

TRU廃棄物処分システムの 性 能 評 價 手 法 の 檢 討

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

概 要

技 術 資 料		
開示区分	レポートNo.	受 領 日
Z	ZJ1277 93-002	1994, 2, 7
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です <small>動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室</small>		

1993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

TRU廃棄物処分システムの性能評価手法の検討

藤田 義夫*
山本 幹彦*
寺村 政浩*
佐原 聰*

要 旨

今後の民間再処理施設等の運転に伴い、長寿命 α 核種等を含むTRU廃棄物の発生量の増大が予測されており、原子力委員会においても処分方策の早急な確立を求める報告がなされている。

TRU廃棄物の処分方法を具体化する上では処分による長期安全性の評価が不可欠であり、そのためには放射性核種の移行に係る種々の想定される事象を詳細に記述する性能評価モデルを作成し、そのモデルの妥当性を確認することが必要となる。

本研究は上記の考え方に基づき、TRU廃棄物の処分システムに対する総合的性能評価手法の構築を目的として、種々の調査、検討を実施するものである。このうち平成4年度は以下の調査検討を実施した。

- (1) TRU廃棄物処分システムの性能評価シナリオの開発
- (2) TRU廃棄物処分固有の現象の評価手法の詳細検討
- (3) 予備的性能評価試算
- (4) 全体性能評価手法の開発検討及び研究課題の抽出

本調査検討を通じ、TRU廃棄物の特性、及び高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発成果の取込みを考慮しつつ、TRU廃棄物処分の性能評価に対する基本シナリオを抽出すると共に、対応する個別モデルの現状調査と代表的モデルによる試算を実施した。また、全体性能評価手法構築のために実施すべき研究項目を明らかにした。

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成果である。

契約番号：040D0183

事業団担当部課室及び担当者：東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室
増田 純男

* 原子力・電力事業本部 調査開発部

COMMERCIAL PROPRIETARY
PNC ZJ1277 93-002
February, 1993

Performance Assessment Method for Transuranic Waste
Isolation System And It's Research and Development Plan

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

A b s t r a c t

It is expected to accumulate large quantity of transuranic wastes (and long lived β/γ , low level radioactive wastes). In the circumstances, Atomic Energy Committee recommended that it is necessary to present applicable technology for isolating transuranic waste till 2000.

The long term safety of isolation technology must be convincingly assessed prior to its application. Therefore models which can predict release and migration of radionuclides with adequate accuracy need to be developed and validated. In this investigation, the purpose of which is to identify principal phenomena for performance assessment and to integrate simplified system models for overall safety assessment.

In 1993 four subjects listed below were investigated.

- (1) Scenario development for Performance assessment of TRU waste isolation.
- (2) Investigation of assessment methods for important phenomena of TRU waste isolation.

Based on these investigations, Basic scenario which involve important phenomena for migration of radionuclides from transuranic waste to biosphere were identified and the influence of gas generation was estimated preliminarily.

Also the important item that need to research and develop were selected and the framework of R&D plan was reviewed.

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

PNC Liaison : Waste Technology Development Division

Sumio Masuda

* Nuclear and Electric Power Div. Research and Development Dept.

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ところである。

低レベル放射性廃棄物の処分に対しては法整備、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、現在国において技術開発計画、法制、費用確保方策等について検討が行われている。このうち技術開発に関しては重点的な開発項目とその進め方が明らかにされたところである。

一方、TRU核種を含む放射性廃棄物に対しては、先の原子力開発利用長期計画において、“適切な区分とその区分に応じた合理的な処分方策を確立する”とされており、今後処理処分方策が策定される段階にある。

原子力委員会では上記方針に従い、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を実施し、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フランス、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、性能評価上重要な現象とそれらの相互関係を見直すことにより、性能評価対象とすべき基本シナリオを選定すると共に、主要な現象に対する評価手法の調査検討を継続した。また、これらの諸現象のうち、代表的なものとしてガス発生による影響を予備的に評価した。さらに、総合的安全評価手法について検討し、その確立を目的とした研究開発計画に対し、見直しを行った。

目 次

1. T R U廃棄物処分システムの性能評価シナリオの開発	1
1.1 T R U廃棄物と処分概念の見直し	1
1.2 シナリオの予備選定	4
2. T R U廃棄物処分固有の現象の評価手法の詳細検討	11
2.1 ガスの発生とバリア内での移行	11
2.2 コロイドの影響、及びセメントの化学的緩衝作用	13
3. 予備的性能評価	23
3.1 評価コードの選定	23
3.2 試算条件の設定	23
3.3 試算結果	28
4. 全体性能評価手法の開発検討及び研究開発課題の抽出	37
4.1 総合的性能評価手法の検討	37
4.2 研究開発課題の抽出と開発工程の検討	43

1. T R U 廃棄物処分システムの性能評価シナリオの開発

本章では既に摘出されている性能評価に係るインフルエンスダイアグラムを基に、個別現象の見直しを図ると共に、特に評価上重要と考えられる「基本シナリオ」の選定を行った。

1.1 T R U 廃棄物と処分概念の見直し

平成 3 年度において摘出、整理した処分対象廃棄物、及び処分概念に対し、別途実施された「T R U 廃棄物の特性を考慮した人工バリアシステムの検討」（以下、人工バリアシステムの検討）の研究成果、新たな知見を反映すべき点について検討した。

1.1.1 廃棄物特性の整理

調査対象とした廃棄物発生源は、既に現時点で廃棄物が発生している動燃事業団の東海再処理工場、M O X 燃料加工施設、及び海外再処理委託先である C O G E M A 及び B N F L の処理工場、今後運転が予定されている民間再処理工場等とした。

検討の結果「人工バリアシステムの検討」と同一の対象廃棄物、廃棄体特性を想定していることが確認され、また、平成 4 年度において新規の処理技術開発の進展、及び既存の廃棄物の特性データの取得の上で、これまでの調査結果を変更すべき実績が得られていないことから、本研究で考慮する対象廃棄物及びそれらの構成物質としては表1-1に示す範囲とする。

1.1.2 処分概念の見直し

本項では、後節において実施する性能評価の対象とすべき諸現象の摘出と基本シナリオの選定、及び予備的性能評価試算で評価対象とする処分概念を設定した。

(1) 処分施設形態

諸外国における処分概念の調査結果より、以下のことが明らかとなっている。

- ・廃棄物の多くが非発熱性であり、発熱による処分密度の制約を考慮する必要性の少ないとから、充填効率の高い処分ユニットを採用している。
- ・これらは大きく円筒型構成物としてのサイロタイプ、大断面坑道としてのボルト（岩洞）タイプの 2 種類に整理できる。

平成 3 年度の「人工バリアシステムの検討」においては具体的な処分場の施設形態に踏込んだ検討は行われていない。また、諸外国における処分概念の検討においても、廃棄体処分エリアへのアクセス方法等に変更が見られた他は、処分施設形状に新たな提案はなされていない。したがって、ここでは昨年度の検討結果を踏襲し、

