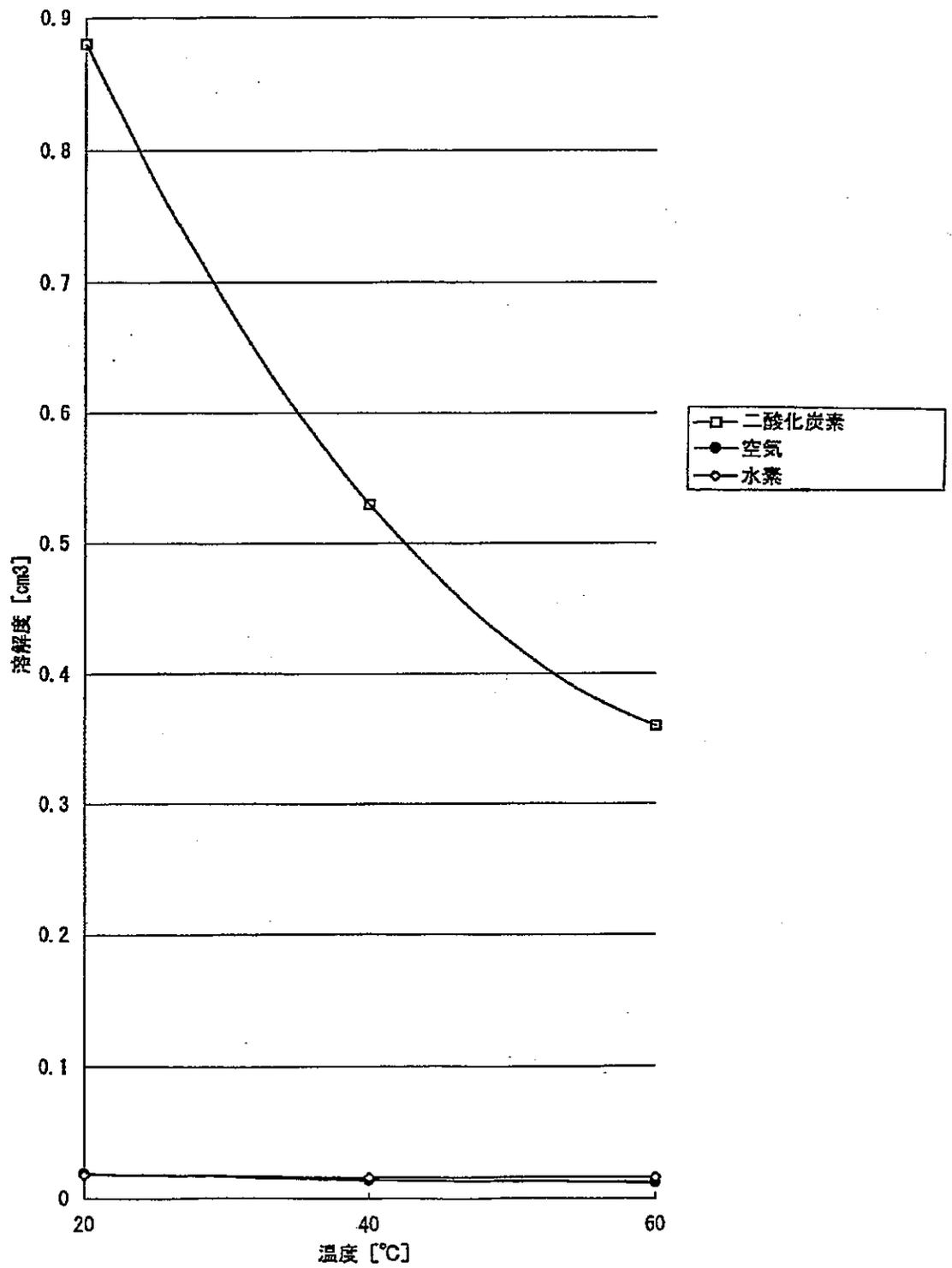


図 3.3-1 ガスの溶解度

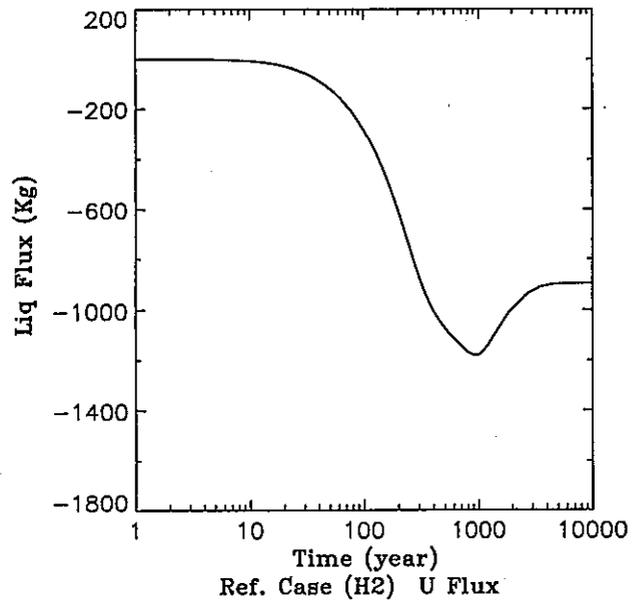


図3.3-2 間隙水放出フラックス累積値-施設上面 (H₂: 基本ケース)

