

TRU廃棄物処分システムの 性 能 評 價 手 法 の 検 討 (II)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

概 要

1994年 2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。については複製、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

限 定 資 料
PNC ZJ4277 94-002
1994 年 2 月

TRU廃棄物処分システムの性能評価手法の検討（Ⅱ）

藤田 義夫*
山本 幹彦**
佐原 聰**
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、個別の現象の抽出、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、安全性に影響する主要な現象の評価が可能な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基づき、総合的性能評価手法の構築に必要な基礎データを与えると共に、研究開発課題、開発工程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) TRU 廃棄物処分に特有な個別現象のモデル化の調査・検討
- (2) ガスの発生・移行に関する処分システムへの影響評価
- (3) 研究項目の優先順位付け及び研究工程の検討

以上の調査検討により、TRU 廃棄物の構成物質、処分環境条件において性能評価対象とすべき現象のモデル化の状況を把握すると共に、処分場内でのガス発生の影響について感度解析を実施することにより主要因子の寄与の程度を明らかにした。さらに、性能評価対象とすべき各現象の重要度に従って研究項目の優先順位付けを行い、これに従った研究開発工程について検討した。

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成果である。

契約番号：050D0307

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

COMMERCIAL PROPRIETARY
PNC ZJ1277 94-002
March, 1994

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

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

A b s t r a c t

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) Investigation of modeling studies for phenomena related to transuranic waste disposal
- (2) Analysis for influence of gas generation and migration at the transuranic waste repository
- (3) Priority of investigation of phenomena

Based on these investigations, a state of the art of the model development for performance assessment of transuranic waste disposal was clarified. And the parameters that have significant efficiency for performance were identified by sensitivity assessment of gas generation and migration. Also, Important phenomena and parameters have been given priority to research, and R&D plan was reviewed according to the priority.

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

** Nuclear and Electric Power Div. Engineering Dept.

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

目 次

1. TRU廃棄物処分に特有な個別現象のモデル化の調査・検討	1
1.1 コロイドの移行と生成	1
1.1.1 TRU廃棄物処分場環境におけるコロイドの挙動	1
1.1.2 地下水コロイドの挙動	3
2. ガス発生・移行に関する処分システムへの影響評価	4
2.1 2相流評価パラメータの調査	4
2.1.1 パラメータの調査	4
2.1.2 パラメータ間の相互関係	7
2.2 2相流パラメータの感度解析	9
2.2.1 感度解析パラメータの設定	9
2.2.2 パラメータ値の設定	10
2.2.3 感度解析	13
3 研究項目の優先順位付け及び研究工程の検討	36
3.1 研究項目の優先度の検討	36
3.2 研究工程の検討	37

1. TRU廃棄物処分に特有な個別現象のモデル化の調査・検討

昨年度までの検討によって摘出された、TRU廃棄物処分に特有、重要と考えられる現象のうち、特に研究が近年開始されモデル化が遅れているものについて調査を継続した。

1.1 コロイドの生成と移行

本節では処分場で生成する可能性のあるコロイド及び地下水中に存在する天然コロイドの生成、移行に係わる機構とそのモデル化に関する研究について調査を実施した。CECによって実施されているMIRAGEプロジェクトの1分野として、コロイドの生成、各種移行への影響評価を行う計画が進行中である。以下にその第2フェーズの成果の概要を示す。

1.1.1 TRU廃棄物処分場環境におけるコロイドの挙動

人工バリアとして適用が考慮されているセメント存在下におけるコロイドの生成、移行等に関する研究例を示す。

(1) セメント浸出水中におけるコロイドの形成

イギリスを中心として人工バリアにセメントを用いた低／中レベル放射性廃棄物処分場におけるコロイドの影響について研究が行われている。研究成果の概要を以下に示す。

セメント浸出水中におけるコロイドの形成とその特性

- ・セメント浸出水中におけるコロイドの形成は、主にカルシウム珪酸塩水和物による核生成とその成長による非晶質粒子の形成によって生じる。
- ・コロイドの構造は複雑であり、それ自身が微細な空孔を持つ $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の骨材によって形成されている。

処分場環境におけるニアフィールド水化学のコロイド特性への影響

- ・これら粒子の形成は浸出液の温度が 60°C 以上の高温で著しく促進される。

コロイドの吸着挙動

- ・セメントコロイドは多価希土類及びアクチニド類などの放射性核種と著しい結合性を有することから、ソーススタークに大きく影響を及ぼす可能性がある。

セメント浸出水とニアフィールド物質との相互作用

- ・花崗岩、砂岩、あるいは粘土との接触によって生じ、天然の地下水中に存在するシリカ、粘土粒子等のコロイドはpH、 Ca^{2+} 濃度等の地下水条件に大きく影響される。
- ・特にコロイドの安定性は Ca^{2+} 濃度の影響が大きく、ニアフィールドで達し得る 10^3 mol/dm^3 以上の濃度では沈殿を生じる。

- ⑩
 · Ca^{2+} は核種競争として重要な物質である。

コロイド移行挙動

- セメント浸出液とニアフィールドの地層との相互作用は、多孔質物質の沈着等によるコロイド移行遅延等のため非常に複雑な現象となり、今後研究が必要である。

普通ポルトランドセメント浸出水中に生成したコロイド核となる粒子を図1-1に示す。微細な空隙が多数存在することが明らかである。また、シリカ、粘土粒子のコロイドの安定性と Ca^{2+} 濃度との関係を図1-2に示す。

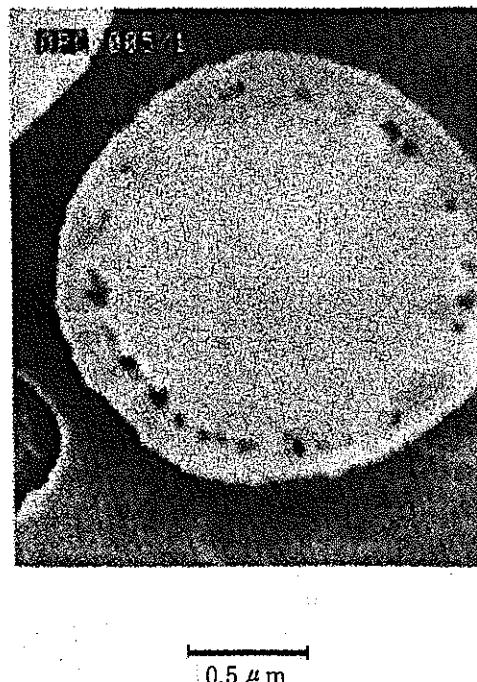


図1-1 セメント浸出水中の微細粒子

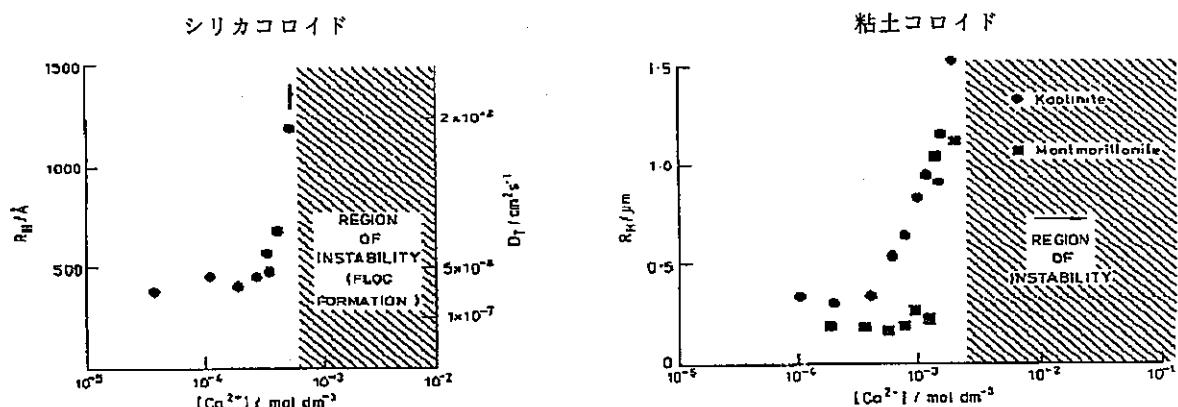


図1-2 シリカ、粘土粒子のコロイドの安定性と Ca^{2+} 濃度との関係

1.1.2 地下水コロイドの挙動

Gorlebenの地下水系において、地下水コロイドとアクチニド元素との化学的相互作用に関する研究が実施され、以下の結果が報告されている。

- ・ 3価、4価、6価のアクチニド元素はフミンコロイドの多い地下水コロイドに強く吸着し、疑似コロイドを形成する。
- ・ 地下水コロイドへの吸着と脱着は、pHの変化に可逆的である。
- ・ NpO^{2+} の吸着は無視できる程度である。
- ・ 3価のCmについてTPLFS（時間解析レーザー傾向分析法）による相互反応の解析が行われ、フミン酸、フルボ酸による錯形成がアクチニド疑似コロイドの生成プロセスの支配的反応である。

図1-3にGorlebenの地下水系におけるコロイド粒子数を粒子径の関数として示す。同地下水系に見いだされる全コロイド粒子数は約 $10^{15}/\text{l}$ であり、その97%以上が30nmより小さい粒系であることがわかる。この粒径分布は有機物の多い同地下水系に特有のものであるとしている。

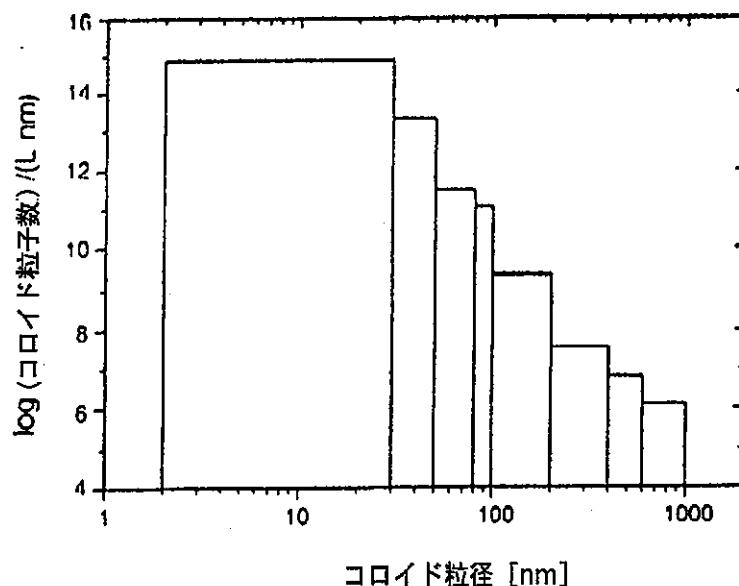


図1-3 コロイド粒子の粒径分布

フミンコロイドを含む地下水中のCm濃度とこれを $1 \mu\text{m}$ のフィルタで濾過した濾液中のCm濃度のpHによる変化を図1-4に示す。pHが高くなるほど疑似コロイドとして濾過さ

れるCmの量が増加することが明らかである。

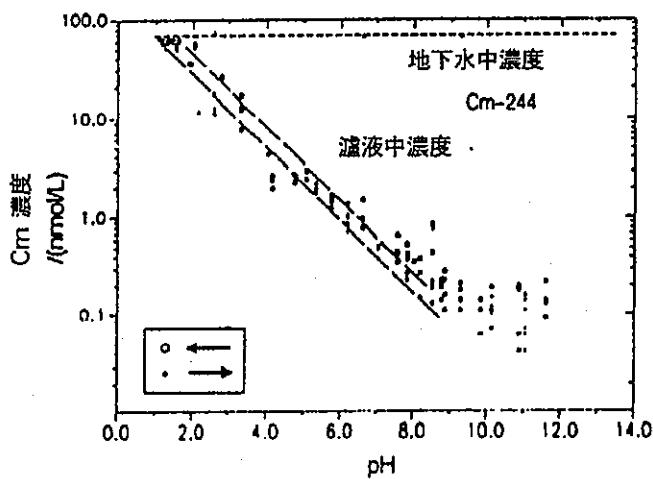


図1-4 濾液中Cm濃度のpH依存性

2. ガス発生・移行に関する処分システムへの影響評価

本章ではTRU廃棄物処分施設内において発生するガスの蓄積、移行挙動について各種パラメータについて感度解析を行うことにより現象の重要度、パラメータの影響度を把握すると共にモデルパラメータの取得方法、移行評価手法について調査することにより、今後の特性試験の実施、評価モデルの改良に資するものである。

2.1 2相流パラメータの調査

本節ではガスの蓄積、移行挙動に対する感度解析を実施するに当たり、パラメータ値とその変動範囲、パラメータ相互の関係を設定、把握するため、各人工バリア候補物質に対して2相流評価に係わる特性値と、それらの相互関係について文献調査を行った。

2.1.1 パラメータの調査

2相流の解析に用いるデータの適性化を計るため、地層、あるいは多孔質媒体中の気体、液体の移行に係わる各種文献について調査を実施し、岩盤、コンクリート、粘土物質等の特性値を整理した。

(1) 調査対象パラメータ

本解析は昨年度に引き続き、ローレンスバークレイ研究所において開発された2相流評

価コードである”TOUGH”を用いて行う。したがってここではTOUGHコードに採用されている数学モデルを解くために必要なパラメータをデータ収集の対象とした。

本年度の調査は以下のパラメータ、バリア候補材料を中心として行った。

- ・廃棄物パッケージ ; セメント系材料
- ・緩衝材(充填材) ; ベントナイト、及びベントナイト／珪砂混合物、
(セメント系材料)
- ・構造物 ; セメント系材料
- ・地層(母岩、ゆるみ域)；亀裂系結晶質岩、多孔質堆積岩

(2) 調査結果

ここでは人工バリア候補材料についての調査結果を例として示す。

(c) 緩衝材

スウェーデンにおける仕様済み燃料処分の緩衝材に関する研究、ベルギーの高レベル／TRU廃棄物処分場候補地であるBoom clayに対する研究例を中心にデータを収集した。結果を表2-1に示す。

(d) 構造物、充填材

構造物及び処分空洞への充填材としてはセメント系の材料を対象として調査を行った。

コンクリート中の気体の移行については、特にスイス、イギリスにおいて研究が進展しており、2層流パラメータについても比較的データがとられている材料であるといえる。結果を表2-2に示す。

表2-1 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 ¹]	相対透過係数 評価関数	毛管圧 評価関数	係数	備考
ペントナイト	1.80×10 ³	0.13	1.0×10 ⁻²¹ ~1.0×10 ⁻²⁰			Pe; ~2.1×10 ⁷ [Pa] Pe; ~1.6×10 ⁶ [Pa] Pe; ~6.0×10 ⁴ [Pa]	測定値
	1.35×10 ³	0.35	1.0×10 ⁻²⁰ ~1.0×10 ⁻¹⁹				
	0.90×10 ³	0.57	1.0×10 ⁻²⁰ ~1.0×10 ⁻¹⁸				
ペントナイト 50/50砂			1.0×10 ⁻¹⁹ ~1.0×10 ⁻¹⁸			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
			1.0×10 ⁻¹⁸ ~1.0×10 ⁻¹⁷				
			1.0×10 ⁻¹⁷ ~3.0×10 ⁻¹⁷				
			1.0×10 ⁻¹⁸ 1.0×10 ⁻¹⁷				
ペントナイト 10/90砂	1.80×10 ³		1.0×10 ⁻¹⁸ 1.0×10 ⁻¹⁷				測定値
	1.60×10 ³		1.0×10 ⁻¹⁷ ~3.0×10 ⁻¹⁷				
ペントナイト 30/70砂	2.35×10 ³		1.0×10 ⁻¹⁷ ~3.0×10 ⁻¹⁷				測定値
	~2.20×10 ³		~3.0×10 ⁻¹⁷				
ペントナイト 50/50砂	1.88×10 ³		~4.0×10 ⁻²¹ 1.0×10 ⁻¹⁸ ~3.0×10 ⁻¹⁷			Pe; 5.0×10 ⁵ [Pa] ~1.5×10 ⁶ [Pa]	測定値
	1.95×10 ³		~3.0×10 ⁻¹⁷				
	~3.0×10 ⁻¹⁷						
	~3.0×10 ⁻¹⁷						
London Clay			1.0×10 ⁻¹⁸ ~1.0×10 ⁻¹⁶				測定値
粘土		0.20	1.0×10 ⁻¹⁹ ~1.0×10 ⁻¹⁸				測定値
粘土		0.15	1.0×10 ⁻¹⁶	Corey	Leverett	S _{ir} ; 0.10 S _{sr} ; 0.0 P _t ; 3.5×10 ⁶ [Pa]	設定値
粘土 Boom Clay				K _i vs. S _w	P _e vs. K		測定値

表2-2 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 ³]	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	$K_g; 1.0 \times 10^{-16}$ $K_l; 1.0 \times 10^{-18}$	Corey	Narasimhan	$S_{fr}; 0.3$ $S_{sr}; 0.18$ $P_e; 1.0 \times 10^5 [\text{Pa}]$ $P_0; 1.2 \times 10^6 [\text{Pa}]$ $\eta = 1.3$	測定値
コンクリート		0.107 0.244	1.0×10^{-20} $\sim 1.0 \times 10^{-14}$			$P_e; 5.0 \times 10^5 [\text{Pa}]$ $\sim 1.0 \times 10^7 [\text{Pa}]$	測定値
モルタル/ コンクリート			1.0×10^{-21} $\sim 1.0 \times 10^{-14}$		P_e vs. K	$P_e; 1.0 \times 10^5 [\text{Pa}]$ $\sim 1.5 \times 10^6 [\text{Pa}]$	測定値
モルタル/ コンクリート SRPC	2.48×10^3	0.13	2.0×10^{-17}				測定値
PFA-OPC	2.43×10^3	0.12	1.0×10^{-21} $\sim 1.0 \times 10^{-17}$				
BFS-OPC	1.89×10^3	0.3~0.4	1.0×10^{-21} $\sim 1.0 \times 10^{-16}$ 1.0×10^{-20} $\sim 1.0 \times 10^{-16}$ 1.0×10^{-15} $\sim 1.0 \times 10^{-14}$				鉄筋
PFA-OPC							打継ぎ