表1-1 主要処分対象物質

分類	種類	物質／構造	発生源	特徴／備考
有機物	天然(類似)物質	セルロース、弾性ゴム	返還雑固体	・微生物の活動源となり、ガス、劣化生成物を生成する可能性がある
		活性炭	PNC 化学スラッジ	・同上
		アスファルト	アスファルト固化体	・同上 ・吸着特性への影響
	合成高分子化合物	塩化ビニル等ビニル類	返還雑固体	・微生物の活動源となり、ガス、劣化生成物を生成する可能性がある
		ポリエチレン、エポキシ等 合成樹脂類	同上 PNC 廃溶媒固化体	・同上
	低分子化合物	TBP、ドデカン	PNC 廃溶媒固化体	・同上
	ケイ酸塩	セメント	各種セメント固化体、 雑固体、構造物、 充填材	・天然に広く多量に存在し、 造岩鉱物として地殻の主成分 ・一般にアルカリ塩以外は水に難溶
		(組成、構造不明)	水熱固化体	
		(同上)	焼却灰溶融固化体	
		ホウケイ酸ガラス	雑固体、ガラス固化 体、バーナブルポイ ズン	
		ケイ酸カルシウム	雑固体(断熱材)	
		(銀交換)ゼオライト	廃ヨウ素吸着材	
無機物	酸化物	Al ₂ O ₃ 、SiO ₂ 、Fe ₂ O ₃ 等金属酸化物 Mo、Ru、Zr、Co等FP、CP酸化 物	焼却灰 返還遠心分離ケーキ MEBクラッド	
	プロセス添加剤 (及び中和塩)	NaNO ₃ 、NaNO ₂ 、Na ₃ PO ₄ Na ₂ HPO ₄ 等中和塩類	返還化学処理スラッジ 濃縮廃液固化体 廃溶媒核種除去	・水に可溶性 ・微生物の活動源となり地球化学的 条件に影響を及ぼす可能性 ・核種の溶解度、吸着特性に影響す る可能性
		CaCO ₃ 、BaCO ₃ 、BaSO ₄ 、 Fe(OH) ₃ La(NO ₃) ₃ 等 凝沈剤	返還化学処理スラッジ PNC 化学スラッジ 廃溶媒核種除去 濃縮廃液核種除去	・水に難溶性
	金属	マグノックス、ジルカロイ、 ステンレス鋼、インコネル等 規格合金	マグノックススワーフ ハル・エンドピース チャンネルボックス バーナブルポイズン	・各合金組成により腐食性が異なる ・異種合金の接触による腐食特性の 変化
		Fe、Cr、Ni、Cu、Zr、等 合金	金属溶融固化体 雑固体 ハル・エンドピース チャンネルボックス バーナブルポイズン	・合金組成により腐食性が異なる

以後の検討においてもサイロタイプ、及びボールト（岩洞）タイプの処分施設形態を対象として検討を行うこととした。

(2) 人工バリア構成

別途研究が実施されている「人工バリアシステムの検討」においても、人工バリアの構成材料について水理的バリアとしてベントナイトが、化学的バリアとしてはセメントと陽イオン吸着材として作用する粘土物質が、また、物理的強度を期待する物理的バリアとしてセメントが予備的に選定されているが、これらは昨年度の「評価手法の検討」で抽出されたバリア材料に含まれているものである。

以上より、本年度においても昨年度設定した人工バリア構成、及び適用材料を対象として性能評価シナリオ等の検討を行うものとした。

なお、性能評価試算対象とする処分施設に対する人工バリアの組合せ、及び各バリアに評価上期待する機能の詳細については、定まった設計が存在しないことから、性能評価試算の前提条件として別途設定を行うものとする。

(3) 処分深度

諸外国の実績、候補概念、及びアメリカの10CFR60、フランスのGoguel報告に代表される安全確保上の基本的考え方に関する調査結果を参考とし、シナリオ解析をはじめとする各種検討の前提条件に目安を与えるため、超長期間の人間による偶発的侵入を回避する観点から昨年度と同様に100m以上の深さを想定するものとした。

以上をまとめ、本年度の検討の基礎とする処分概念を表1-2に示した。

表1-2 TRU廃棄物処分概念

処分施設概念	
大断面空洞への 処分	岩洞（ボルト）タイプ
	サイロタイプ
人工バリア構成	
廃棄物 パッケージ	各種廃棄物形態 金属, 金属酸化物, 中和塩類, 硅酸塩, 合成高分子化合物, その他有機物
	固化媒体 セメント, アスファルト, プラスチック, etc.
	容器 金属, セメント
	廃棄体コンテナ 金属, セメント
緩衝材, (充填材)	ベントナイト, 硅砂等
	コンクリート, 破碎岩等
構造物	コンクリート, 鉄筋
処分深度	
最小深度	100mより深い地層（超長期間の人間の偶発的侵入等を考慮）

1.2 シナリオの予備選定

TRU廃棄物処分の性能評価対象とすべき各種の現象について、人工バリアの諸特性に対する評価結果を反映して見直しを行うと共に、各現象間の関係を再構成した。さらに、これを基礎として処分の安全性を評価する上で比較的重要と考えられる現象と各現象間の関連を摘出し、これを基本シナリオとして予備的に選定を行った。

1.2.1 移行シナリオに係る現象の再構成

本年度は平成4年度に検討した個別現象間の相互作用に対し、「人工バリアシステムの検討」において得られた成果を反映し、評価対象とすべき個別の現象とそれらの相互関係を見直すと共に、インフルエンスダイアグラムの再構成を行った。

(1) 「人工バリアシステムの検討」において得られた知見による見直し

平成3年度に実施された「人工バリアシステムの検討」においては、人工バリアの特性に影響を及ぼす幾つかの現象について検討し、以下に示す示唆を与えている。
モンモリロナイトのイライト化；

処分場で予測されるpH領域での反応の活性化エネルギー、頻度因子より、本機構による変質は考慮する必要がない。

したがって本現象は昨年度選定されたFEP's (Features, Events, Processes)に含まれる評価対象から除くものとした。

(2) その他の見直し

(i) セメント／コンクリートの物理的特性変化

昨年度の検討ではセメントの成分溶出、鉄筋の腐食生成物及びエトリンガイトの生成による亀裂の発生、あるいは中性化によって生じるCaCO₃の析出を原因とするセメント間隙の閉塞を考慮し、これらによるセメント／コンクリートの透水性の変化を評価対象としていた。これらの現象について、本年度は透水性との関係を定量化することが少なくとも現時点では現実的ではないと考えることから、評価対象FEP'sから除くこととした。

(ii) 気体状放射性核種の移行

微生物活動あるいは金属の腐食、放射線分解によって生じるH₂、CO₂、CH₄等のガスの中にC-14等の放射性核種が含まれることが予測され、これらが固相との化学的相互作用を受けず、気泡として地層中を急速に移行することも考えられる。したがって、ガスの発生量及び移行速度、あるいは気／液／固相中の放射性核種の分配等について検討する必要があるものと考え、検討対象に含めるものとした。