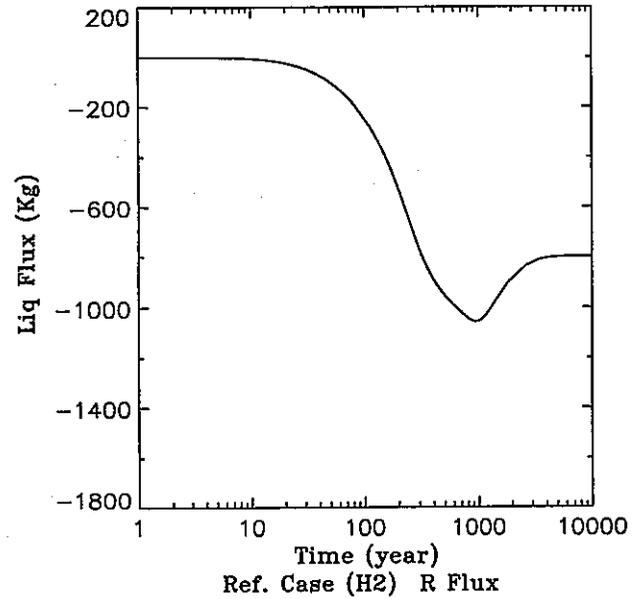


図3.3-3 間隙水放出フラックス累積値-施設側面 (H₂: 基本ケース)

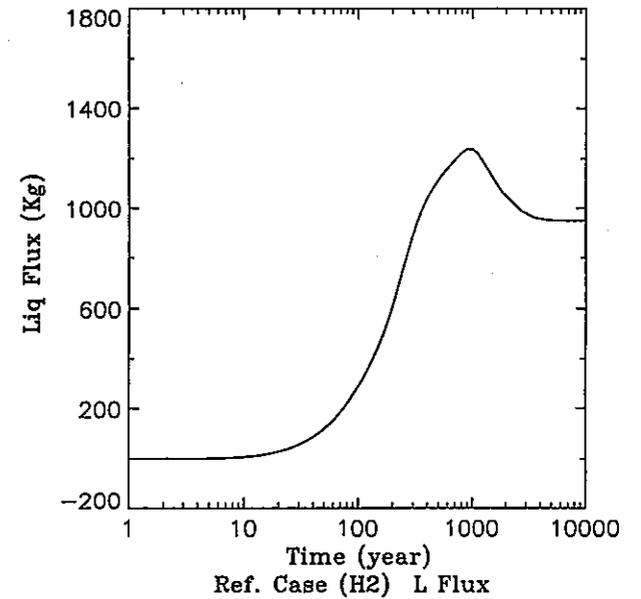


図3.3-4 間隙水放出フラックス累積値-施設底面 (H₂: 基本ケース)