2.1.2 パラメータ間の相互関係

2相流の解析を行ううえで各パラメータの間に相互関係が存在する場合、それらに従った、各パラメータ間で整合性のとれた条件を設定することが重要である。本項では、移行

媒体の各特性値間の相互関係に対して実施された試験、研究例について調査した。

(1) 2相流パラメータと媒体の基本物性、状態量との関係

(a) 毛管圧vs.毛管半径、表面張力

円筒状毛管モデル；毛管圧の基本モデルであり、地層物質等への適用には拡張の必要がある。

(b) 透過係数vs.間隙率、粒子径

Kozeny - Carman の式；球状粒子充填層に対する透過性の評価モデル。地層物質等への適用には拡張の必要がある。

(c) 透過係数vs.媒体密度（間隙率）

粘土系物質については、乾燥密度と透過係数（透水係数）との関係が整理された例があるが、鉱物組成、粒径分布によって挙動は異なることが考えられる。

(d) 毛管圧（毛管排除圧）vs.媒体密度（間隙率）

粘土系物質について、乾燥密度と毛管圧（毛管排除圧）との関係が整理された例があるが、鉱物組成等の相異によって挙動は異なることが考えられる。

(e) 毛管圧（毛管排除圧）vs.透過係数

粘土系物質について、比較的広い絶対透過係数の範囲に対して関係が整理された例がある。

(f) 毛管圧vs.間隙水飽和度

間隙水飽和度の低下によって毛管圧は上昇することが知られているが、その挙動は各物質の間隙構造によって決定される。この挙動を記述する関係式として数種類のモデルが提案されているが、各物質との対応は特性試験により確認する必要がある。

(g) 相対透過係数vs.間隙水飽和度

間隙水飽和度の変化によってガスおよび水の透過係数は変化することが知られているが、その挙動は毛管圧と同様に各物質の間隙構造によって決定される。この挙動を記述する関係式として数種類のモデルが提案されているが、各物質との対応は特性試験により確認する必要がある。

(2) 2相流パラメータ相互の関係

(a) 毛管圧vs.透過係数（間隙水飽和度、間隙率、表面張力）

Leverettの関係；間隙水飽和度と毛管圧との関係を記述し、間隙構造の類似性が評価可能。

(b) 毛管圧vs.透過係数（間隙水飽和度，間隙率，表面張力，屈曲度）

Purcell の手法；毛管圧と間隙水飽和度との関係から，相対透過係数と間隙水飽和度との関係を評価する。

移行媒体の透過性及び毛管圧の変化の特長を決定する 2 相流パラメータは間隙構造の相違を反映する。したがって，類似の間隙構造，鉱物組成を有する粘土物質等の狭い範囲内について透過性と基本物性との間にある関係が参考となるが，2 相流パラメータと間隙水の飽和度については物質ごとに少なくとも一方の特性曲線を把握することが必要である。また，2 相流パラメータ相互の関係についても，間隙構造の類似する物質間についてのみ，毛管圧から相対透過係数への換算が可能な状況である。

2.2 2 層流パラメータの感度解析

本節では感度解析対象とすべきパラメータを選定し，感度解析条件を設定することにより，主要なパラメータについてガスの蓄積，移行に対する影響度を把握し，今後特性試験を実施すべきパラメータの優先度の設定に資する。

2.2.1 感度解析パラメータの選定

(1) 感度解析パラメータの設定

感度解析対象とすることが望ましいパラメータは以下のようにまとめられる。

- ・ガスの透過を支配する層に対する絶対透過係数
- ・ガスの透過を支配する層に対する相対透過係数評価モデル
- ・地層及び緩衝材等の毛管圧評価モデル
- ・毛管圧評価パラメータ（毛管排除圧）
- ・ガス発生速度，及び発生期間

これらのうち，毛管圧評価モデルについては現時点で複数のモデルについて必要となるパラメータ値に関するデータが不足することから，本評価では代表的モデルについてのみ解析を行うこととした。

また，ここで抽出されたパラメータの他に，ガスの発生速度等にも影響の大きいと考えられる処分場閉鎖後の再冠水の状況について把握することが重要であることから，初期条件として設定する処分場の間隙水飽和度及び間隙圧力についても変動対象とした。

以上より選定された変動対象パラメータは以下の通りである。

- ・地層，緩衝材層に対する絶対透過係数

- ・地層，緩衝材層に対する相対透過係数評価モデル
- ・毛管圧評価パラメータ（毛管排除圧）
- ・ガス発生速度，及び発生期間
- ・初期条件（処分場間隙水飽和度，間隙圧力）

(2) 感度解析ケース

本感度解析では試算対象とする処分施設形態のうち，比較的バリア構成の単純なボルトタイプを代表モデルとして上記選定項目全てについてパラメータを変動させることとし，サイロタイプについてはボルトタイプとの相異を示すことを目的として，基本ケースのみについて解析を行うものとした。

ボルトタイプに対しては以下に示すバリア，パラメータのガス発生に対する影響度を把握することを目的として感度解析を行う。

- ①緩衝材層の絶対透過係数の変化
- ②地層の絶対透過係数の変化
- ③各バリア層に適用する相対透過係数評価モデルの相違
- ④各バリア層の毛管圧（毛管排除圧）考慮の有無
- ⑤ガス発生速度，及び発生期間の変化
- ⑥処分場の再冠水挙動の把握

なお，ガス発生の影響度を評価する上での評価指標は，昨年度の解析と同様に，間隙圧力，間隙中のガス，水の飽和度，及び地下水流速とする。

2.2.2 パラメータ値の設定

パラメータ値の設定方法は過去の評価例，及び移行媒体に対する特性試験結果を調査し，これらを参考として相互に矛盾のない値を設定することとした。

設定したケースをまとめて表2-3に示す。

表2-3 感度解析ケース [ボルトタイプ]

(1/2)

パラメータ	ケース1 (基本ケース)	ケース2 (緩衝材)	ケース3 (母岩)	ケース4 (透過性)	ケース5 (毛管圧)	ケース6 (ガス量)	ケース7 (再冠水)
パリア形状・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	11mH×13mW						
廃棄体	7mH×7mW						
充填材	1mT						
緩衝材厚さ	1&2mT	同左	同左	同左	同左	同左	同左
躯体厚さ	—						
ゆるみ域厚さ	5mT						
パリア物性							
密度 [kg/m ³]							
廃棄体	2.4×10 ³						
充填材	2.6×10 ³	同左	同左	同左	同左	同左	同左
緩衝材	2.7×10 ³						
躯体	—						
ゆるみ域	2.7×10 ³						
母岩	2.7×10 ³						
間隙率 [-]							
廃棄体	0.30						
充填材	0.28	同左	同左	同左	同左	同左	同左
緩衝材	0.33						
躯体	—						
ゆるみ域	0.05						
母岩	0.01						
絶対透過係数 [m ³ /s]							
廃棄体	1.0×10 ⁻¹⁶	緩衝材； 2-a; 2.5×10 ⁻¹⁹ 2-b; 2.5×10 ⁻²³	ゆるみ域； 3-a; 1.0×10 ⁻¹² 3-b; 1.0×10 ⁻¹⁶				
充填材	1.0×10 ⁻¹⁷						
緩衝材	2.5×10 ⁻²¹						
躯体	—						
ゆるみ域	1.0×10 ⁻¹⁴						
母岩	1.0×10 ⁻¹⁶						
熱伝導度 [W/m °C]							
廃棄体	2.30						
充填材	2.30	同左	同左	同左	同左	同左	同左
緩衝材	1.70						
躯体	—						
ゆるみ域	2.90						
母岩	2.90						
比熱 [J/kg °C]							
廃棄体	840.						
充填材	840.	同左	同左	同左	同左	同左	同左
緩衝材	1,000.						
躯体	—						
ゆるみ域	840.						
母岩	840.						

表2-3 感度解析ケース [ボールトタイプ]

(2/2)

パラメータ	ケース1 (基本ケース)	ケース2 (緩衝材)	ケース3 (母岩)	ケース4 (透過性)	ケース5 (毛管圧)	ケース6 (ガス量)	ケース7 (再冠水)
2相流パラメータ							
相対透過係数モデル 廃棄体, 充填材	Corey モデル $S_{fr}=0.30$, $S_{sr}=0.18$			Corey モデル $S_{fr}=0.30$, $S_{sr}=0.18$			
緩衝材	Corey モデル $S_{fr}=0.10$, $S_{sr}=0.10$	同左	同左	Sandia モデル $S_{fr}=0.09$, $S_{sr}=0$ $\lambda=0.52$	ケース1に同じ	ケース1に 同じ	ケース1に 同じ
躯体 母岩, ゆるみ域	— Corey モデル $S_{fr}=0.25$, $S_{sr}=0$			Corey モデル $S_{fr}=0.25$, $S_{sr}=0$			
毛管圧評価モデル 廃棄体, 充填材					Narasimhan モデル $P_e=1.0 \times 10^6 [\text{Pa}]$, $P_o=1.2 \times 10^6 [\text{Pa}]$ $\eta=1.3$		
緩衝材	無視	同左	同左	同左	Sandia モデル $P_{max}=3 \times 10^6 [\text{Pa}]$ $P_e=2.4 \times 10^6 [\text{Pa}]$ $\lambda=0.52$	ケース1に 同じ	ケース1に 同じ
躯体 母岩, ゆるみ域					— Narasimhan モデル $P_e=1.0 \times 10^6 [\text{Pa}]$, $P_o=1.2 \times 10^6 [\text{Pa}]$ $\eta=1.3$		
重力の効果	考慮する	同左	同左	同左	同左	同左	同左
その他の初期条件							
間隙水飽和度 [-] 廃棄体	1.0						0.4
充填材	1.0	同左	同左	同左	同左	同左	0.4
緩衝材	1.0						0.4
躯体	—						—
母岩, ゆるみ域	1.0						1.0
温度	30 [°C]	同左	同左	同左	同左	同左	同左
間隙圧力 [Pa] 廃棄体	2.0×10^6						1.0×10^5
充填材	2.0×10^6	同左	同左	同左	同左	同左	1.0×10^5
緩衝材	2.0×10^6						1.0×10^5
躯体	—						—
母岩, ゆるみ域	2.0×10^6						2.0×10^6

パラメータ	ケース1 (基本ケース)	ケース2 (緩衝材)	ケース3 (母岩)	ケース4 (透過性)	ケース5 (毛管圧)	ケース6 (ガス量)	ケース7 (再冠水)
ガス発生速度 [m³(STP)/m³ y] (発生ガスは全て airとして解析する)	鉄の腐食 $H_2; 0.022 [\text{m}^3/\text{m}^3 \text{y}]$ (1,700年間)	同左	同左	同左	同左	鉄の腐食; 5-a; 0.22 [m³/m³ y] (170年間) 5-b; 0.002 [m³/m³ y] (17,000年間)	考慮 しない

2.2.3 感度解析

(1) 解析条件

TRU廃棄物処分場におけるガス発生の影響に対する感度解析の基本条件を以下に示す。

(a) 解析コード

本解析にはローレンスパークレイ研究所において開発された、2相流、熱移行解析コードである“TOUGH”コードを使用する。

同コードの機能、特徴は以下の通りである。

(b) 解析モデル

上述のように本感度解析ではボルトタイプ、サイロタイプの2種類の処分施設概念について評価を行った。それぞれの施設概念、廃棄物の定置状況主要部分の寸法を図2-1～2に示す。

ボルトタイプについては2次元直交座標系を採用し、1/2対象として解析範囲を設定した。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している。

サイロタイプについては3次元円柱座標系を採用し、中心部からの距離の増加による分散の効果を反映可能としている。

また、初期間隙圧力は双方の施設タイプとも深度200mでの水頭圧を考慮し、2[MPa]で均一に設定した。

(2) 解析結果

ボルトタイプに対する基本ケースの解析結果を図2-3以降に示す。

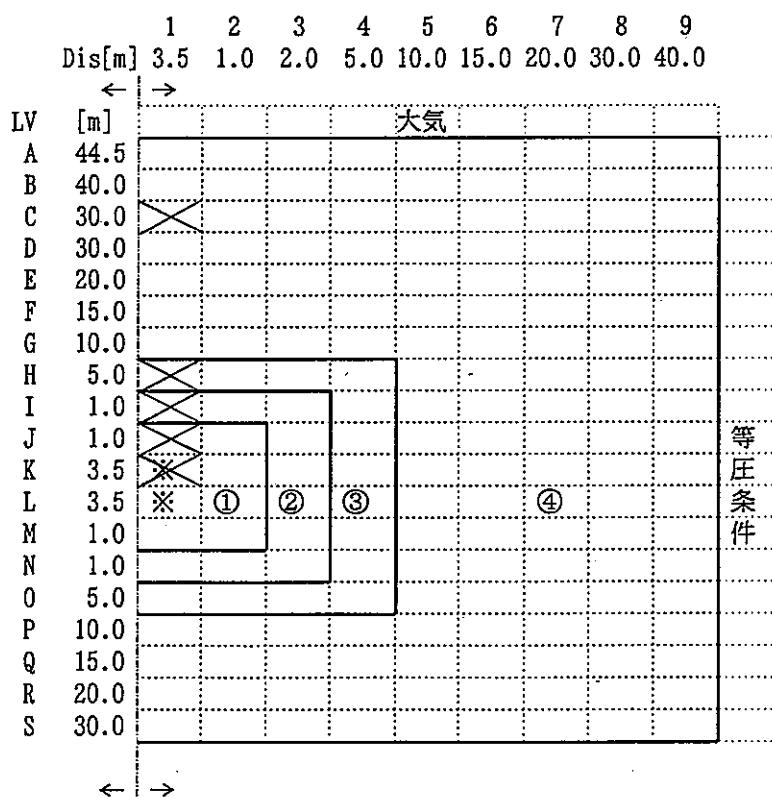
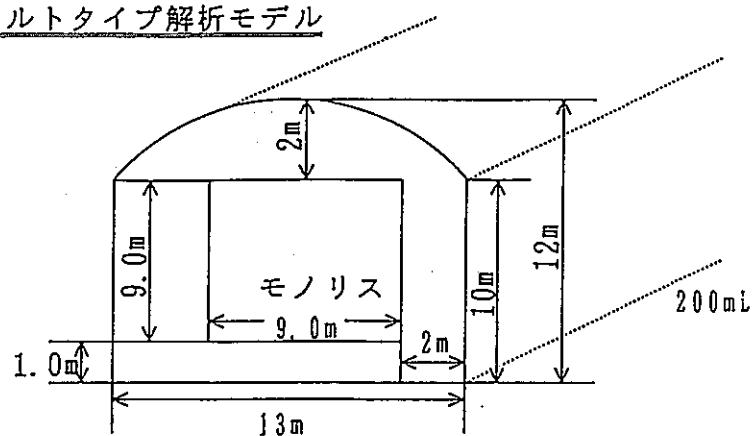
(3) 結論

以上の解析結果より、本評価において以下の結論を得た。

- ・ガスの発生により処分施設内の圧力上昇、間隙水の排出による緩衝材層での間隙水流の発生、ガスの地層への放出等の現象が生じることが確認された。
- ・低透過性物質を緩衝材として用いた処分概念では、緩衝材の特性が処分場内の圧力上昇、地下水水流速等への影響を決定する。
- ・粘土系緩衝材の透過特性についてデータを得る必要がある。
- ・地層の透過特性については緩衝材の透過性との相関でその影響度が決定されるが、地層中のガス移行挙動に対する影響は大きいことから、データの取得が必要である。

- ・毛管圧については処分場からのガス放出挙動に対して重要であり、データを取得する必要がある。
- ・低透過性のバリアが長期間にわたって健全である場合には、再冠水に相当の期間が必要である。なお、この期間は毛管圧の影響を受けるものと考えられ、さらに評価が必要である。
- ・ガス発生速度、及びその発生期間も処分場環境に影響が大きいことから、処分場環境条件下でのガス発生量の把握が求められる。