(iii) FEP's間相互関係の表示方法

本年度は各プロセス間に特性変化で生じるパラメータを明示することにより、現象の特定化を進め、開発対象モデルの機能との対応を把握し易いものとした。

これら選定されたFEP'sの関係をインフルエンスダイアグラムとして図式化したものを図1-1に示した。

1.2.2 基本シナリオの予備選定

ここでは、定性的に重要度の高いと考えられる現象を予備的に抽出し、基本シナリオとして設定した。なお、ここに示すシナリオは現時点における知見を基礎としたものであり、今後の研究の進展に従いさらに各分野の専門家の意見、あるいは予備的検討、評価によって繰返し見直し、絞り込みを行って行くべきものである。

選定された基本シナリオを図1-2に示す。

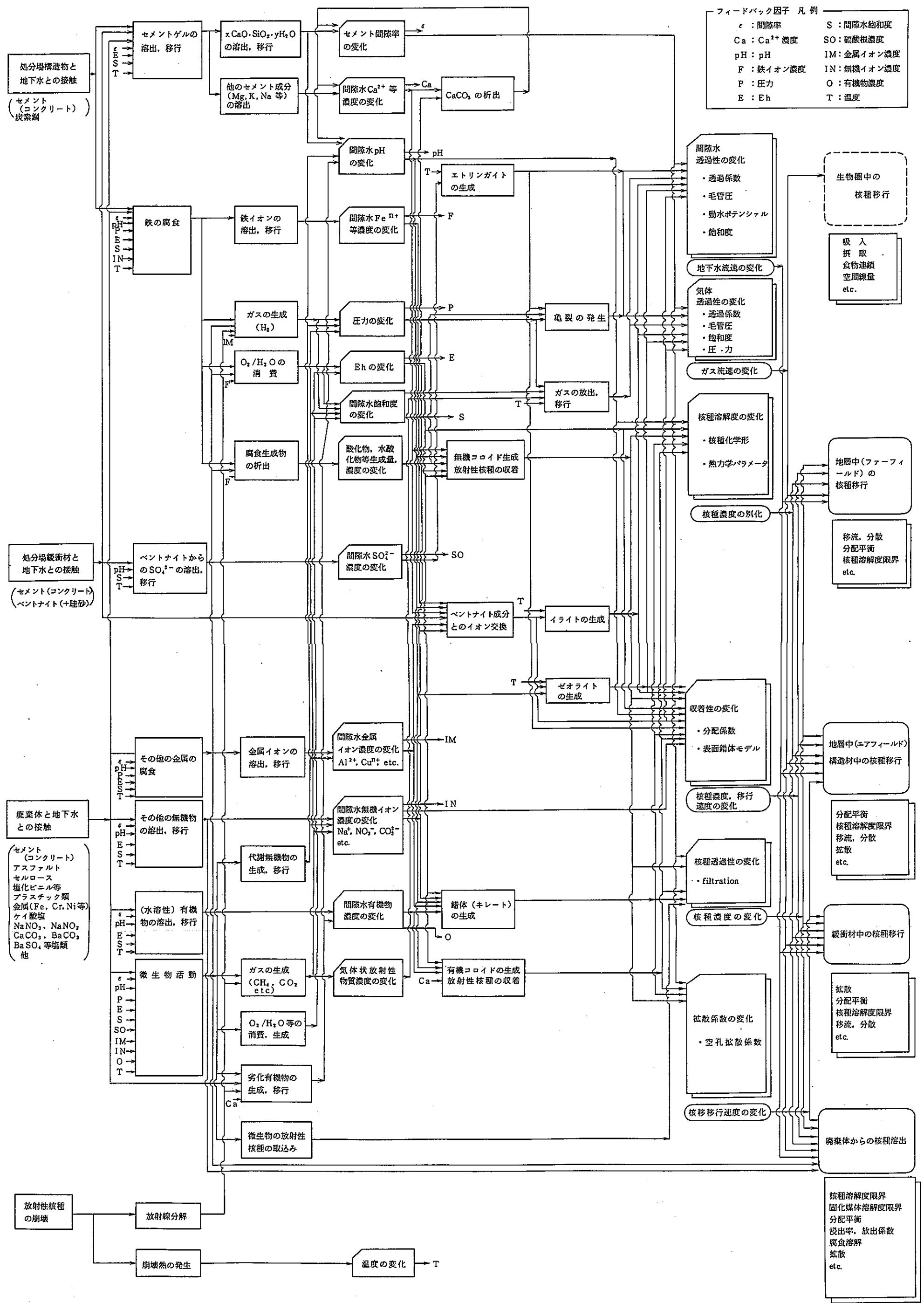


図1-1 TRU廃棄物処分に係る現象とその相互関係

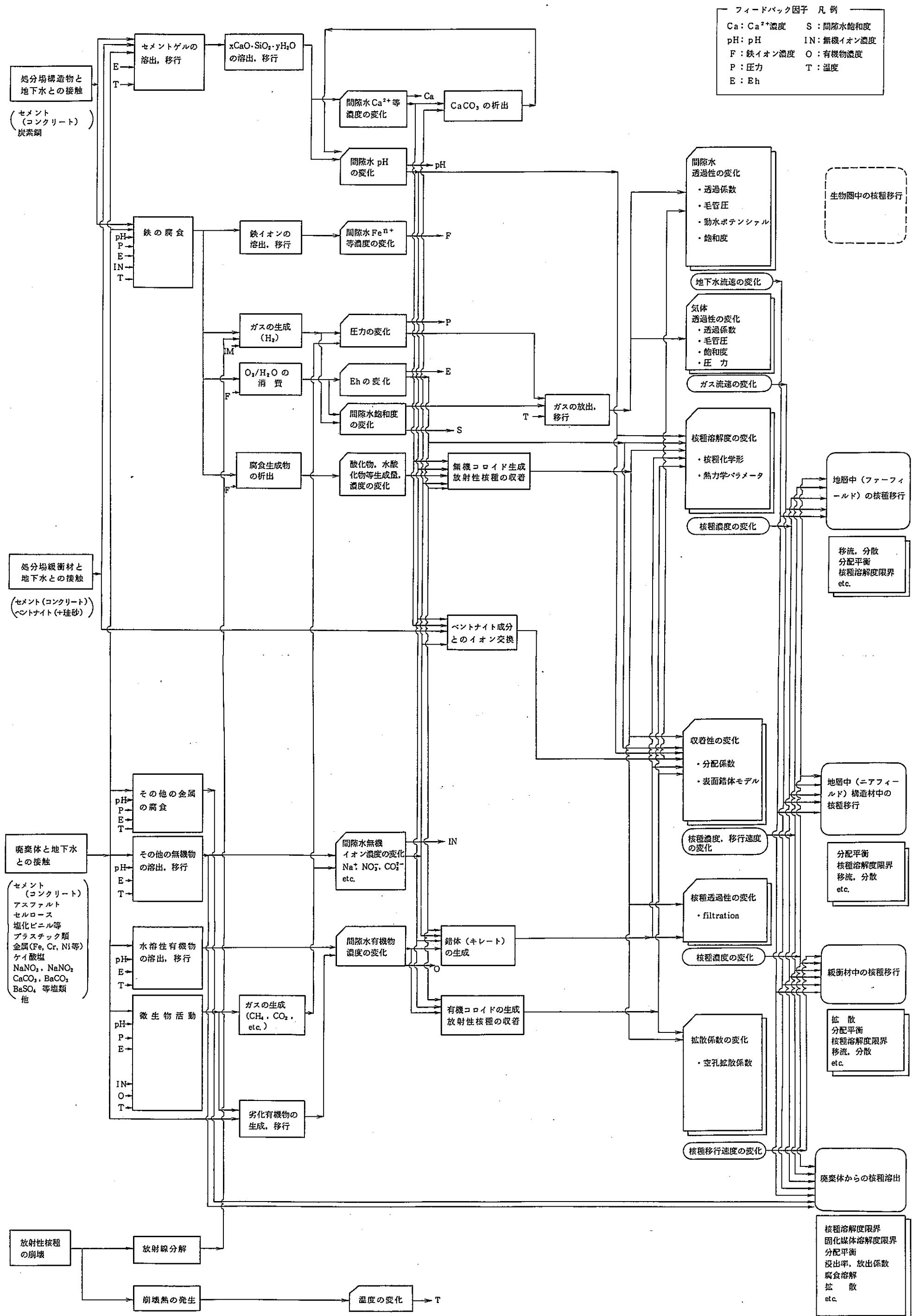


図1-2 TRU廃棄物処分性能評価上の基本シナオリ案

2. T R U 廃棄物処分固有の現象の評価手法の詳細検討

第1章で選定された基本シナリオを構成する個別現象の中から特にT R U 廃棄物処分の評価を行う上で重要と考えられ、現象のモデル化に係る研究開発が進展しているプロセスについて、そのメカニズム、評価手法について調査検討を行った。

2.1 ガスの発生とバリア内での移行

本節では昨年度実施した「評価手法の検討」から継続して、ガスの移行に関するモデル開発、評価例について調査し、次章で実施するガス移行評価手法の選定、データの設定に資することとした。

2.1.1 影響因子の摘出

Jeffriesらは地層中のガス移行に影響する因子、及びそれらのデータの収集源を詳細に摘出しているが、2相流に対する影響因子は多岐にわたる。したがって、総ての影響因子を含み、これらを定量的にモデル化することは、極めて困難であり、また当然影響の少ない因子も含まれると予想される。また、影響因子の多くはサイト特性に依存するものであり、実際にデータの取得が困難なものも多い。このため、詳細な計算モデルを構築して評価を行う前に、より一般的、基礎的なモデルによって、生じ得る処分場の挙動の幅を把握する必要があるものと示唆している。

2.1.2 2相流評価モデル

液相が水によって構成される2相系における気相部分は、不活性ガスまたは複数のガスの混合物、及び水蒸気によって構成される。ここでは熱の移動も含む非等温系の評価が可能なモデルも含めて示す。

この場合、2相流を支配する基本式は質量、及びエネルギーの保存式である。

T O U G H に用いられている質量／エネルギー保存に係る基本式を式(1) に示す。任意の系に存在する質量及びエネルギーの微小時間当たりの変化量は、系の境界を通過するフラックス； F 、及びシンク／ソースの存在による消滅／発生量により表わされる。このときの質量、及びエネルギーの蓄積量はそれぞれ式(2)、(3) で示すことができる。また、系に流入流出するフラックスは式(5) によって示される。

さらに気相についてはガス／水蒸気の二成分拡散項が式(5)の右辺第2項として加わる。

基本モデル

質量／エネルギー 収支

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

(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