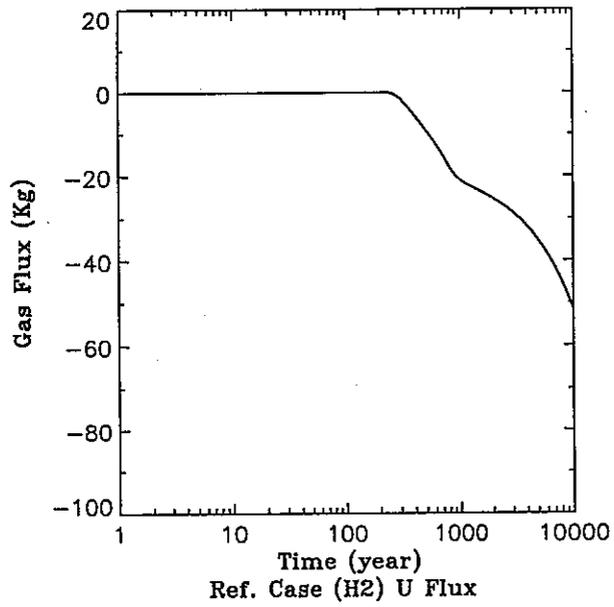


図3.3-5 ガス放出フラックス累積値-施設上面 (H₂:基本ケース)

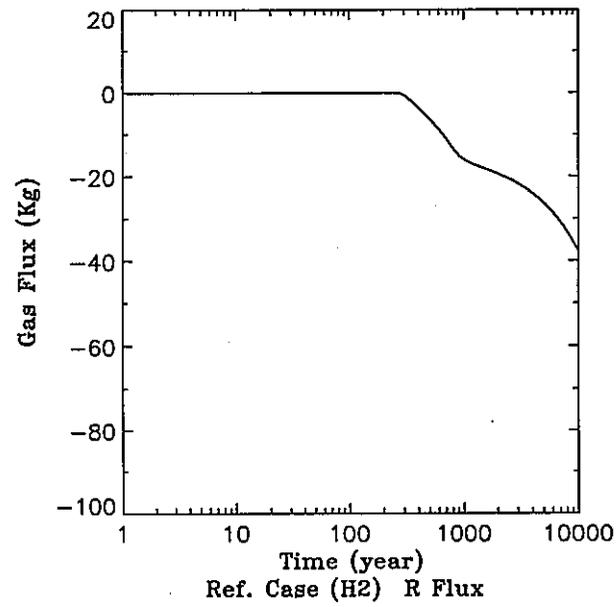


図3.3-6 ガス放出フラックス累積値-施設側面 (H₂:基本ケース)

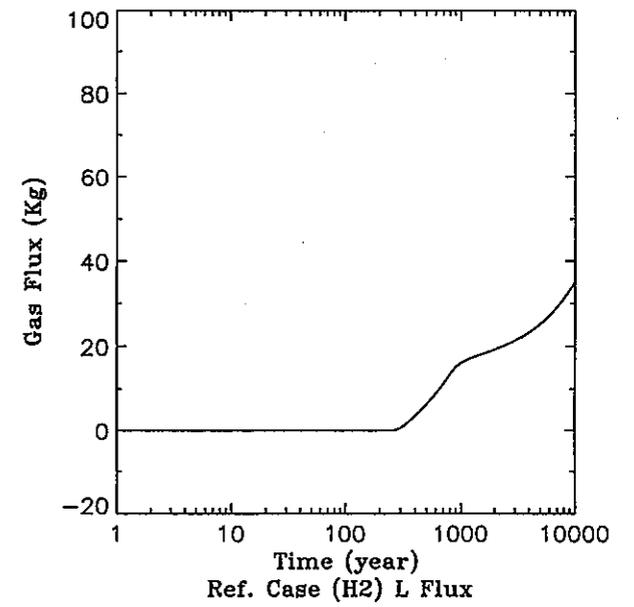


図3.3-7 ガス放出フラックス累積値-施設底面 (H₂:基本ケース)