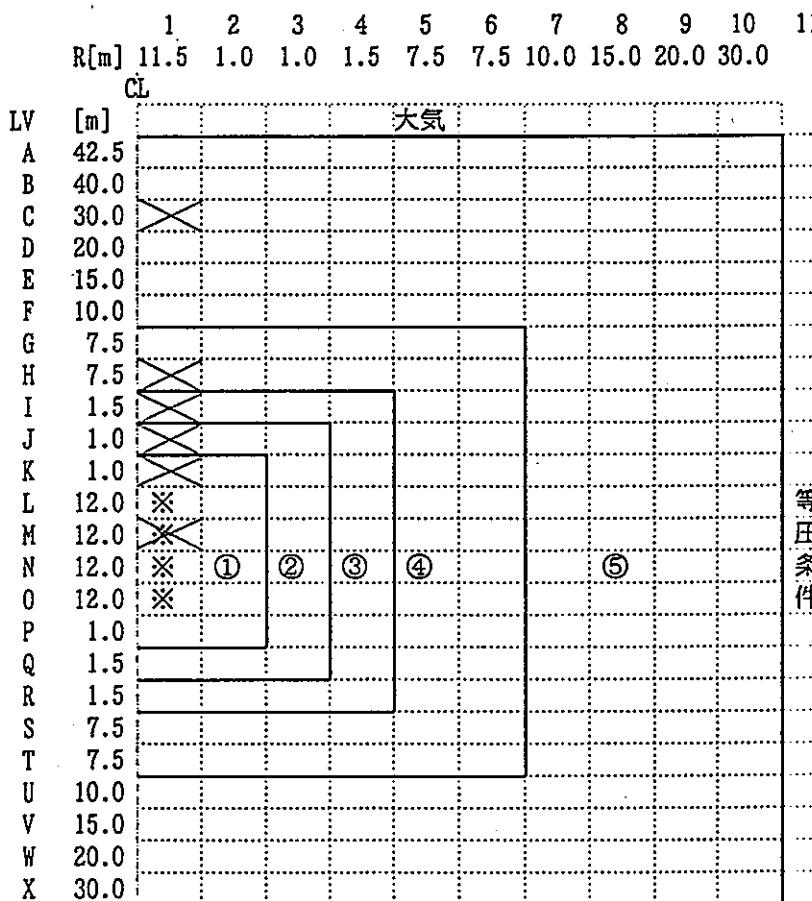
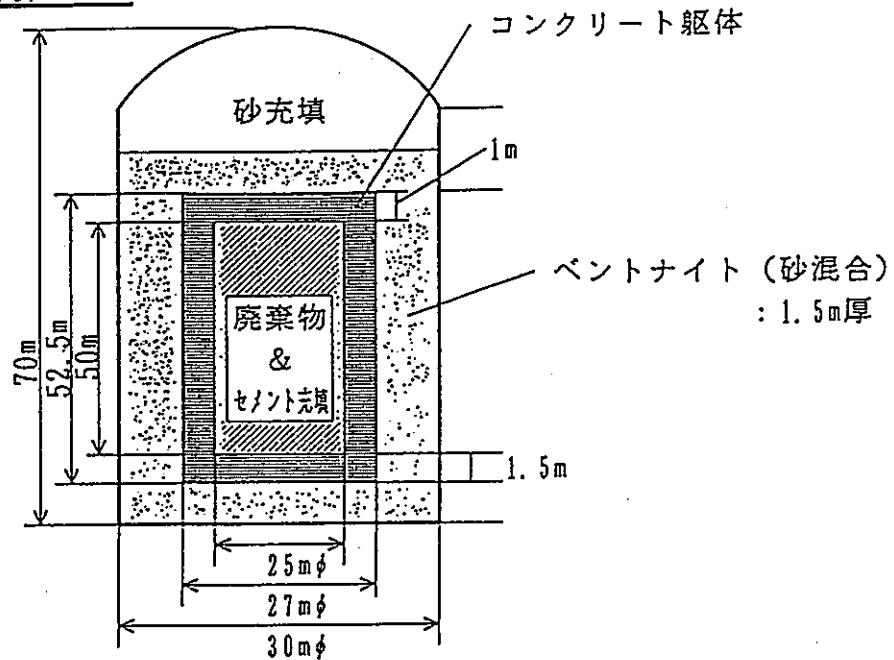
ボルトタイプ解析モデル



- モデルを $1/2$ 対称として 2 次元直交座標系で設定した。
- 断面の奥行きは 1 m とした。
- LV A の上側に大気を設定した。
- 一定深度以下では不透水層を仮定し、LV S の下側では流れが生じないようにした。
- 岩盤（領域④）外側境界は等圧条件とした。
- ① 廃棄体及び充填材
- ② 緩衝材
- ③ ゆるみ域
- ④ 母岩
- * ガス発生要素
- X 各パリア代表要素

図2-1 ボルトタイプ解析モデル

サイロタイプ解析モデル



○モデルを3次元円柱座標系で設定した。

○LV A の上方に大気を設定した。

○岩盤（領域⑤）外側境界は等圧条件とした。

- ① 廃棄体及び充填材
- ② コンクリート構造物
- ③ ベントナイト
- ④ ゆるみ域
- ⑤ 岩盤
- ※ ガス発生要素
- × 各パリア代表要素

図2-2 サイロタイプ解析モデル

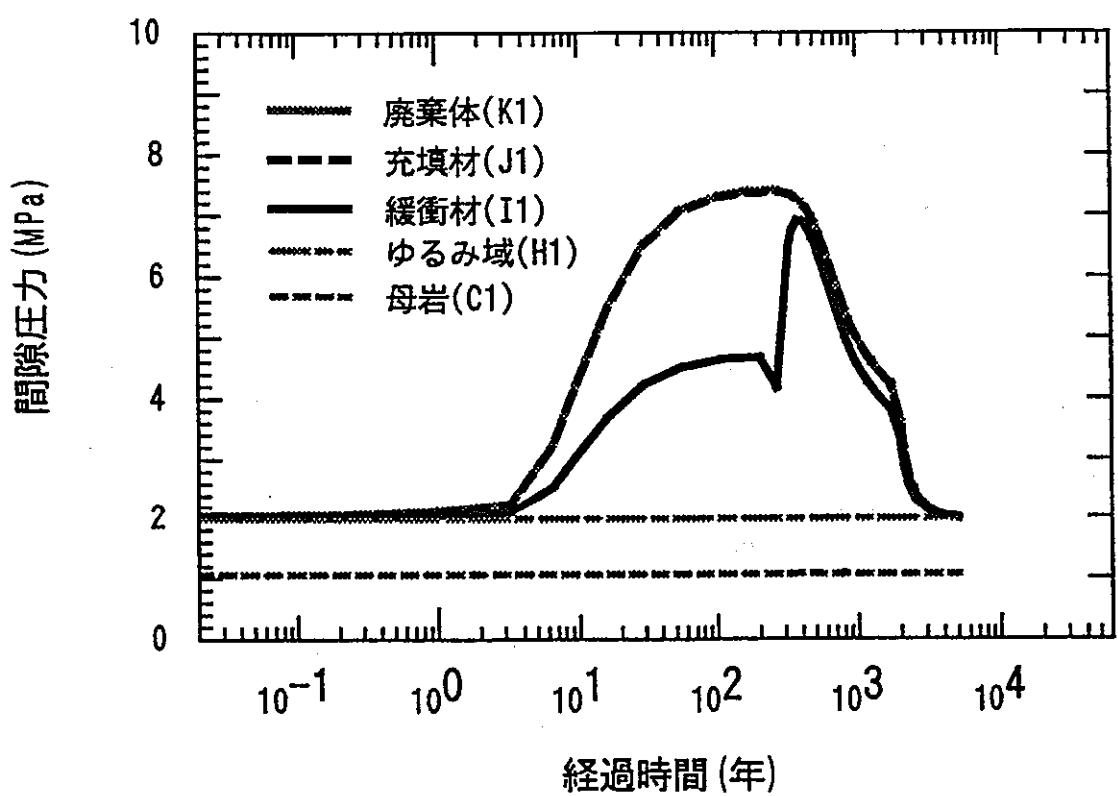


図2-3 間隙圧力の経時変化（ボールトcase1）

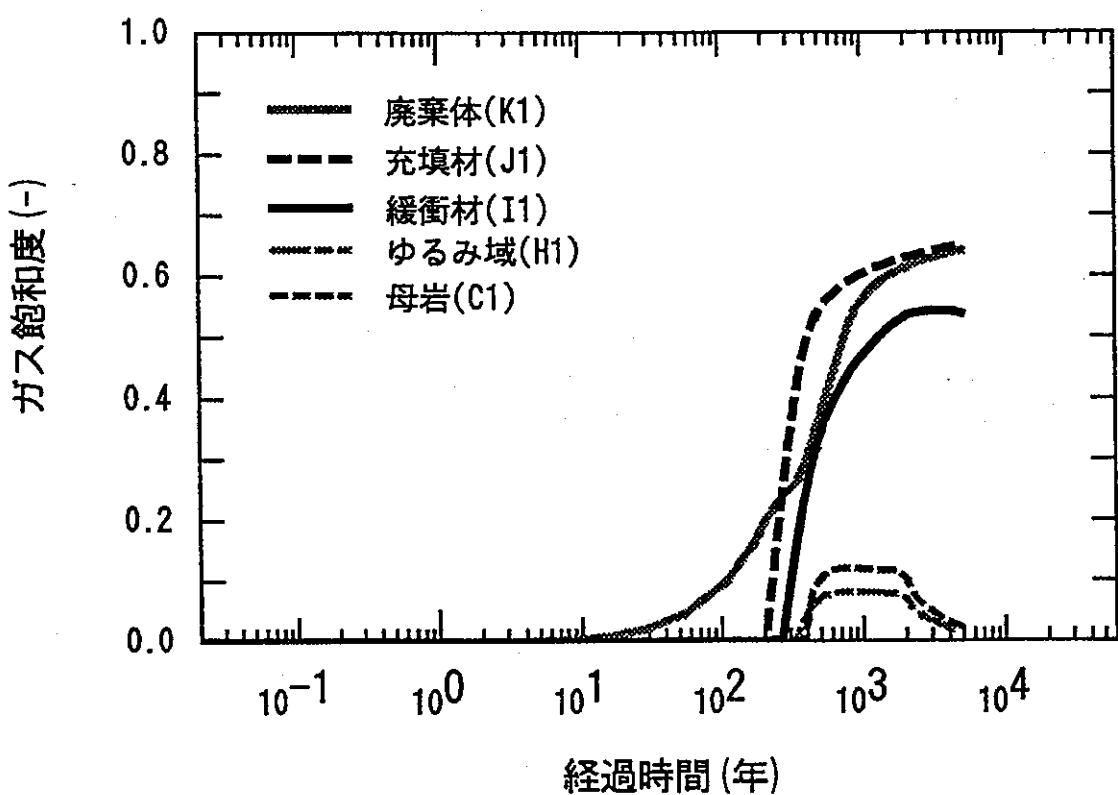


図2-4 ガス飽和度の経時変化（ボールトcase1）

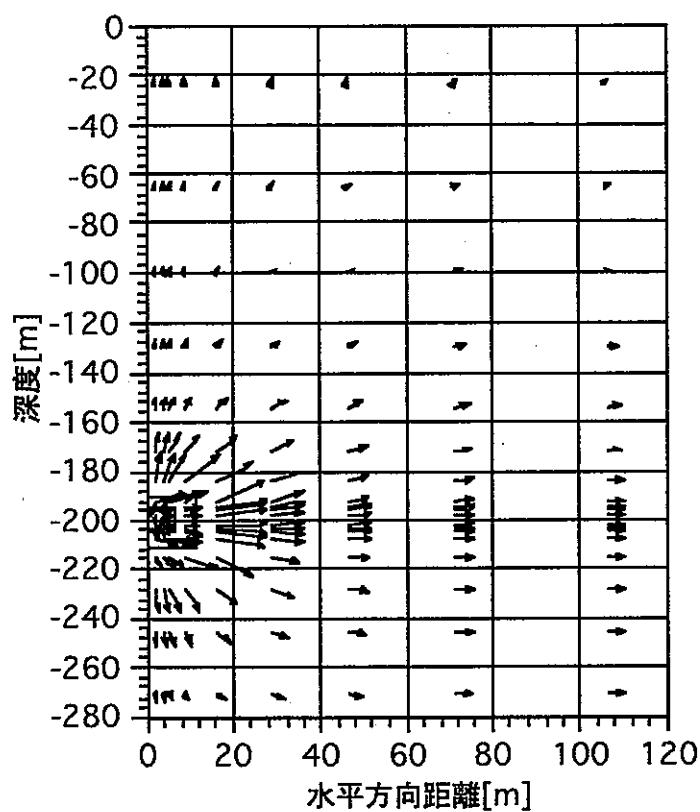


図2-5 地下水流ベクトル（ボールトcase1：330年）

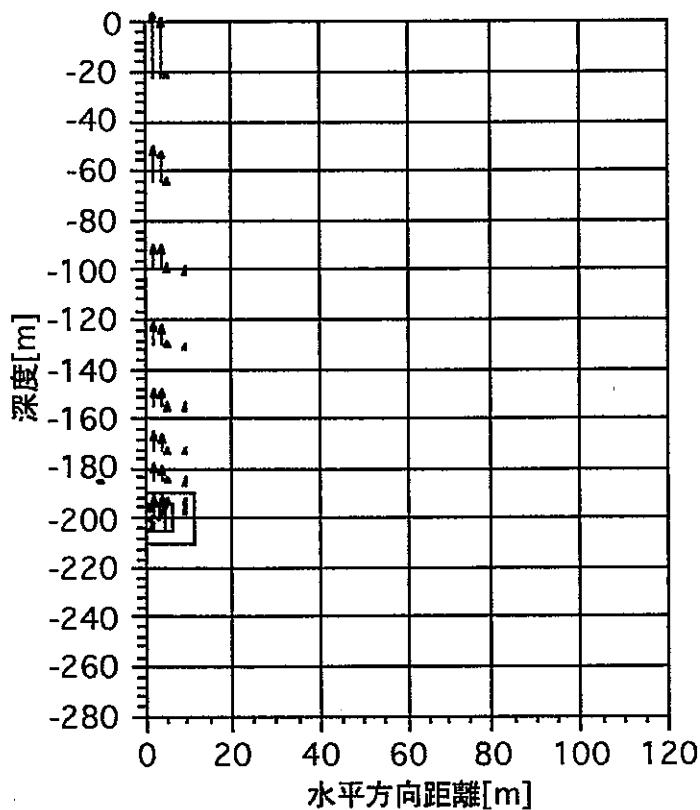


図2-6 ガス流ベクトル（ボールトcase1：800年）

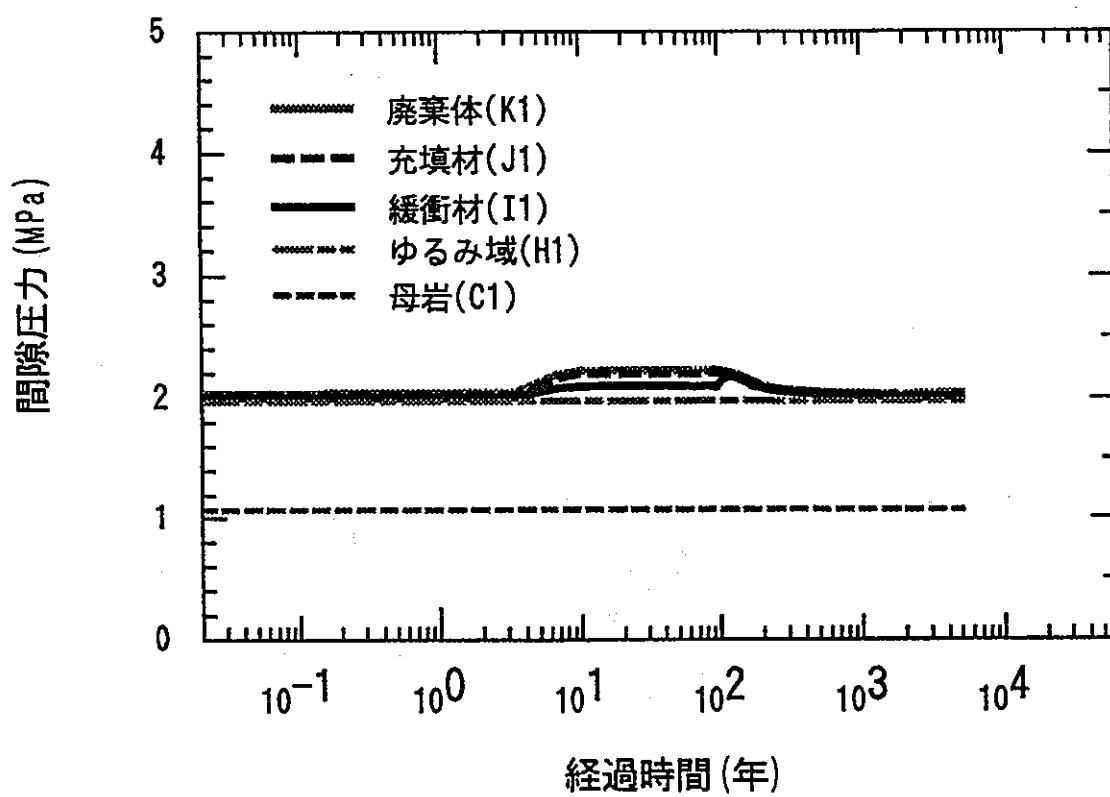


図 2-7 間隙圧力の経時変化（ボールトcase2-a）

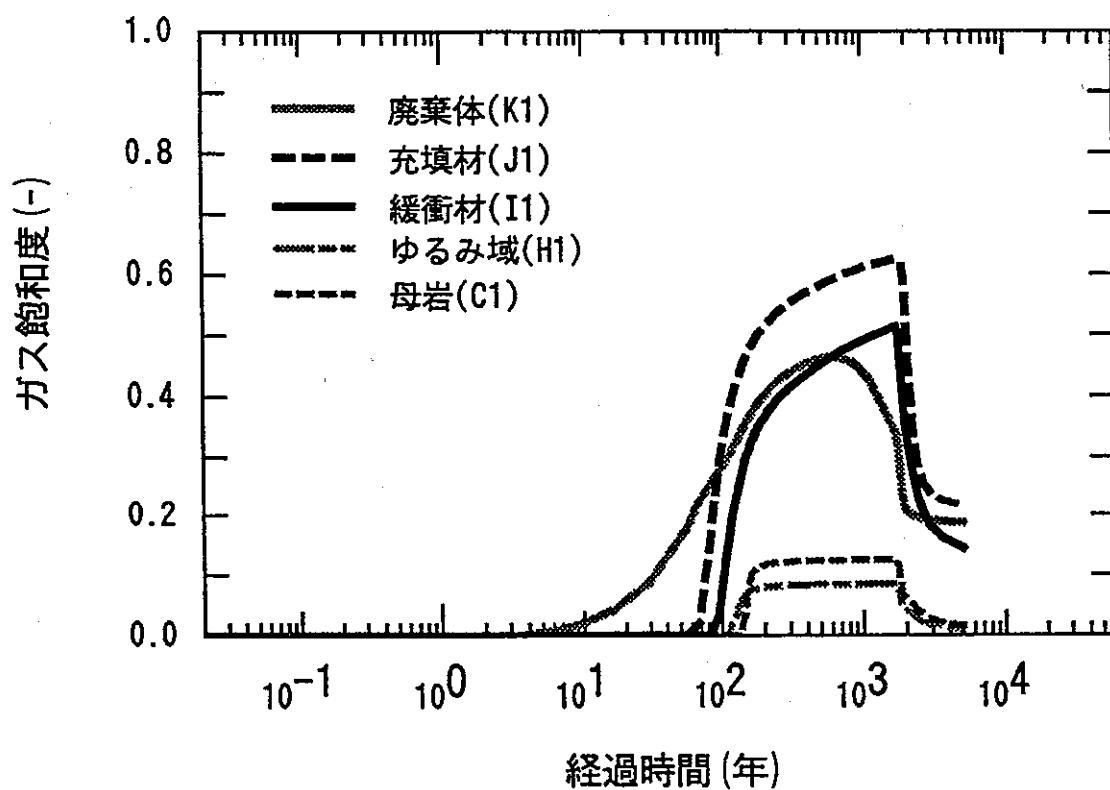


図 2-8 ガス飽和度の経時変化
(ボールトcase2-a)