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

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

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

k ; 絶対透過係数 [m²] $k_{r\beta}$; 相対透過係数 [-]

P_{β} ; 圧力 [Pa] μ_{β} ; 粘性係数 [Pa·s]

P ; 参照圧力 [Pa] $P_{cap\beta}$; 毛管圧力 [Pa]

g ; 重力加速度 [m/s²]

$D_{v\alpha}$; 拡散係数 (水蒸気/空気2成分) [m/s²]

$$F^{(3)} = -k \nabla T + \sum h_s^{(K)} F_s^{(K)} \quad -(7)$$

k ; 熱伝導度（岩石／流体混合） [W/m・K]

$h_s^{(K)}$; 比エンタルピ [J/kg]

上記の支配式は不活性ガス及び水蒸気の状態方程式、飽和度に依存する相対透過係数、及び毛管圧の決定式等の個別現象評価モデルから、適用されるパラメータの供給を受けることとなる。

2.1.3 ガス／水移行解析モデルの比較

Worganらは主だった2相流解析コード、不飽和浸透流解析コードについて、その機能、開発環境等を比較し、放射性廃棄物処分場のガス移行評価に対する適用性を評価している。比較評価の対象とした2相流評価コードは以下の9種類である。

- ① TOUGH
- ② TRACR3D
- ③ NORIA
- ④ GWHRT
- ⑤ PETROS
- ⑥ ECLIPSE
- ⑦ FAMOS
- ⑧ VIP
- ⑨ NAMMU

評価結果では、2相流移行をフルにサポートし、溶質の移行についても評価可能なTRACR3Dが最も適用性が高く、次いでTOUGH、ECLIPSE等のコードの評価が高い。

2.2 コロイドの影響、及びセメントの化学的緩衝作用

TRU廃棄物の処分に対して適用される各バリアの性能評価を行う場合、放射性核種自体及び処分場環境中に存在する有機物等によって生成するコロイド、あるいは錯体（キレート）の形成は核種移行への影響が大きいことが知られている。

2.2.1 コロイドの生成、移行

帯水層中のFP、アクチノイドの移行に対してコロイドは潜在的に重要な影響を持つことが確認されており、国際的にも研究が進められている。

(1) コロイドの特性

歐州共同体委員会では1982年よりMIRAGEプロジェクトを開始し、地層中の核種移行について室内及びフィールド試験によりデータを取得し、地球化学的影響を明らかにしてきている。MIRAGE計画のフェーズIIでは“COCO-Club”と称するワーキンググループを中心に研究が進められている。同Clubの主要メンバーであるフランスCEAは、コロイド及びフミン物質の潜在的な影響を評価するために必要なデータの整備、機構の検討項目を以下のように抽出している。

- ① 処分場サイト条件での地下水中コロイド濃度、組成、粒径
- ② 生成機構
- ③ 放射性核種を含む共存物質との反応
- ④ 錯体形成、沈澱、収着等他の反応との競争

(j) コロイド、フミンの共存状況

表2-1に示すように、天然地下水中に存在するコロイドの濃度は、サイトにより数[mg/l]から数百[mg/l]と広範囲に分布する。また、組成は、無機コロイドとして珪酸塩、アルミニノ珪酸塩、鉄またはアルミニウム、マンガンのオキシ水酸化物であり、有機コロイドとしては無機物粒子を伴うフミン物質であった。