第 4 章

4. まとめ

(1) 本研究の成果

a) 2相流パラメータの取得状況

- ①石油/ガス資源開発分野では2相流評価モデルの開発、検証と油層となる岩盤に対する2相流パラメータの取得例は豊富に存在する。
- ②放射性廃棄物の処分に適した低透水性岩盤、人工バリア材料に対するデータ取得例は少なく、今後さらにデータの取得を行う必要がある。

b) 2相流パラメータに関する特性試験

- ①トランジェントパルス法の適用により不飽和時の透気係数の評価が可能であることの目途を得た。
- ②不飽和時の水の透過係数の測定方法については、不飽和浸透率の測定法等の適用を検討する必要がある。

c) 2相流解析

- ①空気、 H_2 、 CO_2 の3種類のガスについて2相流解析を行い、空気と H_2 では挙動に大きな違いのないこと。一方、 CO_2 はその溶解度の大きさから、気泡の発生と移行が極めて遅いことが明らかになった。
- ②バリア材料の特性値の相違により、処分場内の圧力分布、気泡の移行、間隙水の押し出し等の挙動が大きく影響を受けることを確認した。

(2) 今後の課題

ガスの移行に係るデータの調査、2相流パラメータに関する特性試験及び、2相流解析を実施する過程で問題となった事項から今後の課題を抽出、整理し、以下にまとめた。

a) 2相流パラメータの調査

- ①天然バリア、人工バリアに対するデータとも不足することが明らかであり、今後とも各バリアの候補材料に対して広範な組成についてデータの調査を継続する必要がある。

b) 2相流パラメータの測定手法について

- ①トランジェントパルス法では水の相対透過係数の測定が困難であるため、石油資源開発分野等で実績のある相対浸透率測定技術等を適用し、広範な飽和度でガス、水の相対透過係数の変化を測定する必要がある。
- ②ベントナイト、及びベントナイト/砂混合材については、間隙水飽和度の確認、評価方法について検討する必要がある。また加圧、湿潤による間隙構造変化について確認すると共に、その機

構と2相流透過特性への影響について検討、評価する必要がある。

③低透水性、低間隙率の岩盤に対する2相流パラメータの測定を実施する必要がある。

④各種岩盤、成分の異なるコンクリート、粘土物質等の人工バリア材料について特性試験を実施し、データセットの充実に勤める必要がある。

c) 2相流解析によるガス発生の影響評価

①間隙水中に溶解したガス成分の拡散による移行の効果について、移流による移行と合わせて評価することが必要である。

②ガスの発生によって生じる処分場間隙水の放出、地下水流速の変化等が核種移行に及ぼす影響について定量的に評価検討する必要がある。

③二酸化炭素については地下水中の溶解成分との反応が重要であることから、地球化学的条件の評価と組合せて評価を行う必要がある。

④ガスによる絶対透過係数と水による絶対透過係数の評価値の相違について、現象の原因を確認すると共に、これに基づいたコードの改良について検討する必要がある。

⑤実験室規模において、単純な系から多層、及び亀裂系に対するガス/水2相流の移行挙動を観察、測定し、評価モデル、計算コードの検証を行う必要がある。

⑥これらを基に、溶解成分の拡散、気/液の絶対透過係数の相違の反映、評価対象ガス種類の増加、毛管圧に対する液相成分蒸気圧の影響等今後評価モデルに対して追加すべき機能を摘出し、その重要性、影響度を検討することによりコードの改良に着手する必要がある。

謝辞

2相流パラメータに関する特性試験の実施において協力を頂くと共に、多くの技術的示唆を頂いた石油公団石油開発技術センターの岡津室長代理、九州大学工学部の後藤教授に感謝の意を表します。

さらに、ガス移行評価に適用した2相流解析コード"TOUGH2"を開発し、公開コードとされた、Lawrence Berkeley LaboratoryのDr. Pruessに感謝の意を表します。