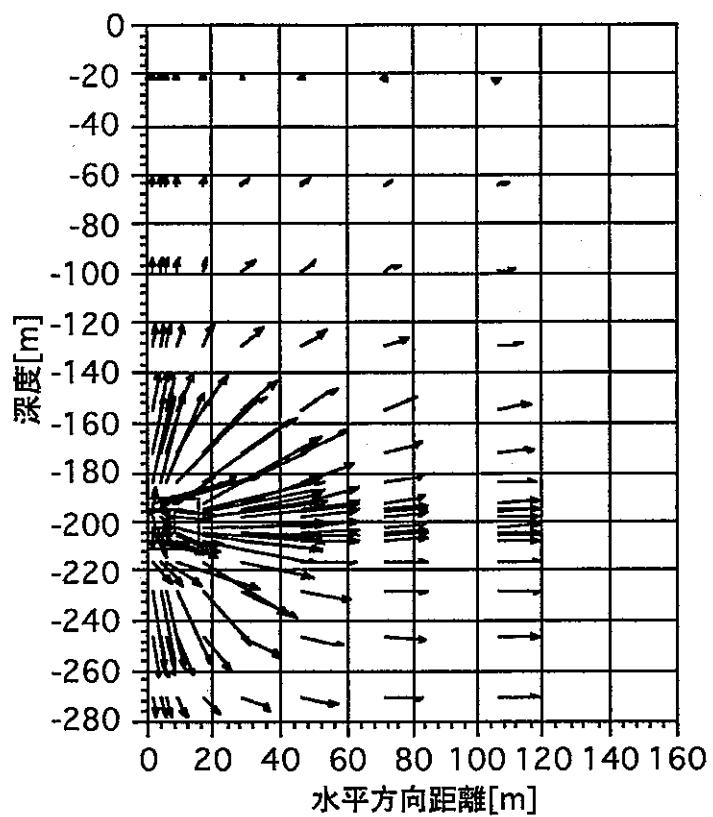


図 2-9 地下水流ベクトル（ボールトcase2-a : 110年）

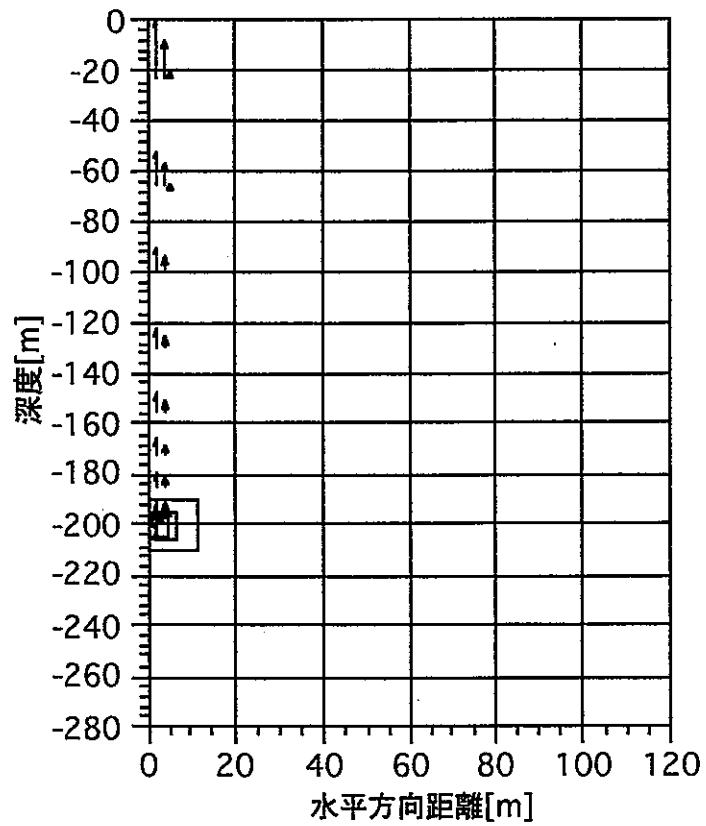


図 2-10 ガス流ベクトル（ボールトcase2-a : 190年）

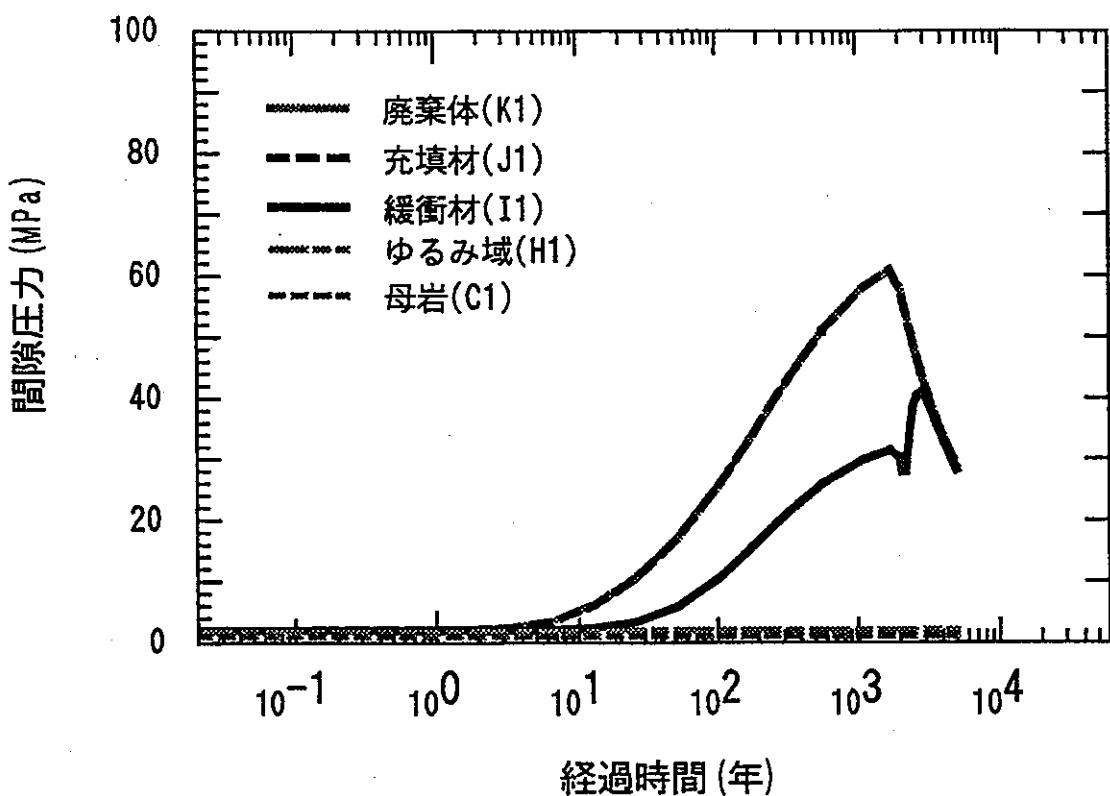


図 2-11 間隙圧力の経時変化 (ボールトcase2-b)

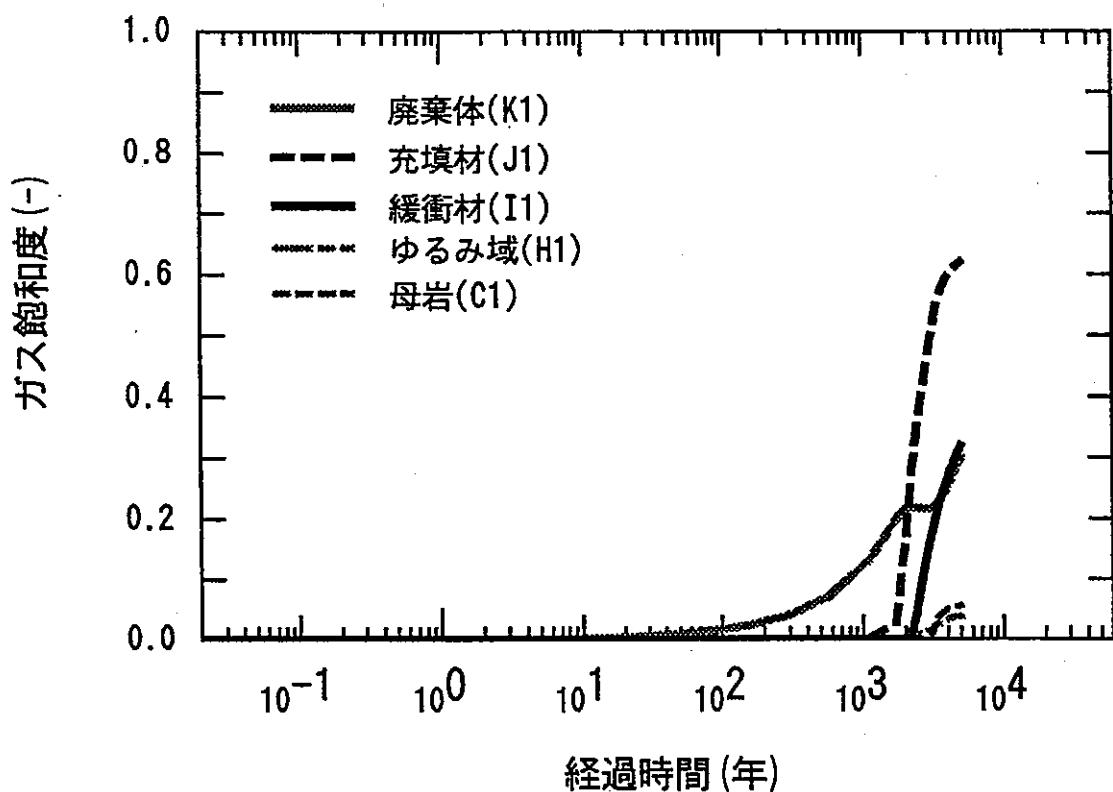


図 2-12 ガス飽和度の経時変化 (ボールトcase2-b)

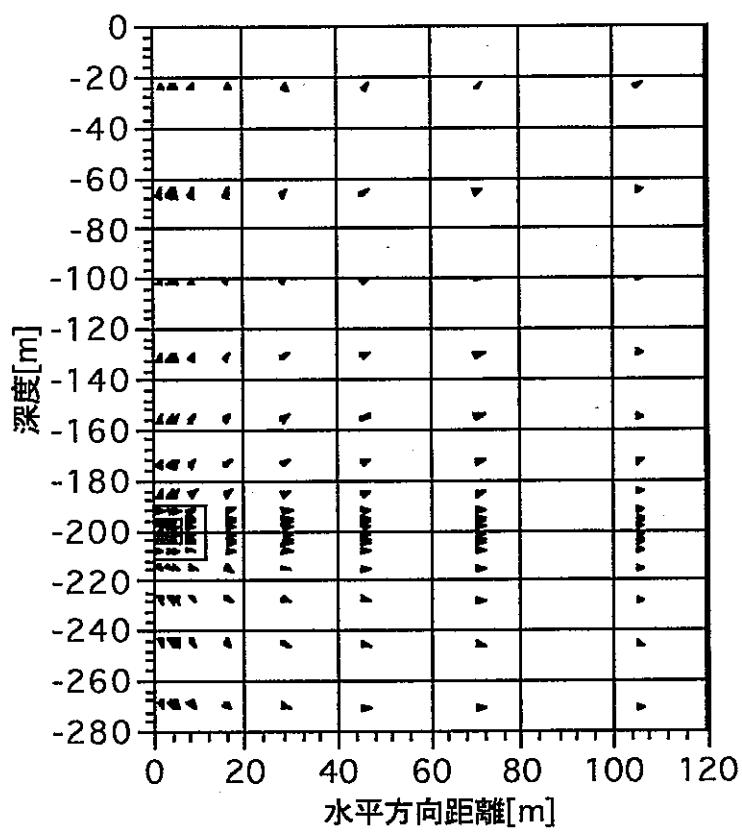


図 2-13 地下水流ベクトル（ボールトcase2-b : 2,680年）

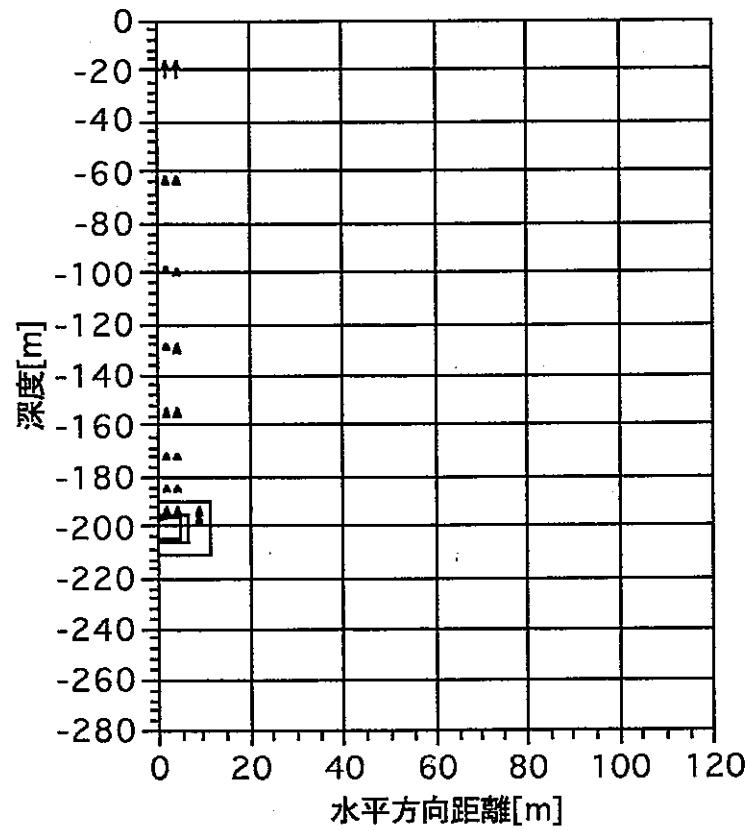


図 2-14 ガス流ベクトル（ボールトcase2-b : 5,000年）

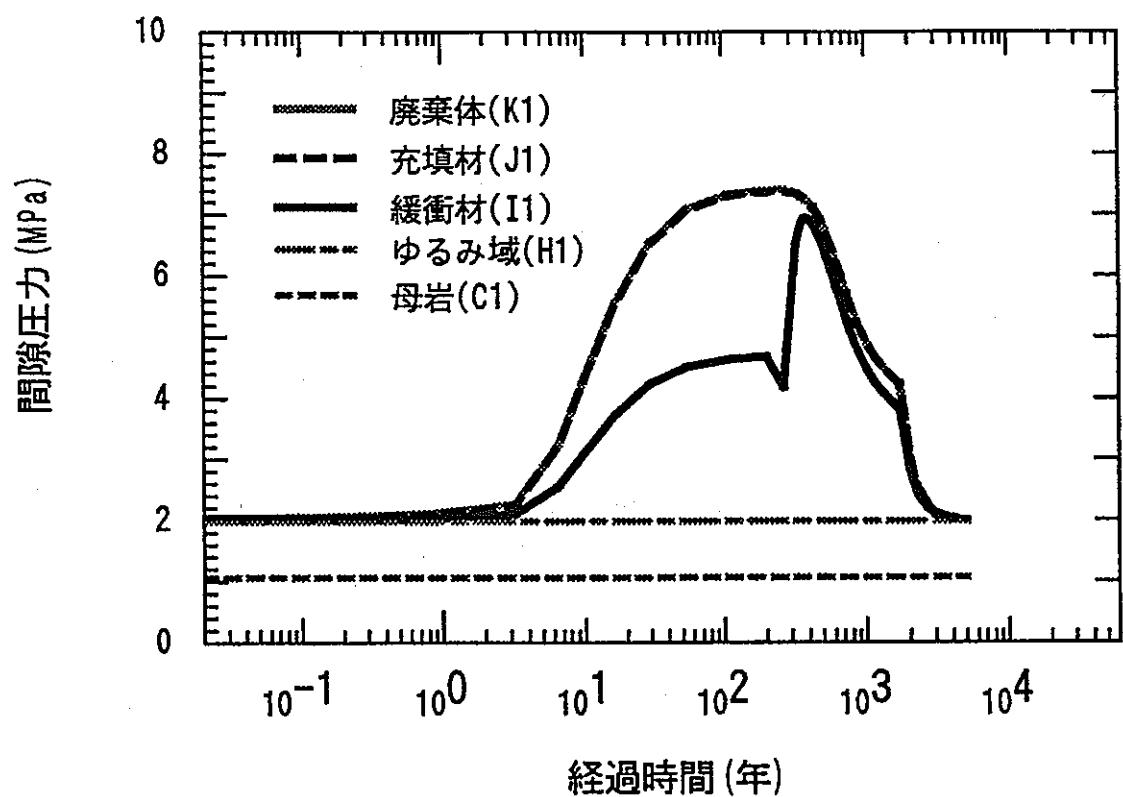


図 2-15 間隙圧力の経時変化 (ボールトcase3-a)