表2-1 天然地下水中のコロイド濃度

Site	Concentration*	Size'(nm)	Composition	Reference
Alligator River (U ore body, metasediments)	—	18-1000	Oxides (Fe, Si)	SHORT <i>et al.</i> (1988)
Cigar Lake (U ore body unconformity)	1-260 mg/l	10-10000	Clays, oxides, rock particles, organics	VILKS and DREW (1986); VILKS <i>et al.</i> (1988)
Gorleben (sedimentary)	10 ¹⁷ part/l *	1-15	Organics	KIM (1988); DEARLOVE <i>et al.</i> (1991)
Grimsel (crystalline)	10 ¹⁰ part/l *	70-1000	Silica, clays, Ca silicate, biotite, organics	DEGUELDRÉ <i>et al.</i> (1989a,b)
Manitoba (crystalline)	0.1-16 mg/l	100-1000	Clays, oxides, organics	VILKS and DREW (1986)
Nevada (volcanic rocks)	4-60 mg/l	3-200	Clays, quartz	BUDDEMEIER and HUNT (1988)
Pocos de Caldas (altered volcanic rocks)	<1 mg/l	1-450	Fe oxides, organics	MIEKELEY <i>et al.</i> (1988)

* : [コロイド粒子数/l]

(ii) コロイド生成機構

イギリスD o Eによれば、放射性核種の移行に潜在的な影響を有するコロイドの主な生成プロセスには以下のものがあると考えられている。

- ① 廃棄物からの浸出：セメント固化体、ガラス固化体の浸出
- ② 鋼製容器の腐食：主に低溶解度の水酸化物
- ③ アクチニドの加水分解、重合：ニアフィールドにて移行前に生成
- ④ 地下水中に分散する粘土鉱物、酸化物上への吸着：シリカ、アルミナ、鉄／マンガンの酸化物／水酸化物
- ⑤ 有機コロイドとの錯体形成：フミン酸、フルボ酸
- ⑥ 細菌表面への吸着、細菌内への取り込み

また、フランスCEAの研究者によれば、コロイドの生成条件として重要なプロセスを以下のように述べている。すなわち、縮合または過飽和条件における溶存化学種からの均一な核形成等がコロイドの形成の原因となり、これは加水分解を受け易い多価陽イオンを形成する元素が溶存する溶液系について特に重要である。

(2) コロイドの反応

(i) 放射性核種とコロイドとの反応

イギリスAEAでは模擬金属腐食生成物に対するアクチノイドの吸着特性試験が実施され、それぞれコロイド状のマグнетイト、ヘマタイト、水酸化ジルコニウムに対してPu、Amは高い親和性を持ち、高炉スラグ／普通ポルトランド混合セメントと同等の 10^5 [ml/g]以上の分配係数を有することを明らかにした。この結果よりAEAでは、処分場内において生成する金属酸化物コロイドが容易に間隙水中を移動する場合には、ニアフィールドにおける放射性核種の移行遅延機能が低下することから、重要な核種移行経路となる可能性があることを示唆している。

このような擬似コロイドの生成による地層への吸着に対する影響については研究が開始されたところである。また、コロイド上への放射性核種の吸着については、表面錯体モデルの適用が有望視されており、研究開発が進められつつあるが、粒子濃度の効果については現象そのものの理解が十分でなく、さらに議論の必要がある課題とされている。

この他にもフミン物質については陽イオンとの吸着、錯体形成、凝集、溶解、酸化／還元、また、有機コロイドとしての陽イオンとの相互作用等モデル化を行う上

で明らかにすべき点が多い。さらに競争反応となる金属イオン、配位子濃度が変化する場合、配位反応速度が遅くなることが報告されており、このような場合について上述の平衡論的モデルの他に、速度論的モデルを構築することにより、平衡化学種が生成するまでの期間について評価する必要性も大きいとされている。

(ii) 岩体とコロイドとの相互作用

コロイドの移行に影響する岩体との相互作用については、物理吸着、表面電荷による斥力、フィルトレーション、閉塞亀裂中の拡散が検討対象として考えられている。この内、物理吸着については間隙水中の核種濃度を直接決定するものであり、重要な現象と考えられており、コロイド溶液のカラム透過試験等が実施されている。

真性コロイド (Ce, U, Th), 及び擬似コロイド (SiO_2 , 及び Fe 酸化物上へ吸着した Ce, U) の鉱物 (SiO_2 , 雲母, ヘマタイト等) への吸着に関する試験では、pH 及び鉱物表面と粒子の電荷が影響することが明らかとなり、鉱物表面と粒子の電荷が反対である場合には、移行評価上重要となり得る吸着が生じることが確認されている。さらに、この場合、岩体上へのコロイドの吸着は単層で生じるとの報告もなされている。今後、これらの反応については可逆性と反応速度、 Ca^{2+} 等地下水中の他の陽イオンとの競争について研究の必要があるとされている。

また、フミン酸については鉄酸化物、粘土等の鉱物表面に強い親和性があり、それは pH と鉱物表面の吸着サイト容量に依存することが、確かめられている。

岩体との他の相互作用としては、岩体空孔径とコロイド粒径との関係で生じる立体的移行阻害、岩体と同一の表面電荷を有する場合の静電的移行阻害等の物理的作用が検討されており、フィルトレーションモデルの提案等が行われている。

(3) コロイドの移行モデル

Saltelli らは单分散コロイドに対するフィルトレーションモデルについて、ラングミュア型吸着による遅延と濾過の確率分布を考慮することにより、多分散系でのフィルトレーションモデルの検証を実施した。

また、ニューメキシコ大学では、ユッカマウンテンサイト特性評価計画の一環として、多孔質及び亀裂媒体中におけるコロイドの移行評価コード CTCN (Colloid Transport Code-Nuclear) を開発している。CTCN コードは非定常、質量、エネルギー、運動量保存式を数値的に解くものであり、岩体等との相互作用を反映するための多用な境界条件に対応可能なものである。CTCN は図 2-1 に示す岩体との相互作用について機構そのものをモデル化することなく、現象面からとらえること