参 考 文 献

参考文献

1.1

- 1) Jeffries, R. M., "Gas Migration in Deep Radioactive Waste Repositories ; A Review of Processes, Data and Models", DoE/HMIP/PR/91/029 pp.144 (1991)
- 2) 植木松英, 岡津弘明, "新技術講座「コア試験法」" 石油公団石油技術開発センター油層研究室 (1994)
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団, T R U 廃棄物処分システムの性能評価手法の検討 (II) , PNC ZJ 1277 94-001 (1994)
- 4) Hokari T., et al., "Preliminary Test on Gas Migration Through Bentonite-Sand Mixture", Distributed Paper at Poster Session of Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII, pp.8 (1994)
- 5) Iriya K., et al., "Gas Transportation in Saturated Cementitious Materials", Distributed Paper at Poster Session of Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII, pp.8 (1994)

1.2

- 1) Dixon, J. R., et al., " Comparison of Different Techniques for Obtaining Capillary Pressure Data in The Low-Saturation Region", Proceedings of The 1991 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 22690, pp. 333-343 (1991)
- 2) Patterson, J., et al., "Gas Storage Reservoir Performance Optimization through Relative Permeability Studies", pp.1-17 (1993)
- 3) Rodwell, W. R., et al., "Mechanisms and Modeling of Gas Migration from Deep Radioactive Waste Repositories", NSS/R250, pp.86 (1993)
- 4) Amter, S., et al., "Simulation of Gas Flow Beneath Yucca Mountain, Nevada, with a Model Based on The Freshwater Head", Waste Management '90, 2, pp.915-925 (1990)
- 5) Hyman, L. A., et al., "Simultaneous Determination of Capillary Pressure and Relative Permeability in Coalbed Methane Reservoirs", Proceedings of the 1991 Coalbed Methane Symposium, pp.85-95 (1991)
- 6) Wiborgh, M., et al., "Gas Formation in a L/ILW Repository and Gas Transport in The Host Rock", NTB 85-17, pp.132 (1986)
- 7) Tomlinson, M. J., "Migration of Gases through Argillaceous Rocks A Literature Review", NSS/R146, pp.156 (1988)
- 8) 植木松英, 岡津弘明, "新技術講座「コア試験法」" 石油公団石油技術開発センター油層研究室

- (1994)
- 9) Mishra, S., et al., "Modeling Migration from a Low/Intermediate Level Nuclear Waste Repository", Gas Generation and Release from Radioactive Waste Repository, OECD/NEA, pp.253-264 (1992)
 - 10) Pruess, K., "Numerical Modeling of Gas Migration at a Potential Repository for Low and Intermediate Level Nuclear Waste at Oberbauenstock, Switzerland", NTB 89-28, pp.30 (1990)
 - 11) Webb, S. W., "Sensitivity Studies for Gas Release from the Waste Isolation Plot Plant (WIPP)", Gas Generation and Release from Radioactive Waste Repository, OECD/NEA, pp.309-326 (1992)
 - 12) Pusch, R., "Outline of Models of Water and Gas Flow through Smectite Clay Buffers", SKB TR87-10, pp.49 (1987)
 - 13) Albinsson, Y., et al., "Diffusion of Am, Pu, Np, Cs, I and Tc in Compacted Sand Bentonite Mixture", SKB TR89-22 (1989)
 - 14) Pusch, R., "SFR-Bufferfar av Bentonitbaserade Material i siloförande", SFR 85-08 (1985)
 - 15) Pusch, R., et al., "Buffermaterial för Silor Slutsatser och Rekommendationer", SFR 84-04, (1984)
 - 16) Pusch, R., et al., "Laboratoriebestämning av Hydraulisk Konduktivitet och Gaskonduktivitet samt Svällings - Egenskaper hos SFR-Bufferfar", SFR 84-05, (1984)
 - 17) Bamforth, P. B., et al., "A Large Scale Laboratory Investigation into the Movement of Gas and Water through Clay Barriers Exposed to the Environment", EUR 14816 EN, pp.83-95 (1993)
 - 18) Geneste, P., et al., "Gas Pressure Build Up in Radioactive Waste Disposal : Hydraulic and Mechanical Effects", EUR 14816 EN, pp.129-139 (1993)
 - 19) Volckaert, G., et al., "Modeling and Experiments on Gas Migration in Repository Host Rock", EUR 14816 EN, pp.142 (1993)
 - 20) Hokari T., et al., "Preliminary Test on Gas Migration Through Bentonite-Sand Mixture", Distributed Paper at Poster Session of Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII, pp.8 (1994)
 - 21) Jacobs, F., et al., "Long Term Behavior of Concrete in Nuclear Waste Repositories", Nuclear Engineering and Design, 138, pp.157-164 (1992)
 - 22) Iriya, K, et al., "Cementitious Backfill Materials for a L/ILW Repository - Investigations of Gas Transport Properties", Nuclear Engineering and Design, 129, pp.49-55 (1991)
 - 23) Pihlajavaara, "Long-Term Gas Permeability Properties of Concrete in Wet Repository Conditions", Nuclear Engineering and Design, 129, pp.41-48 (1991)
 - 24) Harris, A. W., et al., "Transport of Gases through Concrete Barriers Task 3 Characterization of Radioactive