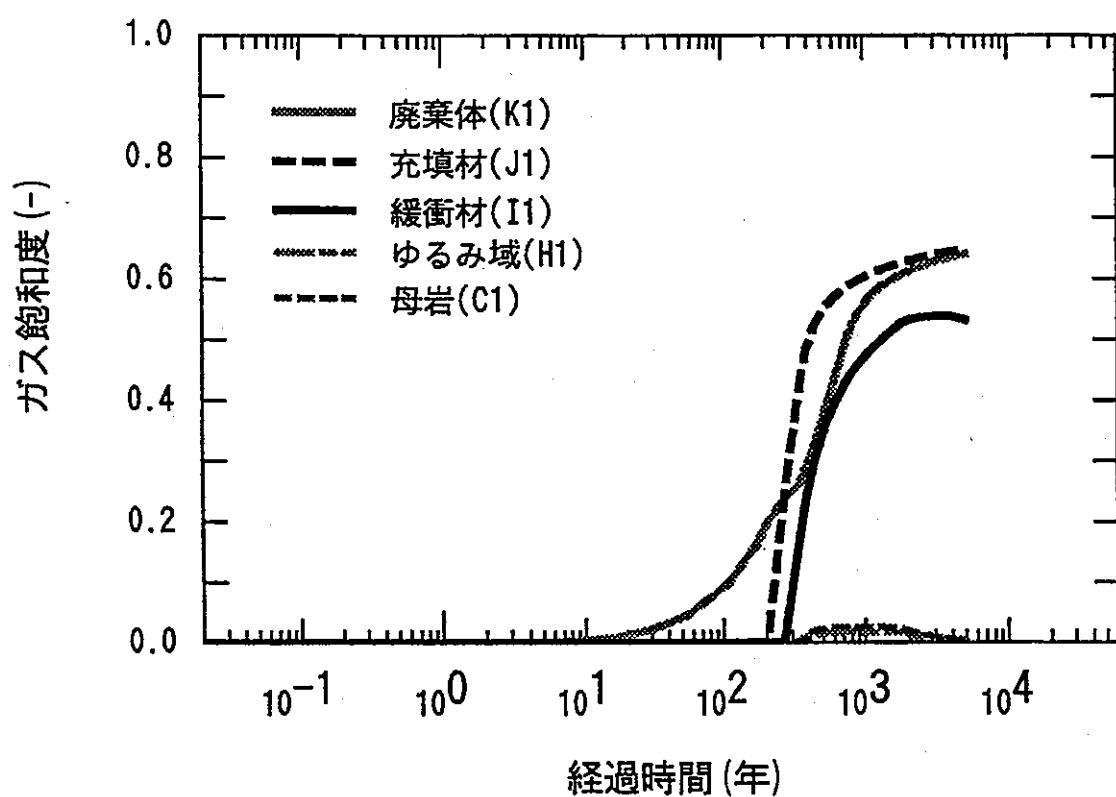


図 2-16 ガス飽和度の経時変化 (ボールトcase3-a)

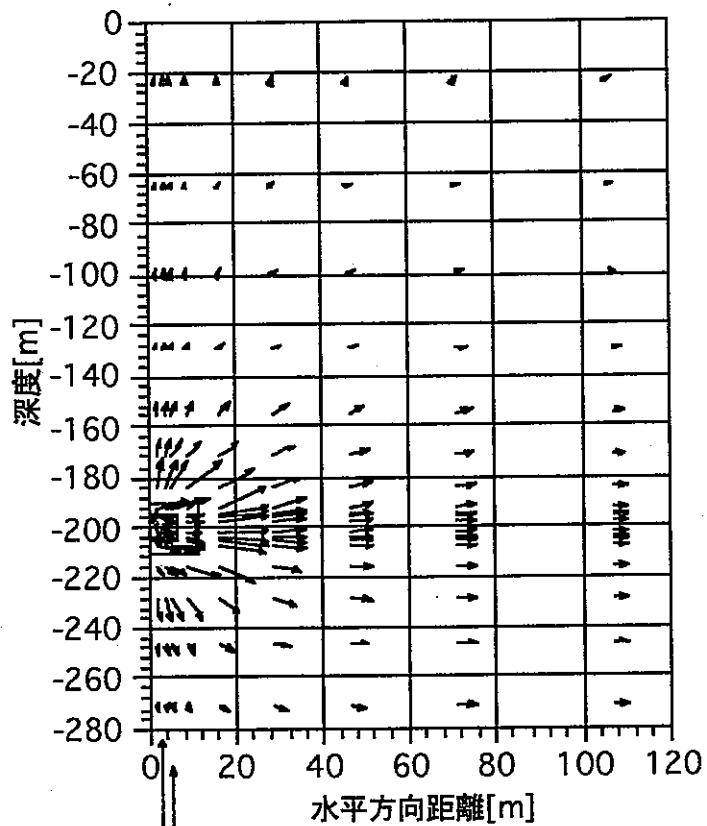


図 2-17 地下水流ベクトル（ポールトcase3-a : 330年）

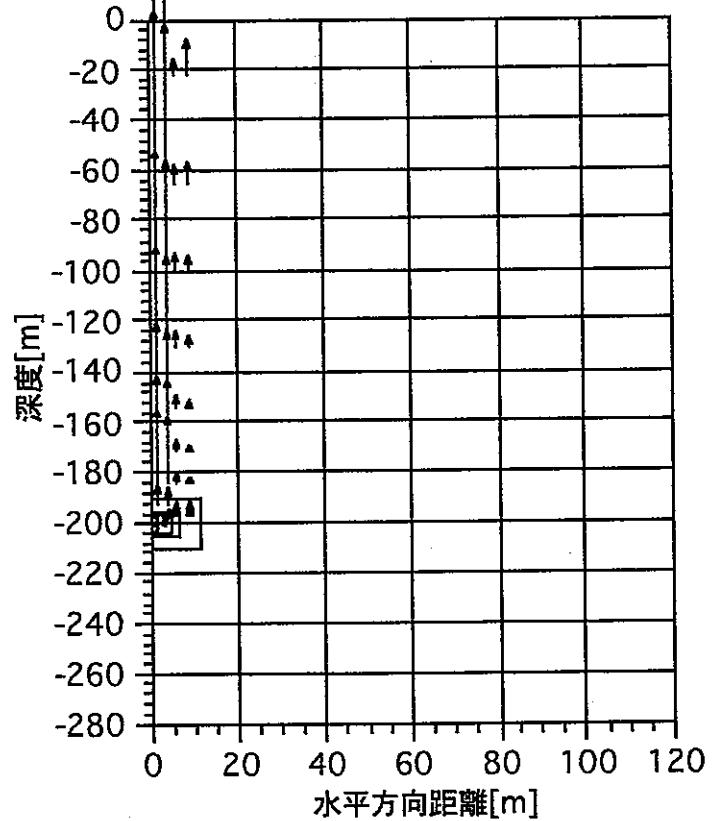


図 2-18 ガス流ベクトル（ポールトcase3-a : 760年）

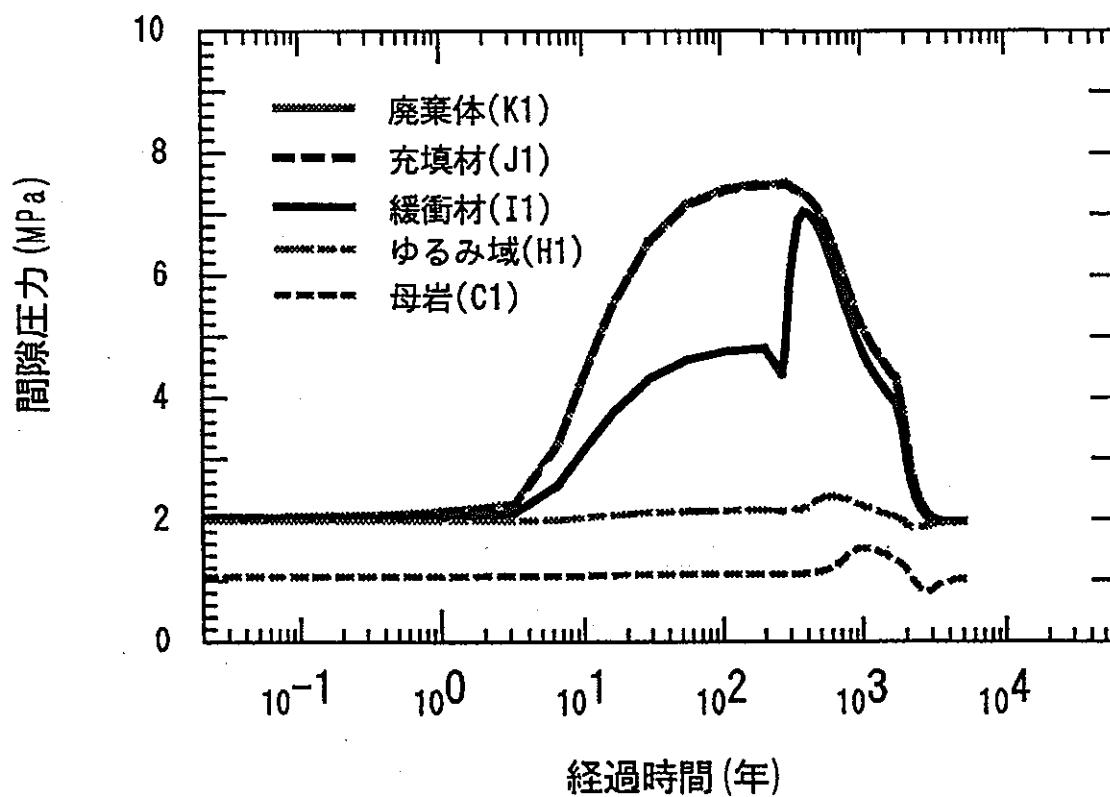


図 2-19 間隙圧力の経時変化 (ポールト case3-b)

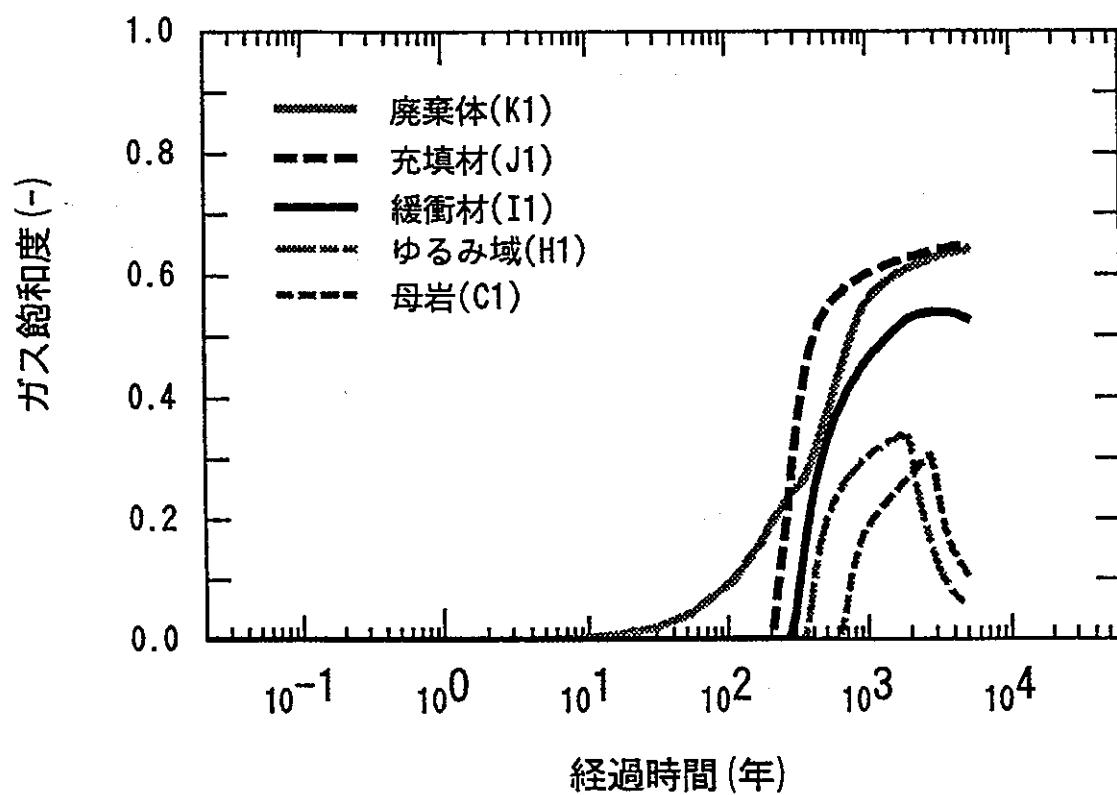


図 2-20 ガス飽和度の経時変化 (ポールト case3-b)