により、移行への影響の大きさを評価しようとしている。

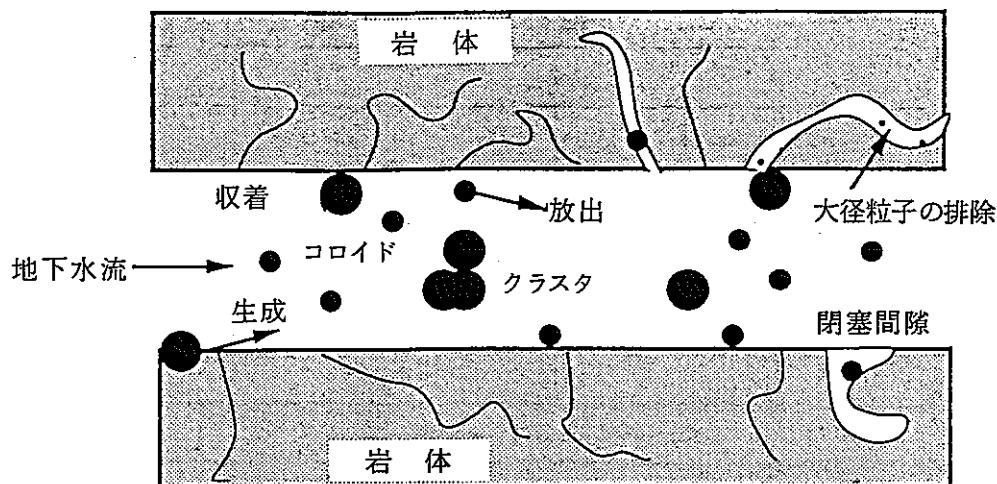


図2-1 コロイドの移行に影響を及ぼす現象

表2-2にコロイドの核種移行に対する影響の評価に係る研究開発課題をまとめて示す。

表2-2 コロイドによる影響評価に係わる研究開発課題

項目	研究開発課題	パラメータ
コロイドの特性評価	サンプリング手法の開発 コロイド濃度測定手法の開発 粒径、粒径分布測定手法の開発 各種パラメータの測定、評価 コロイド安定性の評価	コロイド濃度 粒径、粒径分布 表面電荷（密度） 化学組成、分子構造
コロイドの生成機構	バリア構成材料、廃棄体からの生成機構 有機物、劣化生成物からの生成機構 微生物からの生成機構 地下水、岩石、粘土成分からの生成機構	pH, Eh, イオン強度 共存イオン 粒子濃度 コロイド濃度
放射性核種との反応	錯体形成等による核種収着 配位子の変化による収着への影響 コロイド間相互作用（凝集等）の影響 速度論的評価モデルの開発	電気二重層容量 表面電荷密度 pH, Eh, イオン強度 共存陽イオン コロイド濃度
バリアとの相互作用	収着（物理吸着等）モデルの開発 コロイド間相互作用（凝集等）の影響 収着イオンによる影響	電気二重層容量 表面電荷密度 pH, Eh, イオン強度 共存陽イオン 表面電荷密度
移行のモデル化	フィルトレーションモデルの適用 静電的斥力／引力の影響評価手法の適用 影響の大きい現象の摘出 移行評価パラメータ評価、設定 コロイド生成、核種収着、バリア相互作用との連成 従来の移流拡散モデルとの連成	表面電荷密度 表面電荷密度 pH, Eh, イオン強度 共存陽イオン etc.

2.2.2 セメントの化学的緩衝作用

T R U 廃棄物の処分においては、廃棄体、緩衝材、構造物（躯体）等に多量のセメント／コンクリートが使用される可能性が大きい。この場合、セメントは自身の溶解によって処分場の化学的雰囲気を、長期にわたり高い pH に保つ等の化学的緩衝作用を有することが期待されている。

(1) N A G R A による研究例

Bernerらはセメント／コンクリートの長期化学的挙動を記述するため、セメントの水和、カルシウムケイ酸塩水和物（C-S-Hゲル）の熱力学的挙動、地下水での水和したセメントの劣化についてモデル化を行っている。同モデルでは、多様なセメント水和物を3種類のモデル固相に分けて評価するものとして、段階的に生じる C-S-Hゲルの溶解挙動は従来の地球化学コードの適用により評価している。この時 C-S-Hゲルは独立したモデル成分によって構成されるものとし、それらの溶解度は膨大な量の文献値から抽出して用いている。地下水でのセメントの劣化（溶解）については、ミキシングタンクモデルにより評価し、間隙水中の溶質の化学形と残存する化学組成との平衡状態を決定することにより溶出挙動を模擬している。

評価結果は以下の通りである。

Berner は間隙水の各交換サイクルごとに残留アルカリの5%ずつが溶出すると仮定した。純水中での劣化（溶解）は第1段階として溶解性の高い NaOH、KOH の溶出により間隙水の特性は決定される。溶解の第2段階は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶解により間隙水組成は決定され、 $\text{C}/\text{S} > 1.8$ であれば pH はほぼ12.5で推移する。第3段階では C/S が1以下となり、間隙水の pH は連続して11まで低下し、溶液中と固相中の C/S が等しいコングルエントな溶出となる。一方、泥灰岩層の地下水を模擬した浸出液中でも基本的に3段階での溶出が見られるが、純水中で見られるコングルエントな溶解過程は見られず、C-S-Hゲルが完全に溶解した後残留した $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の溶解により $\text{pH} = 10.4$ に止まった後、 $\text{pH} = 7$ まで急速に低下する。

図2-2, 3に純水中、泥灰岩模擬地下水中でのポルトランドセメントの間隙水イオン濃度、pHの変化を示す。これによれば pH が11以上にある期間は地下水組成により大きく異なり、間隙水の交換回数にして約 1,000回から10,000回まで変化する。

Bernerはこれらの評価で得られた結論を以下のようにまとめている。

- 1) CSHゲルが完全に溶解するまでの期間は、地下水組成に強く影響される。
炭酸根はCSHゲルから方解石を生成するため重要なパラメータとなる。
- 2) セメント寿命に対するセメント組成の影響は、地下水組成より重要でない。
地下水中的Si濃度が高まるとセメントの寿命が延びるが、pHは低下する。
- 3) 間隙水のpHはセメントのC/S比によって決定される。
- 4) セメントの選定においては、寿命の予測値を基に決定すべきではなく、核種の溶出に影響の大きい高pHの維持期間によって決定すべきである。

(2) イギリスにおける研究例

イギリスでは、処分場構造物及び充填材としてコンクリートの使用が主体的に検討されており、長期的にニアフィールドのpHを高く保つことによりアクチニドの溶解度を低く抑える他、微生物の活動を抑制する等の化学バリアとしての機能が主に期待できると考えている。ここではコンクリート間隙水のpH維持期間に関する評価手法についてその研究例を示した。

Atkinsonらによれば、セメント間隙水中の高pHはセメント成分中の相対的に溶解しやすいCaO - SiO₂ - H₂O系の溶解によるものとし、その継続期間はC-S-H系ゲルの地下水への溶解量によって決定されるとしている。そこでAtkinsonらは物質移行とCaO - SiO₂ - H₂O系の平衡データを用いた簡易なモデルによる評価手法を提案している。評価結果の例を図2-4に示す。

1980年代の報告による上記の経験的なセメント溶解モデルのほか、Atkinsonらは広範なC-S-H系ゲルの化学組成を考慮した熱力学的溶解モデルを提案している。固／液相平衡組成算定プログラム“SOLGASIX”は与えられた系内にある一定の構成物質について、平衡状態における各成分の組成を算定するいわば地球化学コードである。

同コードを用いて解析を行ったセメント-水溶液系のモデルは、両端の化学形を結晶質のポルトランダイト(Ca(OH)₂)、及び非晶質のシリカ(SiO₂)とし、これらが第3の固相“X”として定義される、nCaO·SiO₂·mH₂Oとの間で連続の組成を持つ固溶体を形成するものと想定している。