- Waste Forms", EUR 14194 EN, pp.83 (1993)
- 25) Iriya K., et al., "Gas Transportation in Saturated Cementitious Materials", Distributed Paper at Poster Session of Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII, pp.8 (1994)
- 2.1
- 1) 植木松英, 岡津弘明, "新技術講座「コア試験法」" 石油公団石油技術開発センター油層研究室 (1994)
- 2.2
- 1) 土質試験法改訂編集委員会編, "土質試験法" (社)土質工学会, 第5刷 (1982)
- 2.3
- 1) Pruess, K., "TOUGH User's Guide", LBL-20700, pp.78 (1987)
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団, T R U 廃棄物処分システムの性能評価手法の検討 (II), PNC ZJ 1277 94-001 (1994)
- 2.4
- 1) Pruess, K., "TOUGH User's Guide", LBL-20700, pp.78 (1987)
- 3.1
- 1) Pruess, K., "TOUGH User's Guide", LBL-20700, pp.78 (1987)
- 2) 動力炉・核燃料開発事業団, T R U 廃棄物処分システムの性能評価手法の検討 (II), PNC ZJ 1277 94-001 (1994)
- 3) 日本原年産業株式会社, "六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センター 廃棄物埋設許可申請書"(一部補正), (1989)
- 4) Geneste, P., et al., "Gas Pressure Build Up in Radioactive Waste Disposal : Hydraulic and Mechanical Effects", EUR 14816 EN, pp.129-139 (1993)
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団, "高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書-平成3年度-", PNC TN 1410 94-081 (1992)
- 6) Mayer, G. et al., "Experimental Determination and Numerical Simulation of the Permeability of Cementitious Materials", Nuclear Engineering and Design, 138, pp.171-177 (1992)
- 7) Cadelli, N., et al., "PAGIS Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste Summary", EUR 11775 EN pp.268 (1988)

- 8) Hyman, L. A., et al., "Simultaneous Determination of Capillary Pressure and Relative Permeability in Coalbed Methane Reservoirs", Proceedings of the 1991 Coalbed Methane Symposium, pp.85-95 (1991)
- 9) 動力炉・核燃料開発事業団, "TRU廃棄物処分システムにおける固有の現象の抽出および評価手法の検討", PNC ZJ 1277 92-001 (1992)
- 10) Agg P. J., et al., "Modeling Gas Generation in Radioactive Waste Repository", Nuclear Energy, 32, (2), pp.81-87 (1993)
- 11) Hokari T., et al., "Preliminary Test on Gas Migration Through Bentonite-Sand Mixture", Distributed Paper at Poster Session of Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII, pp.8 (1994)