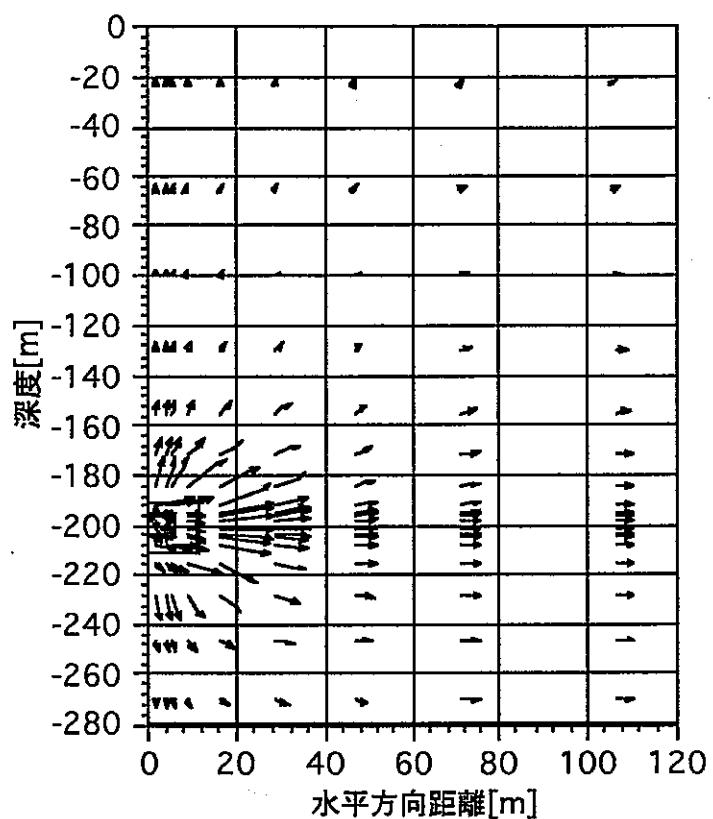


図 2-21 地下水流ベクトル（ボールトcase3-b : 320年）

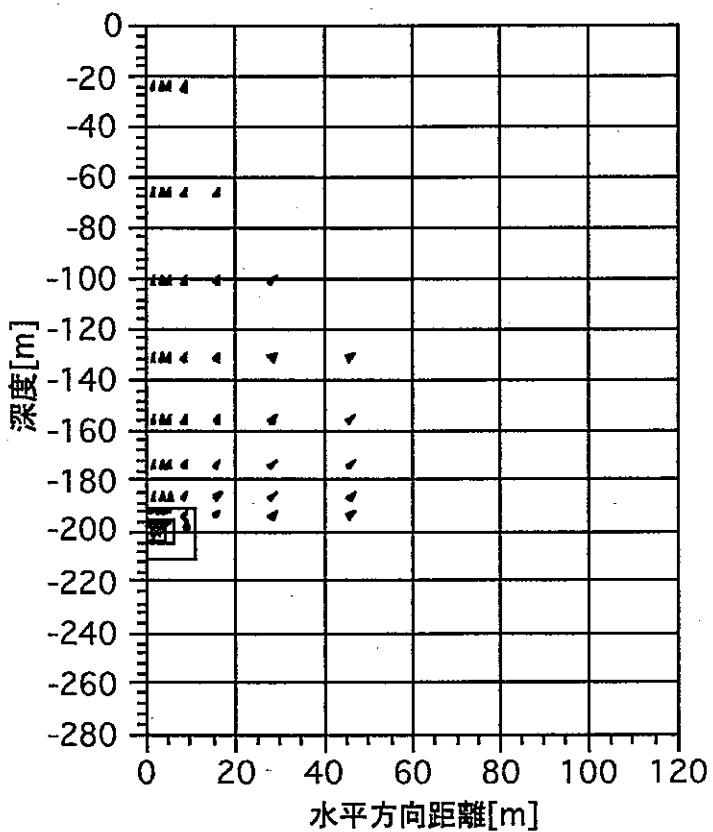


図 2-22 ガス流ベクトル（ボールトcase3-b : 900年）

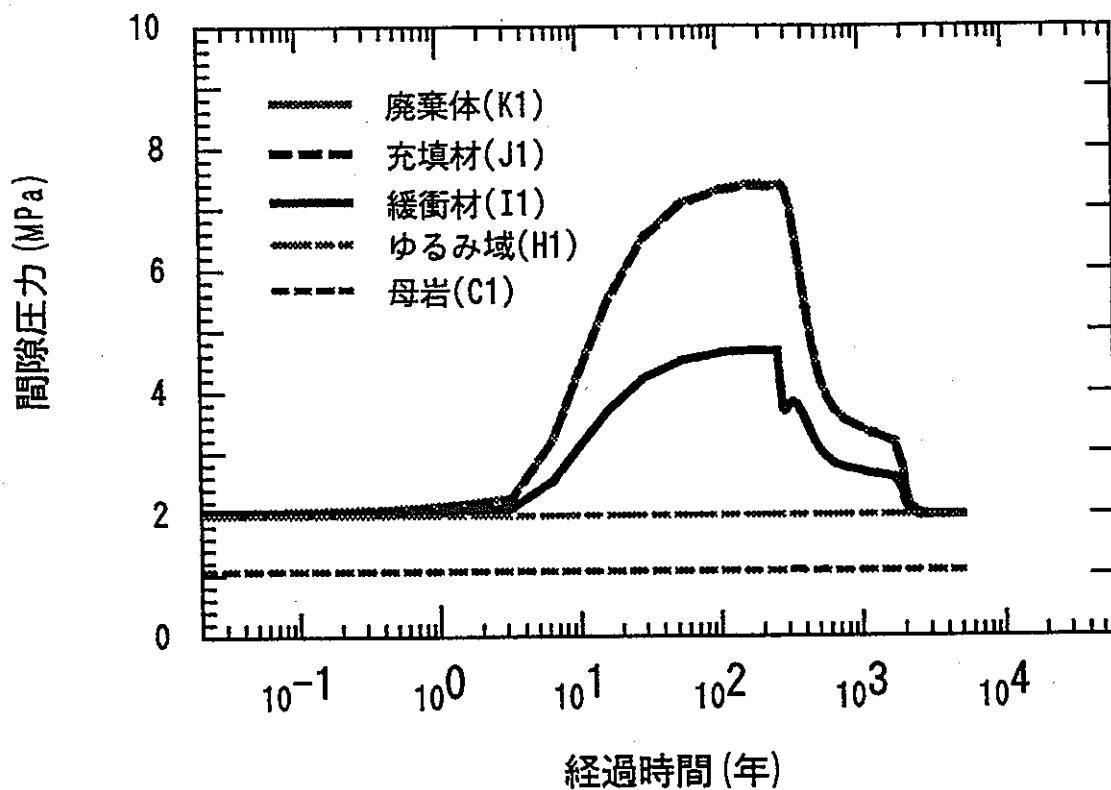


図 2-23 間隙圧力の経時変化（ボールトcase4）

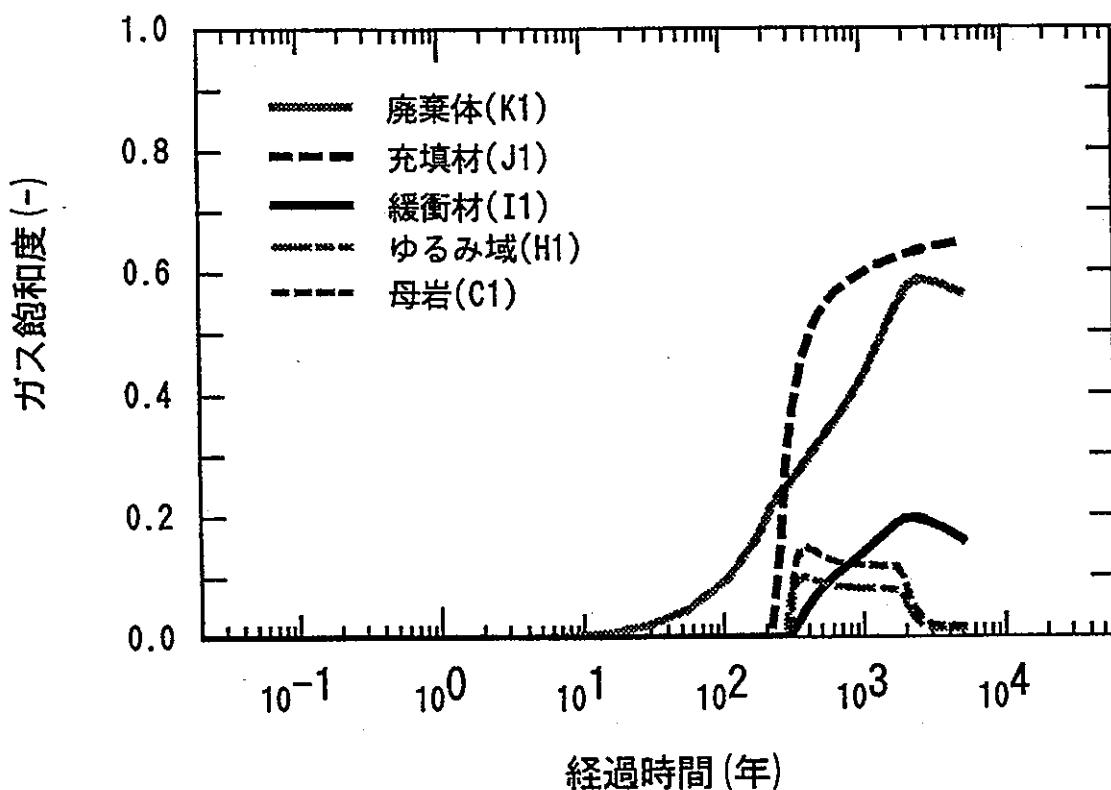


図 2-24 ガス飽和度の経時変化（ボールトcase4）

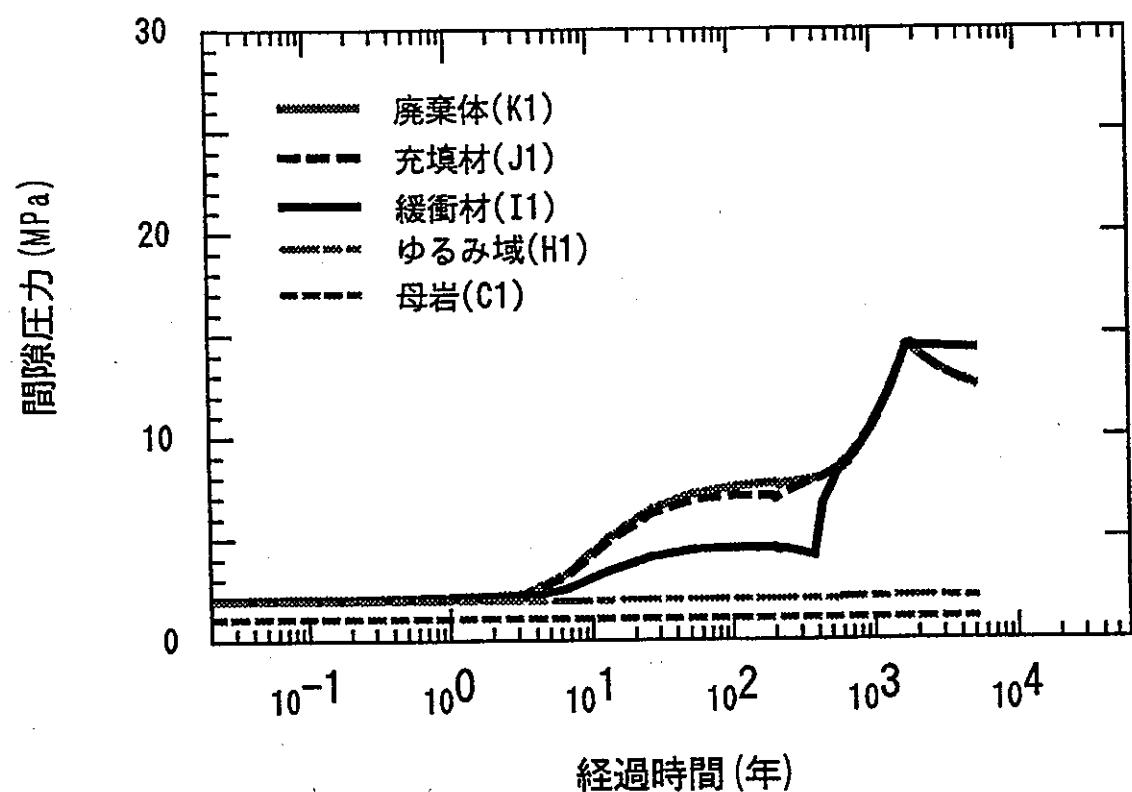


図 2-25 間隙圧力の経時変化（ボールトcase5）

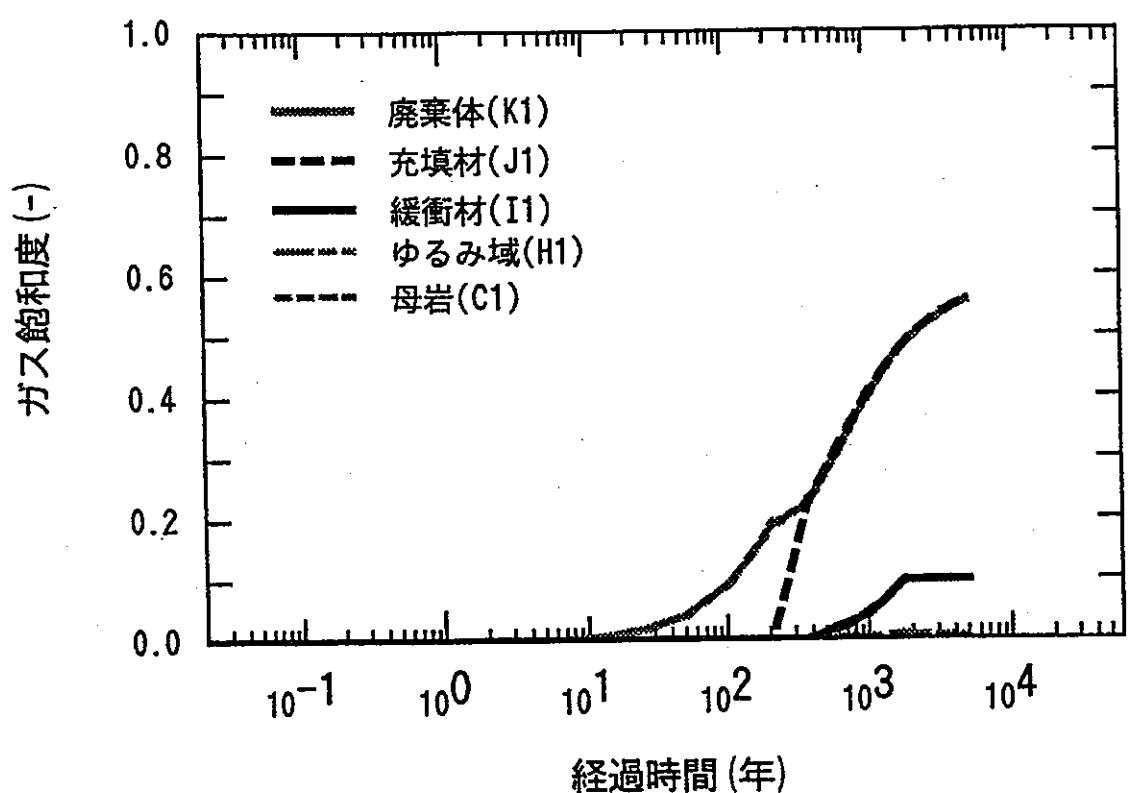


図 2-26 ガス飽和度の経時変化（ボールトcase5）

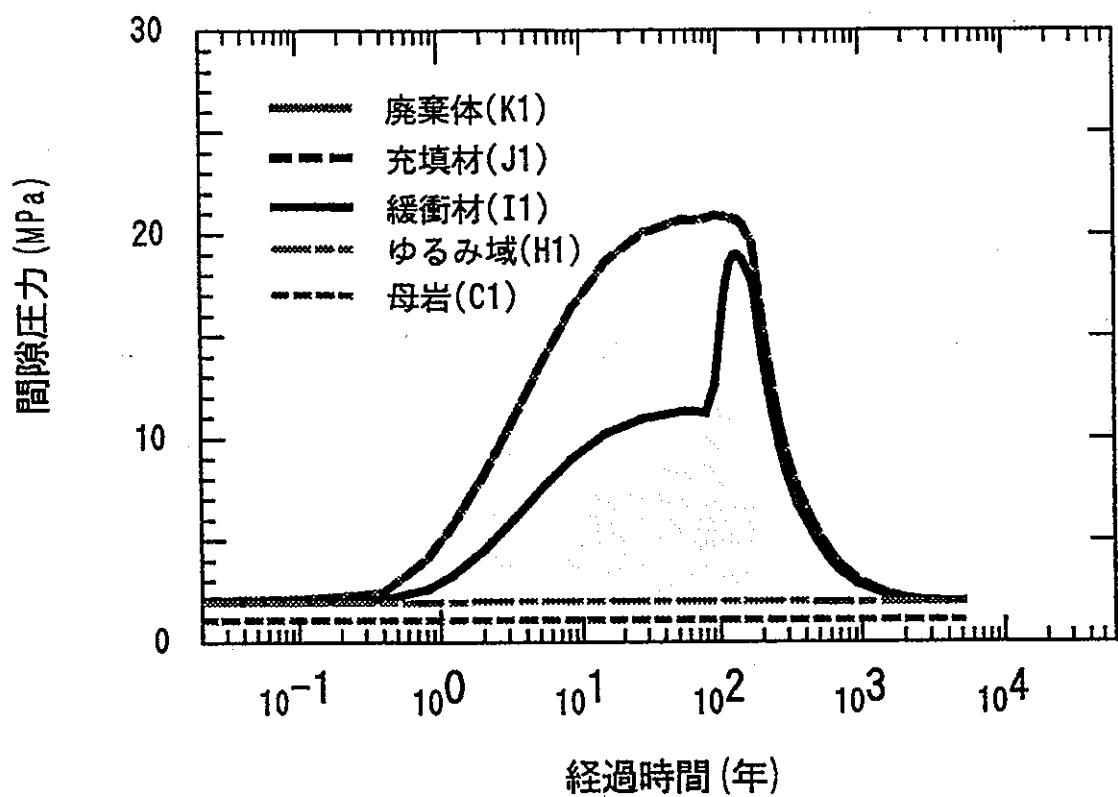


図 2-27 間隙圧力の経時変化（ボールトcase6-a）

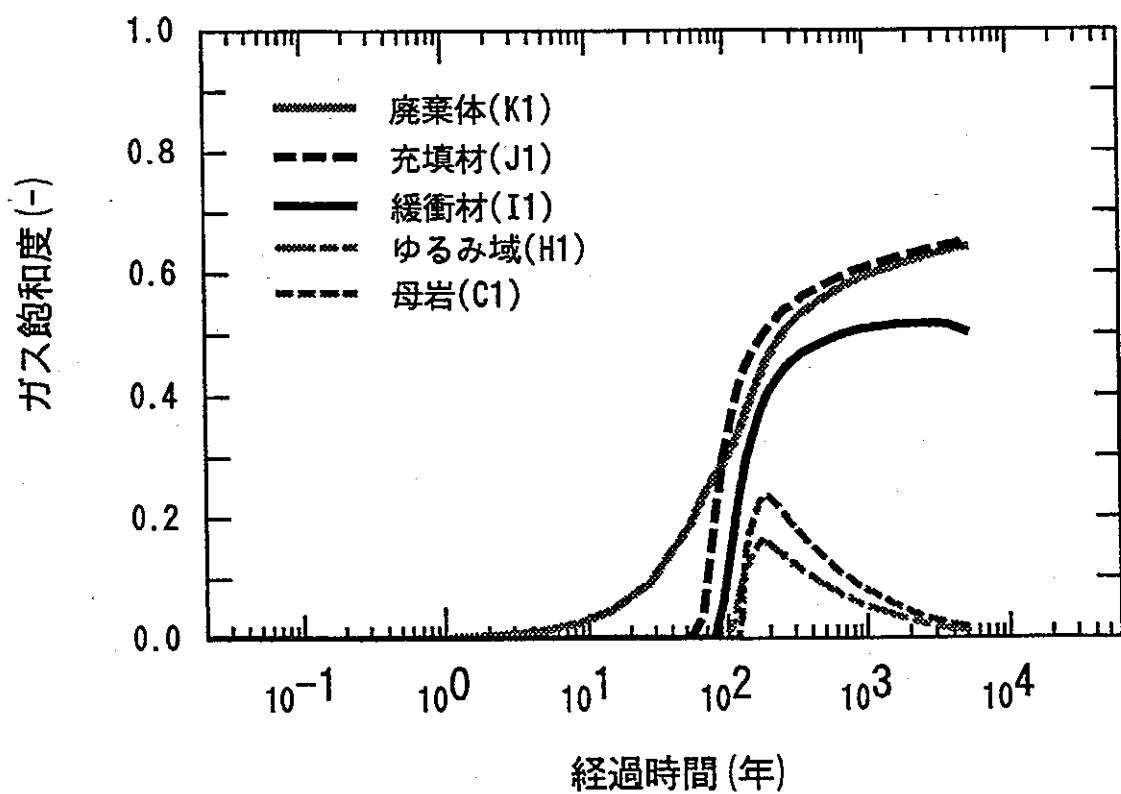


図 2-28 ガス飽和度の経時変化（ボールトcase6-a）