また、Atkinsonらは試験で得られたC-S-H系ゲルの溶解度試験データを用いてモデルの検証を実施している。試験結果は解析結果と比較的よい一致を見せている

が、式(1)、(2)の各項を最適化させただけでは解析結果との差異を完全になくすことはできないことが明らかとなった。また、予測される固相の化学組成と SiO_2 - Ca(OH)_2 の相図とは著しい相異を示した。これより、Atkinsonらは式(1)、(2)に示された固溶体モデルのみが唯一の解ではなく、より試験結果に合致するモデルが存在する可能性を示唆している。

この誤差が生じる原因としては同モデルではC-S-H系ゲルを結晶質として考慮していたが、非晶質あるいは不完全な結晶化を起こしている場合には、多様な欠陥の存在により広範な Ca/Si 比の範囲において同様の構造を形成し得るため、さらに、この試験で用いたC-S-H系ゲルは非晶質である可能性が高いことから試験結果との相異が生じるものと考えている。

この他にもセメントの溶解挙動については広範に研究が進められており、地球化学コードPHREEQE、あるいは地球化学コードに物質移行を連成したCHEQMATE等を基礎とした解析モデルの開発が行われている。

地下水成分との反応については、地下水は一般的にセメントに対して攻撃的であるとし、特に不溶性固相の生成は pH 緩衝作用の評価を複雑にするとしている。重要な成分には Mg^{2+} 、溶存二酸化炭素、重炭酸塩、及び SO_4^{2-} がある。

廃棄物との反応としては、固化材コンクリート、及び廃棄物中の有機物との反応を考えられる。固化材コンクリートにはフライアッシュ等の添加物が混合されることがあり、このような場合には Ca/Si 比の変化による pH、及びその維持期間の変化について考慮する必要がある。 $\text{Ca/Si} < 0.8$ となると pH 緩衝作用は失われる。有機物特にその劣化生成物との相互作用については、タンニン酸、イソサッカリン酸等の高分子酸、グルコース、サッカロース等の糖類、蟻酸等の低分子カルボン酸、二酸化炭素等が重要としている。これらは蔴酸カルシウム、炭酸カルシウム等の不活性成分の形成、または糖類による溶解速度の加速を生じさせる可能性があり、緩衝作用に影響することが考えられる。