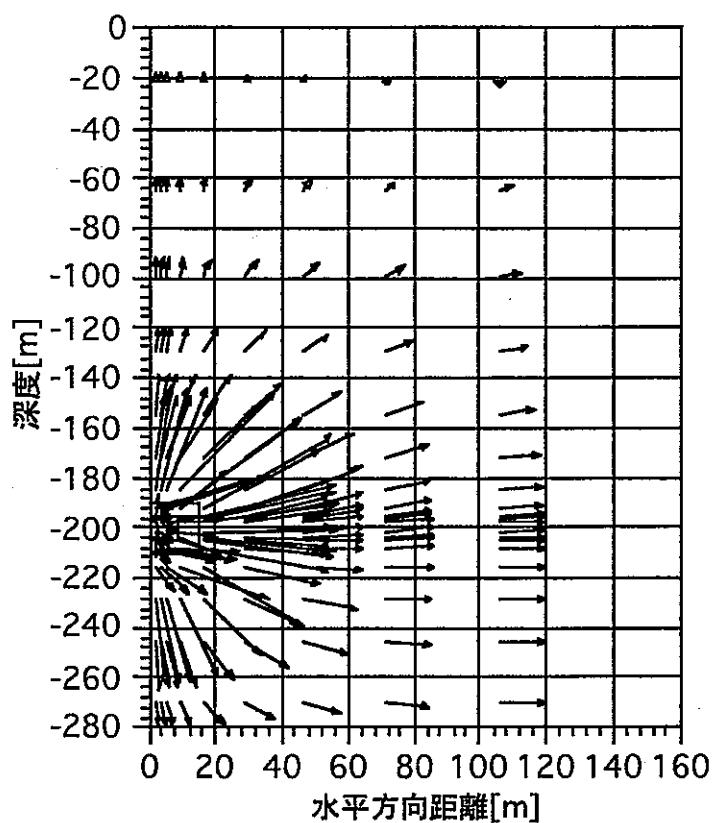


図2-29 地下水流ベクトル（ボールトcase6-a : 110年）

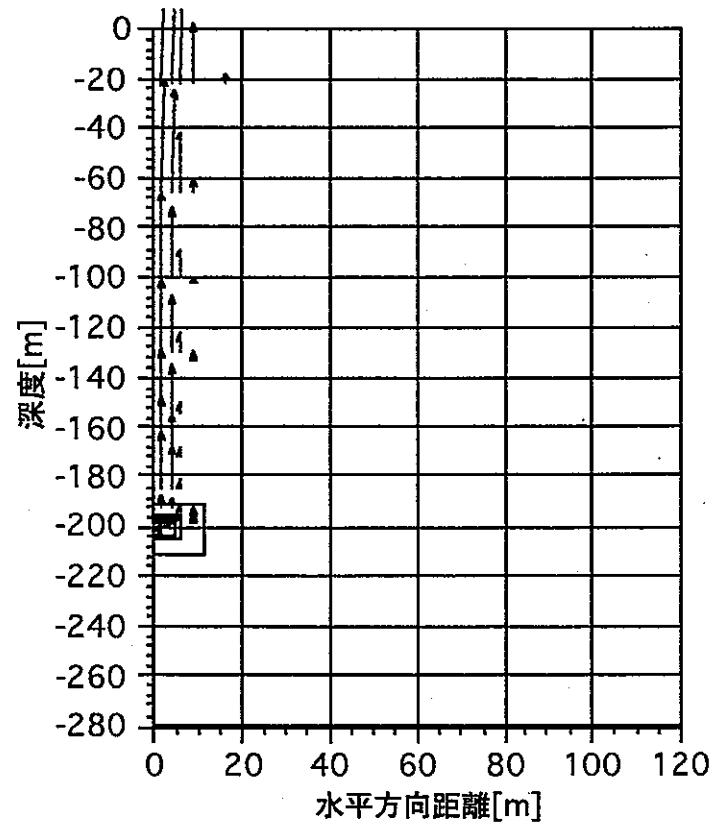


図2-30 ガス流ベクトル（ボールトcase6-a : 180年）

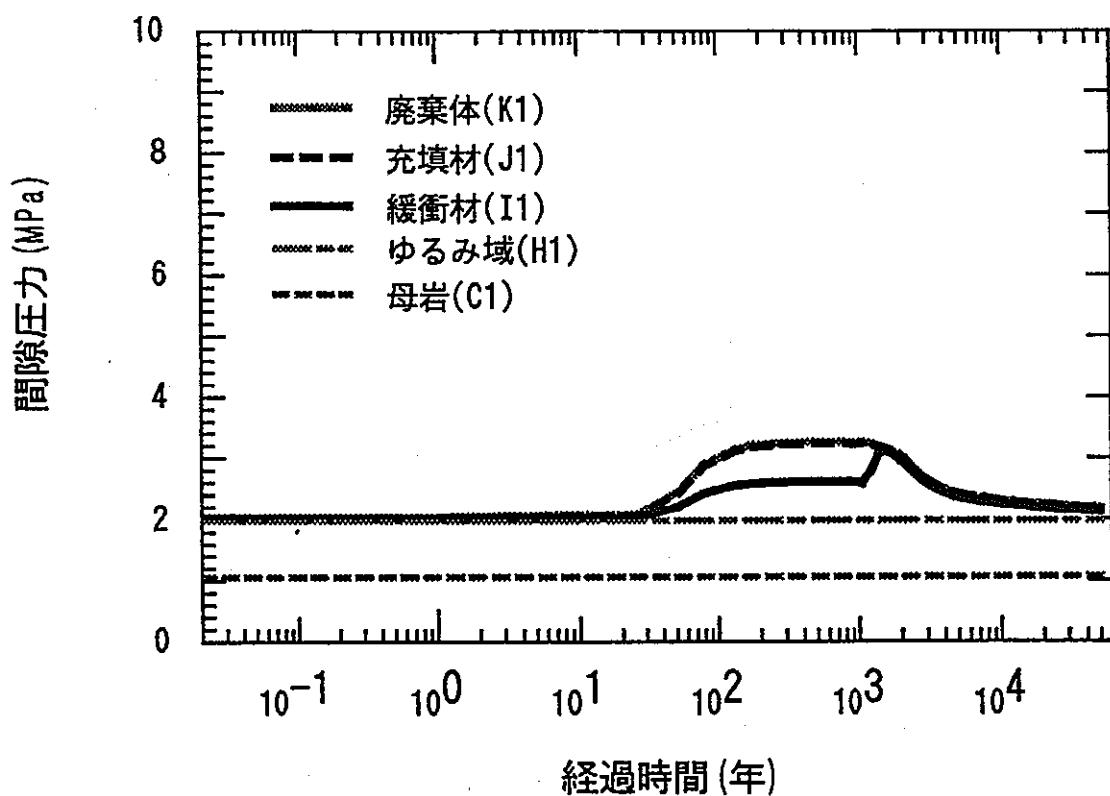


図 2-31 間隙圧力の経時変化 (ポールト case6-b)

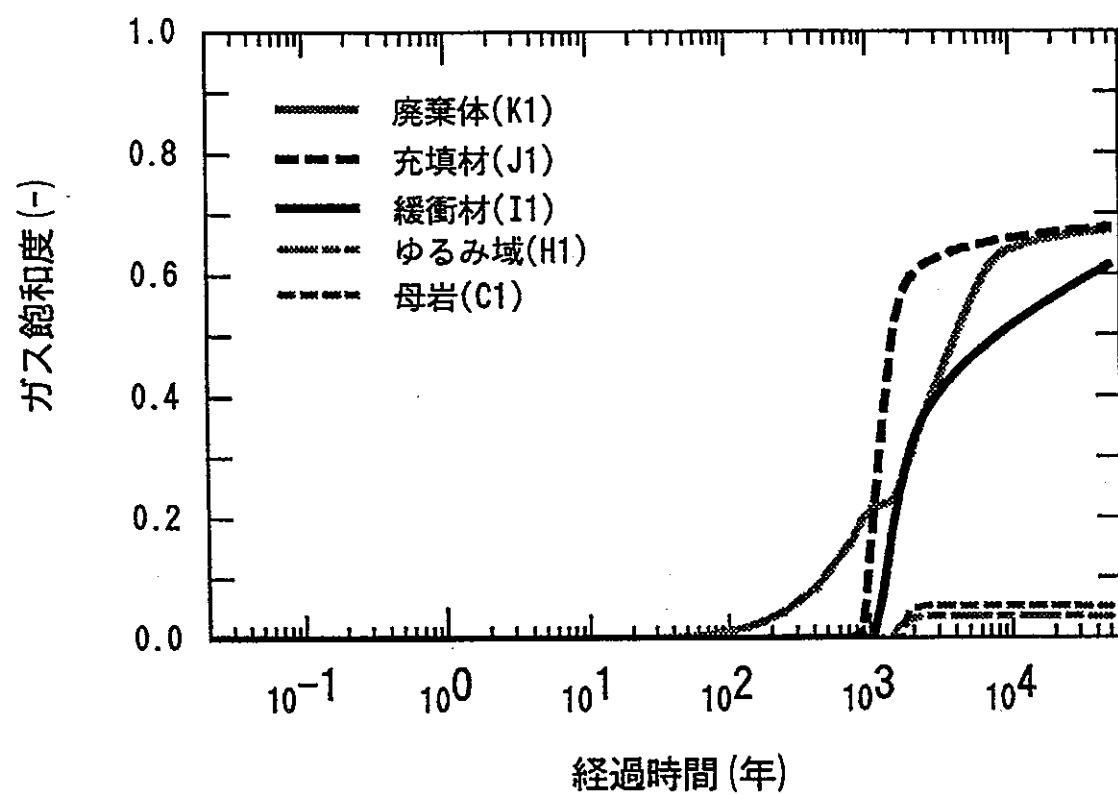


図 2-32 ガス飽和度の経時変化 (ポールト case6-b)

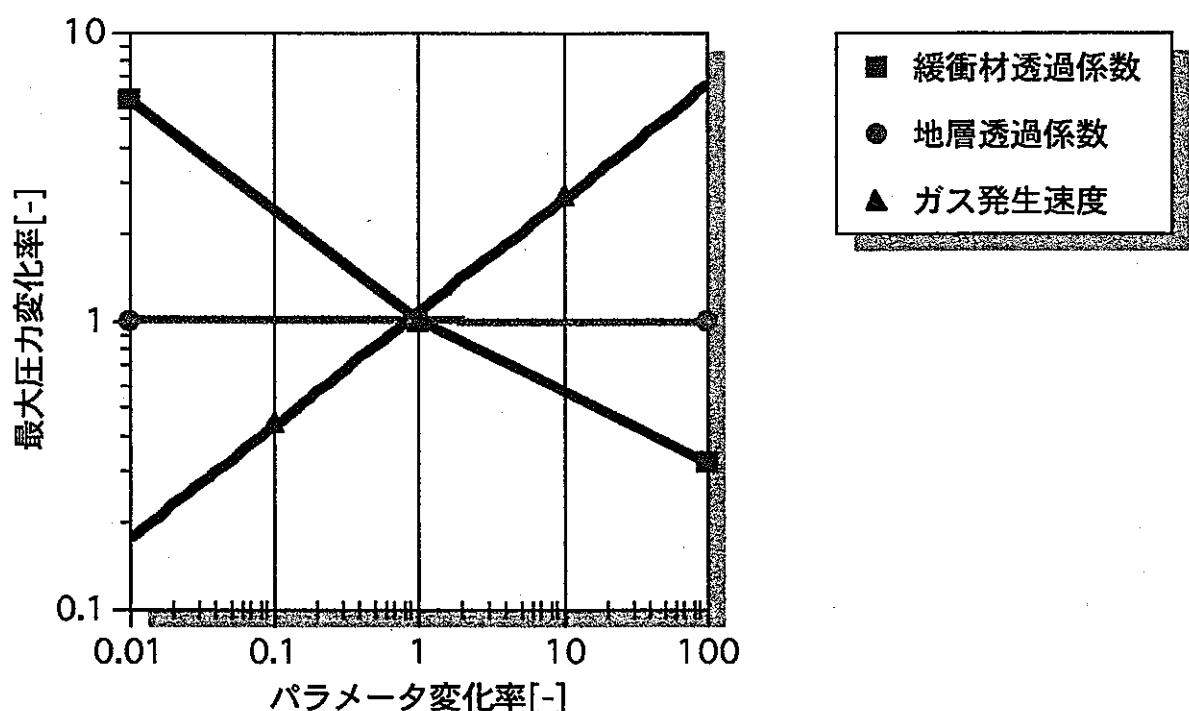


図 2-33 緩衝材間隙圧力に対する感度
(ボルト: バリア物性, ガス発生速度)

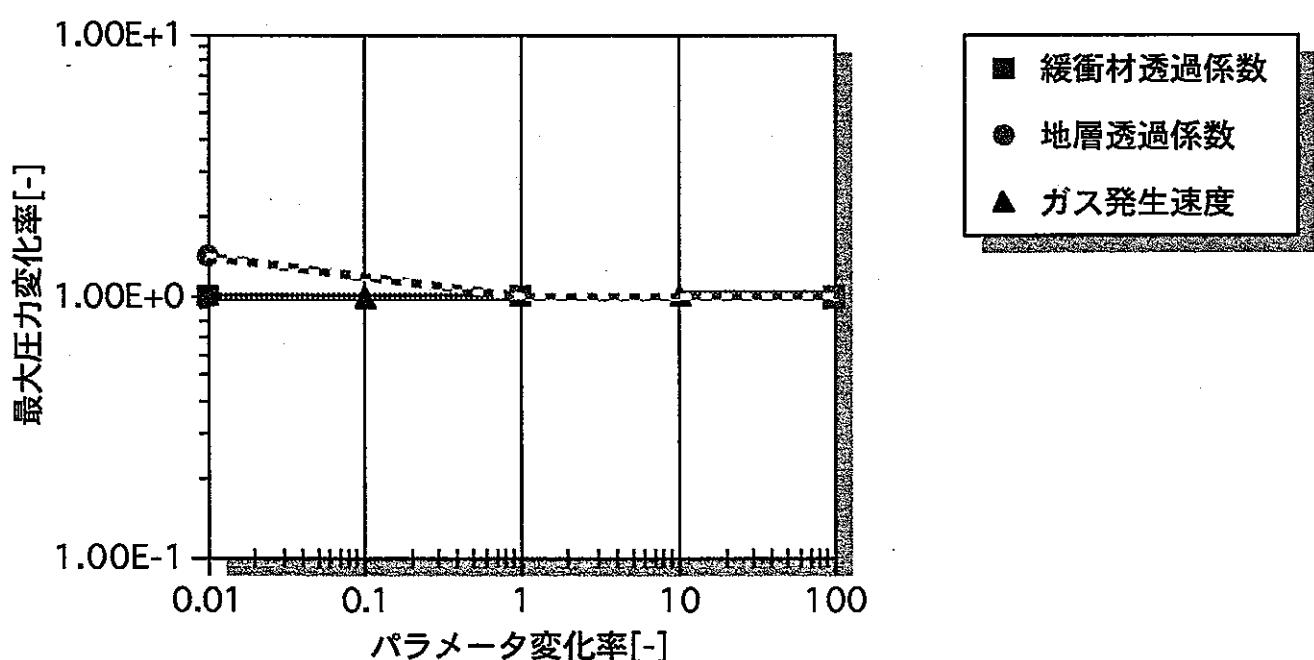


図 2-34 母岩間隙圧力に対する感度
(ボルト: バリア物性, ガス発生速度)

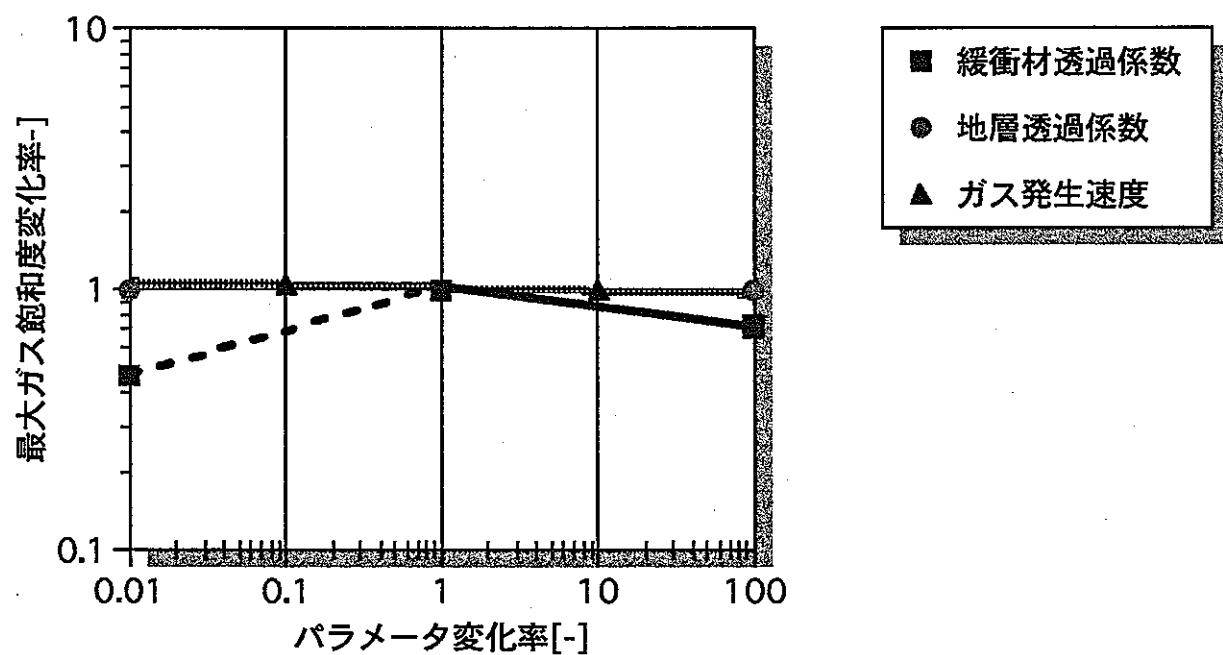


図 2-35 廃棄体ガス飽和度に対する感度
(ボールト: バリア物性, ガス発生速度)

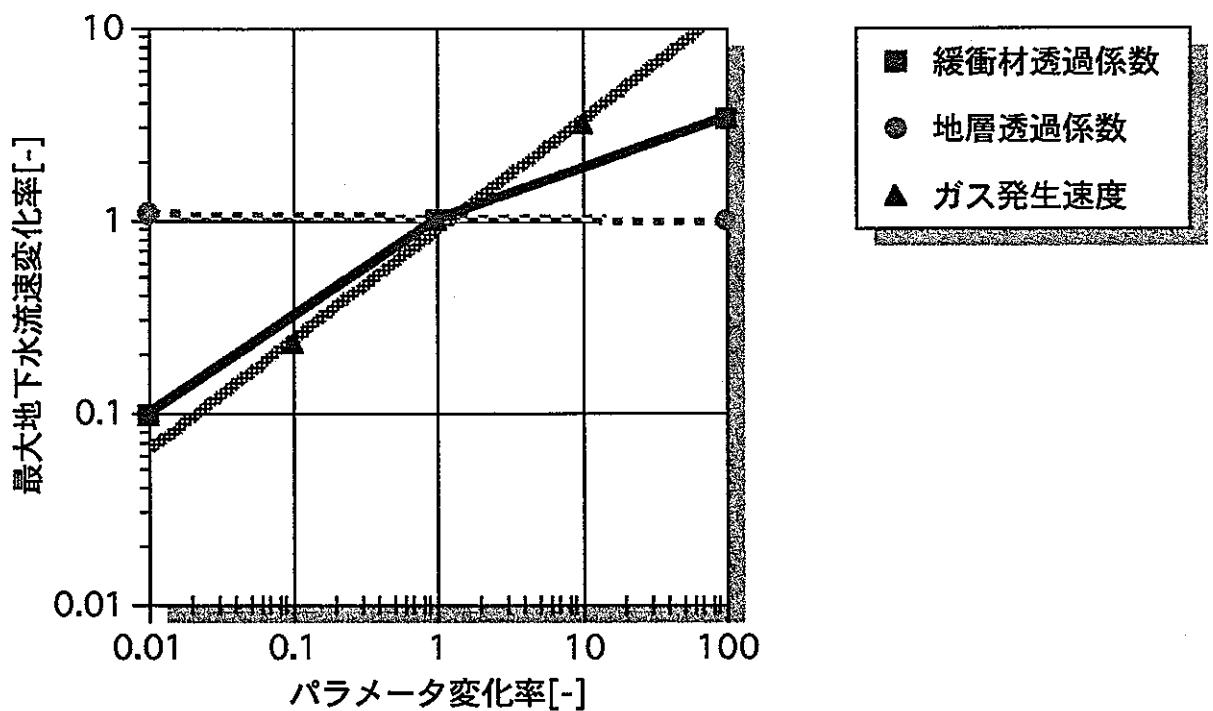


図 2-36 緩衝材間隙圧力に対する感度
(ボルト: バリア物性, ガス発生速度)

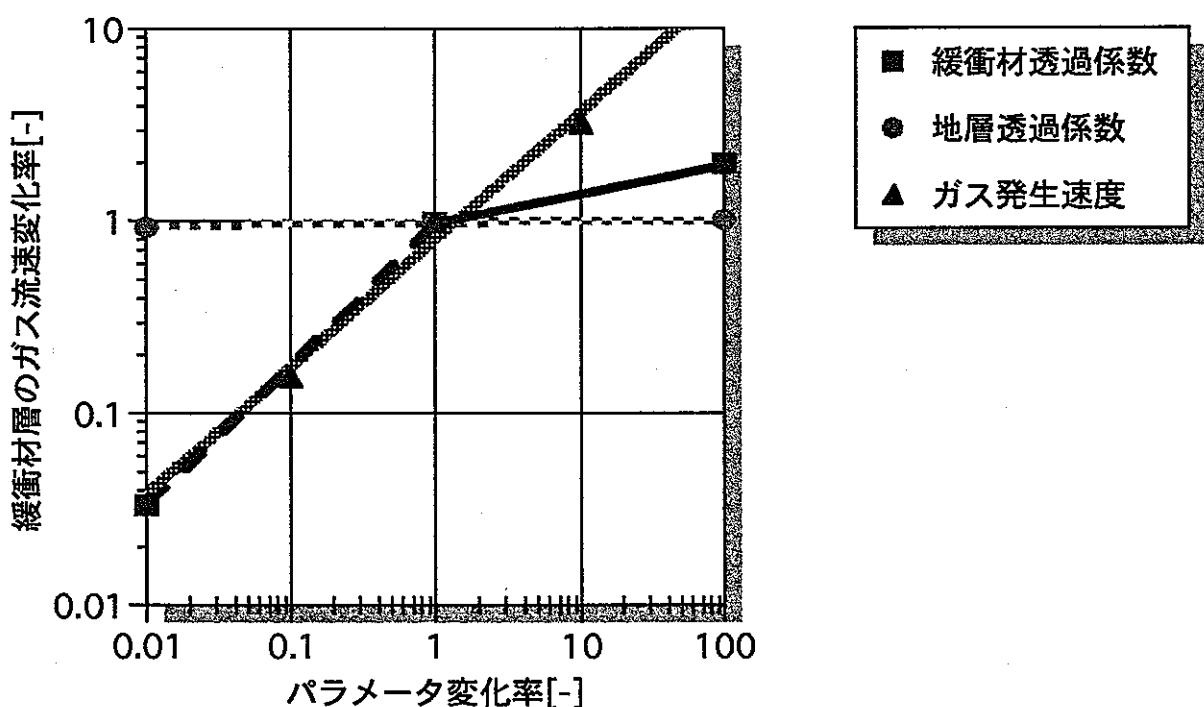


図 2-37 緩衝材ガス流速に対する感度
(ボルト: バリア物性, ガス発生速度)

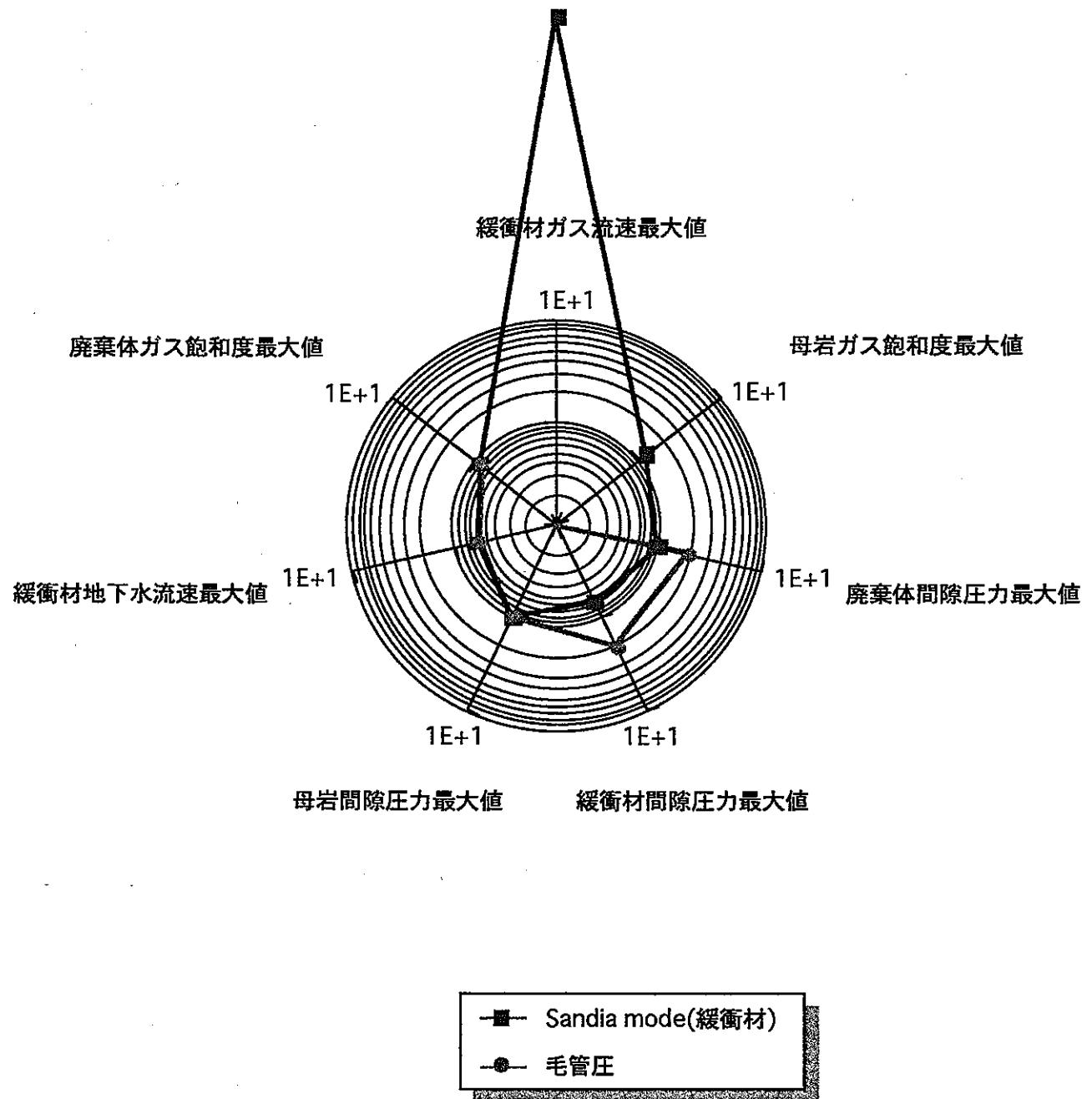


図 2-38 相対透過係数モデル、毛管圧の感度
(ポールト：核種状態量)

3 研究項目の優先順位付け及び研究工程の検討

これまで実施してきた、処分後の廃棄物からの放射性核種の浸出、移行に影響すると考えられる各種現象に対する検討を基礎として、各現象の処分の安全性に対する影響度を評価することにより、必要とされる研究項目の優先度について検討を行った。また、その結果を基に、高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発工程と時系列で関連づけながら、TRU廃棄物処分の性能評価に係わる研究開発工程について検討した。

3.1 研究項目の優先度の検討

平成4年度の研究において設定した基本シナリオに係わる各種現象に対して、諸外国を含めたこれまでの調査検討結果を基礎として、各現象の処分後の長期安全性を確保するうえでの重要度、処分の性能評価に対する影響度について定性的に評価を行い、優先的に研究を実施すべき項目を摘出した。

3.1.1 各現象に対する認識

これまでの研究開発において性能評価に影響する各種現象が、現時点でどのように理解、認識されているかを簡潔にまとめた。

(1) OECD/NEAにおける見解

OECD/NEAでは1993年に放射性廃棄物処分場の安全性に対するニアフィールドの寄与に関する3回目のワークショップを開催し、高レベル放射性廃棄物のソースターム評価に係わる概念モデル、数学モデルに焦点を当てた検討、評価を行っている。本ワークショップでは6ワーキンググループによってそれぞれの課題について討議を行い、以下のような勧告、課題の指摘がなされた。

[ワーキンググループと課題]

- i ニアフィールド環境
- ii 廃棄体からの放射性核種の放出
- iii 放射性核種の移行と遅延
- iv ソースタームモデルとコード
- v ニアフィールド性能評価と全体性能評価との統合
- vi 岩塩層処分場特有の項目

[勧告及び指摘事項]

- ① ニアフィールドの性能評価は処分研究開発、処分場設計、及びサイト特性調査へのフィードバックを考慮する。

- ドバックと示唆を与える上で重要である。
- ② 操業期間、及び廃棄体、緩衝材以外の処分場構成材料（グラウト材等）のニアフィールド環境への影響は、少なくとも半定量的には評価しておくべきである。
 - ③ 熱力学データベースは慎重に見直されるべきであり、性能評価からの指摘を考慮しつつ整備されるべきである。
 - ④ 使用済燃料の処分については、燃料中の間隙及びハードウエアからの正確な放出量と、 α 放射線分解による影響の決定が重要である。
 - ⑤ 軽水炉燃料との相異があるかも知れない、研究炉等からの特殊な燃料の処分方法についても決定する必要がある。
 - ⑥ ガラス固化体の処分については、ガラスの溶解を制限するゲル層の役割に対する研究が重要である。
 - ⑦ ガスの発生と緩衝材中のガスの移行は、どのような廃棄体パッケージの設計に対しても共通の課題である。
 - ⑧ 廃棄体の溶解によって生じるコロイドの影響は、圧密粘土バリアを設置することで移行は起こりえないと仮定すれば重要な課題ではない。
 - ⑨ 現在のソースタームモデルの不確実性、不完全性の最大の原因是、モデルの概念構築時に前提となった仮定によるものである。重要なことはこれらの明確な記述とそれらの正当化の根拠を示すことである。
 - ⑩ 長寿命のキャニスターの使用を前提とした処分概念では、部分的に破損したキャニスターのバリア特性に対するモデリングと評価が重要である。
 - ⑪ 岩塩層の処分場については、岩塩の変形とシール材の透水性が重要である。

以上の検討結果を考慮することにより、TRU廃棄物の処分に係わる研究開発項目について優先度を検討した。結果を表3-1に示す。

3.2 研究工程の検討

表3-1に示した研究開発項目のうち優先度の高い、優先度ランクAの研究開発工程を図3-1に示す。ターゲットとしては高レベル放射性廃棄物の第二次中間取り纏めが行われる、平成10年を目処とし、研究の成果は、評価モデルの構築とそれによる概略評価の実施が可能となることを目標とした。

表3-1 研究項目の優先順位

優先度	課題分類	行程分類	研究開発課題
A	固化体特性評価	核種インベントリ	<ul style="list-style-type: none"> ・測定対象核種選定 ・分析測定方法 ・非破壊測定技術 ・核種濃度確認手法
		化学的特性	<ul style="list-style-type: none"> ・構成物質の調査 ・影響物質摘出、測定方法 (コロイド、錯体、ガス、腐食、微生物)
	ニアフィールド性能評価	コンクリートの化学的緩衝作用	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝作用の機構の理解 ・評価モデル、確証試験
		ガス発生	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス発生機構の理解 ・評価モデル、確証試験 (腐食、微生物活動)
		拡散移行	<ul style="list-style-type: none"> ・緩衝材の拡散試験、影響因子 (コロイド、錯体、ガス、腐食)
		溶解度	<ul style="list-style-type: none"> ・溶解度試験（処分場環境）、影響因子 (コロイド、錯体、ガス、腐食, Eh, pH)
		吸着特性	<ul style="list-style-type: none"> ・吸着特性試験、影響因子 (コロイド、錯体、ガス、腐食, Eh, pH)
		ガスの蓄積移行	<ul style="list-style-type: none"> ・絶対透過係数測定 ・相対透過係数測定、モデル ・毛管圧モデル測定、モデル ・2相流モデル改良 (核種移行連成、不均質パス) ・ガス発生、移行対策
		特有核種対策	<ul style="list-style-type: none"> 低透水性、高吸着性バリア 低溶解度化学形処理技術

優先度	課題分類	行程分類	研究開発課題
A	ファーフィールド 性能評価	コロイド、錯体の生 成/移行 ガスの移行	<ul style="list-style-type: none"> ・生成機構モデル、影響因子 ・試験による確認 ・移行機構モデル、影響因子 ・試験による確認 ・絶対透過係数測定 ・相対透過係数測定、モデル ・毛管圧モデル測定、モデル ・2相流モデル改良 (核種移行達成、不均質パス)
B	固化体特性評価	物理的特性	<ul style="list-style-type: none"> ・評価項目、基準/規格の整備 ・測定技術
		廃棄体技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体製造技術 (高減容技術、高機能廃棄体) ・品質保証体系の整備
	シナリオ	シナリオ研究	<p>ニアフィールド地下水移行 ファーフィールド地下水移行 気体状核種移行</p>
	ニアフィールド 性能評価	熱/温度条件	<p>温度分布/勾配 熱移行物性データ取得</p>
		応力条件	<p>構造安定性への影響 ガス圧による影響</p>
		水理条件	処分施設内/近傍の地下水流动
		廃棄体からの 放射性核種の浸出	<p>長期浸出モデル 浸出試験による確認</p>
		バリア材の劣化	<ul style="list-style-type: none"> ・劣化機構と影響因子 ・劣化モデル、確認試験 ・劣化生成物特性評価

優先度	課題分類	行程分類	研究開発課題
B	ファーフィールド 性能評価	吸着特性	・吸着特性試験、影響因子 (コロイド、錯体、Eh、pH)
		コロイド、錯体の 移行	・移行機構モデル、影響因子 ・試験による確認
		総合的性能評価	・総合的性能評価手法の整備 ・総合的性能評価
	処分技術開発	人工バリア システム	・バリア材料の物性データ収集 ・人工バリアの基本概念検討 ・人工バリアの設計検討
		処分場	・設計条件データ、設計技術
		人工バリア技術	・人工バリア製作施工技術
	地質環境条件	地質環境データ (比較的浅い地層)	・岩盤力学データ ・水理地質、地下水化学データ ・地質、地質構造データ
	シナリオ ファーフィールド 性能評価	隔離性研究	・人間接近シナリオ ・自然現象の影響
		広域水理	・広域水理評価 ・不飽和帶水理
		移流分散	・地層中核種移行モデル
		建設、操業、閉鎖 技術	・処分場建設技術 ・操業技術 ・閉鎖技術 ・機能確認モニタリング技術
C	処分技術開発		

図3-1 優先度ランク"A"項目の研究開発工程

日 程 項 目	1994	1995	1996	1997	1998	1999
1. コンクリートの 化学的腐食作用 緩衝作用の機制検討 評価モデルの検討 熱力学データ収集 セメント溶解試験 解析評価						
2. ガス発生 ガス発生機構の検討 金属腐食モデル検討 熱力学データ収集 金属腐食試験 解析評価 微生物活動機制検討 微生物活動モデル検討 データ収集 微生物活動試験 解析評価						
3. ガスの蓄積、移行 移行モデルの検討 データ収集 不飽和透過程性試験 毛管圧特性試験 2相流パラメータの評価 解析手法の整備 解析評価						
4. コロイドの生成移行 コロイドの生成機構検討 データ収集 コロイド生成試験 評価手法の整備 コロイドの移行機構検討 データ収集 コロイド移行試験 評価手法の整備 解析評価						
5. ガスの移行 (ワーフィールド) 移行モデルの検討 データ収集 不飽和透過程性試験 毛管圧特性試験 2相流パラメータの評価 解析手法の整備 解析評価						
6. 溶解度 処分環境の検討 主要化学形の溶解度試験 影響因子の評価 熱力学データの整備						
7. 批散移行 処分環境の検討 透水性試験 核種拡散試験 影響因子の評価						