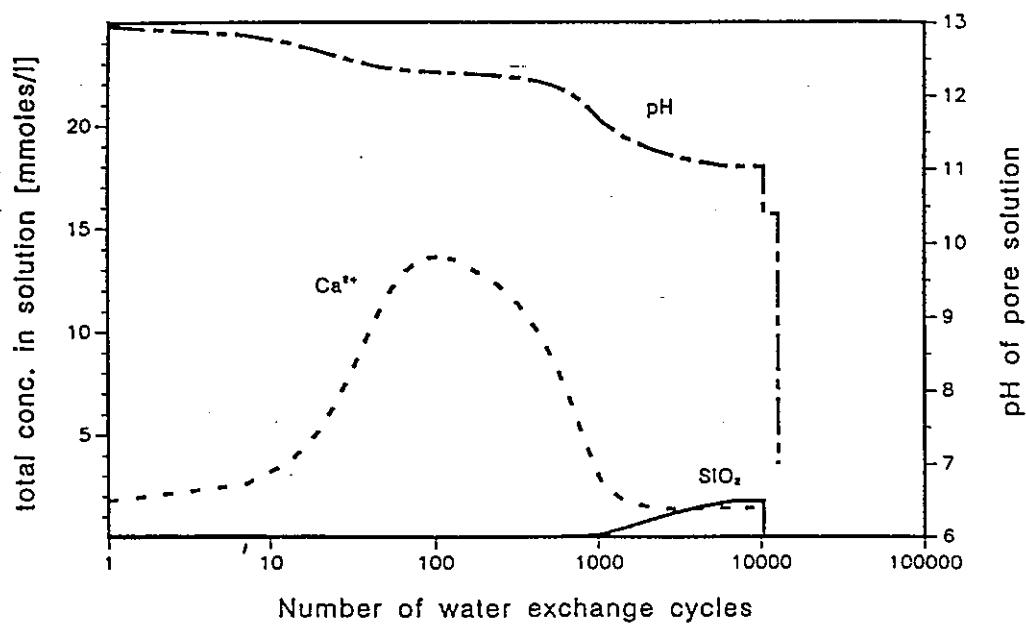


図2-2 普通ポルトランドセメントの純水中溶出

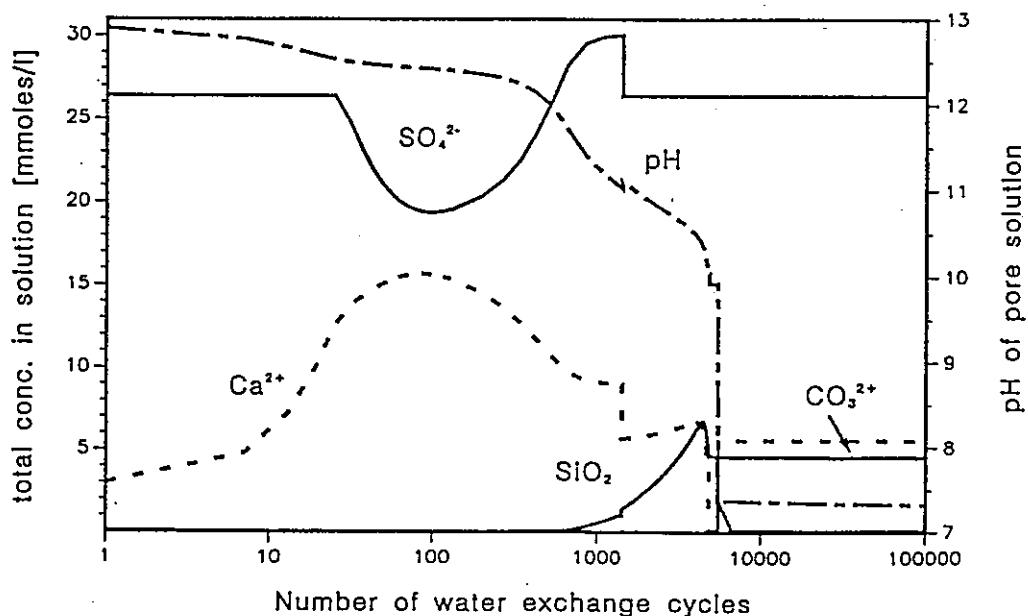


図2-3 普通ポルトランドセメントの模擬泥灰岩地下水溶出

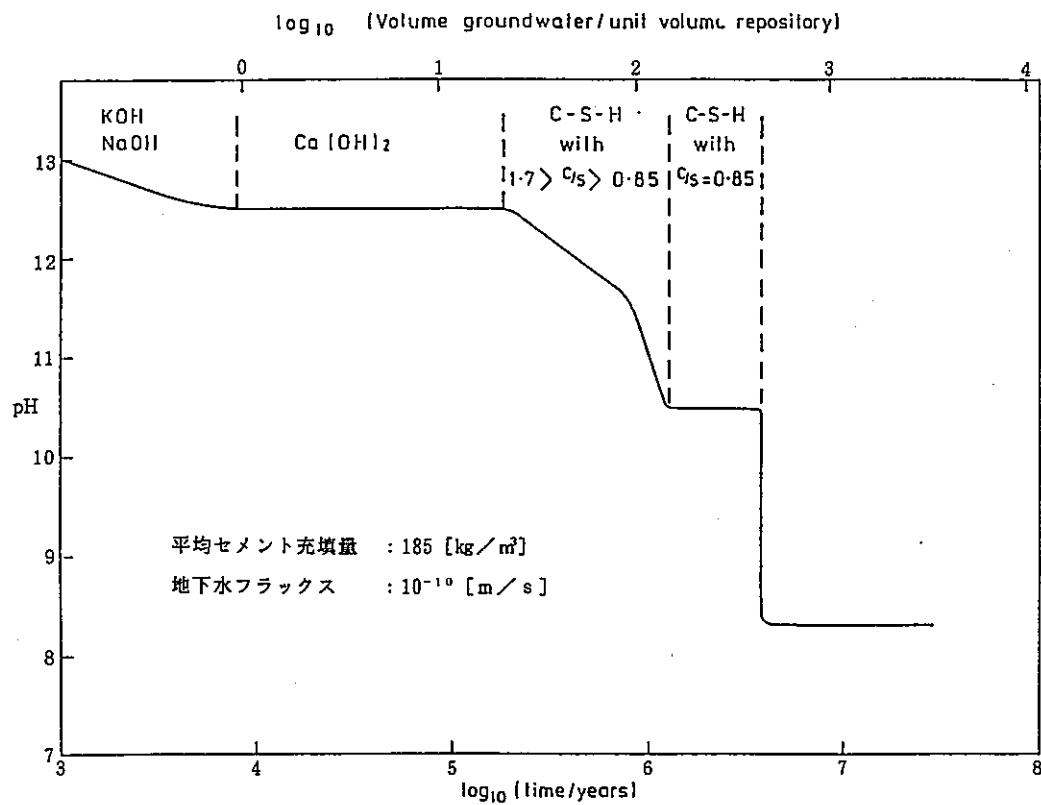


図2-4 処分場間隙水のpH変化

3. 予備的性能評価

第1章において摘出された各固有現象のうち代表的かつ重要と考えられる、処分場内のガスの発生によるバリアシステムへの影響について試算を実施した。

3.1 評価コードの選定

第2章において比較評価を行った2層流解析モデルより、本研究において適用するために最も適切と考えられるコードの選択を行った。本試算の目的は、処分場内におけるガス発生による核種移行に及ぼす影響の把握であるところから、最低限の機能として以下の因子を評価し得るものでなければならない。

- 1) 処分場及びその近傍における圧力の変化
- 2) 処分場及びその近傍における間隙水、ガスの飽和度
- 3) 人工バリアあるいはニアフィールドから放出されるガス、間隙水フラックス
- 4) ニアフィールド周辺の地下水流速
- 5) 地層中の気相及び液相中のガス成分フラックス

以上の現時点において確認しておくべき内容、本試算で必要となる指標等を考慮した場合、ECLIPSE、TOUGH、TRACR3Dの3コードが解析機能及び入手、操作の面で総合的に適用性が高い。本研究ではこの3種類のコードのうち、廃棄物処分場におけるガス発生状況を形状の面からより忠実に再現する観点から、ガス発生源を分散したボリュームソースとして取り扱うことができること、及び入手、運用の確実性の点から、1992年現在でNEADBに整備されているTOUGHコードが最も適していると考え同コードを用いて試算を行うこととした。

3.2 試算条件の設定

以下にTOUGHコードを用いてTRU廃棄物処分場におけるガス発生の影響評価を実施する評価対象処分場概念と、試算に用いるパラメータ値の設定を行った。

3.2.1 処分場概念の設定

評価対象とする処分場概念は、処分施設形状としては1.1.2において設定したサイロタイプ及びポールト（岩洞）タイプとした。以下にその概略を示す。

(1) ポールト（岩洞）タイプ

人工バリア構成としては、セメントによる固化体／モノリス充填材、及びポールト内の充填材としてのベントナイトを考慮する。さらに母岩としては特定の岩種を想定することなく、過去の評価例、及びコードに付属するデータを参考として一般

的なケースを想定するものとした。

本試算では間隙水圧との関係からガス発生による圧力の変化が相対的に顕著に現われるを考えられる、比較的浅い深度である200mを処分場の深度として想定した。

解析は2次元にて行うこととし、ボルトタイプについては、図3-1に示すように廃棄体及びモノリス充填コンクリートを一体化した矩形の領域を設定し、同領域内部にガスの発生源を配置するものとした。廃棄体領域の外側にベントナイト緩衝材層を配置し、さらにその外側には地層があるものとした。

(2) サイロタイプ

サイロタイプについては、低／中レベル廃棄物処分施設として既に運転されているスウェーデンのSFRを参考として、基礎概念にはこれと同等の規模、バリア構成を想定するものとした。

また、ボルトタイプと同様の深度を想定し、処分深度は200mとした。

解析は2次元にて行うこととし、サイロタイプについては、図3-2に示すようにサイロを直方体形状に模擬し、廃棄体及び充填セメントを一体化した矩形の領域を設定した。ボルトタイプと同様に廃棄体領域内部にガスの発生源を配置する。廃棄体領域の外側にコンクリート躯体を配置し、その周囲にベントナイト緩衝材層、及び地層があるものとした。

3.2.2 評価パラメータの設定

本項では、これまでTOUGHコードを用いた評価例について設定条件を調査し、これらを参考にして本試算で用いるパラメータ値等の各種評価条件の設定を行った。本試算で適用する各種パラメータ、評価関数を表3-1に示した。ここで、

S_{lr} ; 残留間隙水飽和度 [-] , S_{gr} (S_{sr}) ; 残留ガス飽和度 [-]

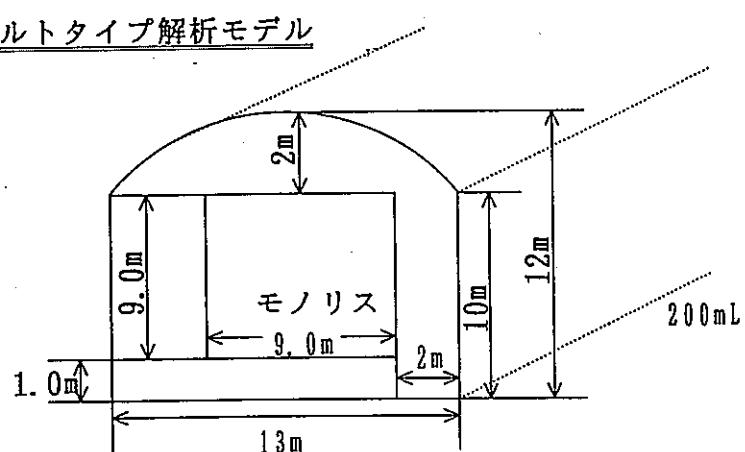
P_e ; 空気侵入圧 [MPa] , α, β, P_o ; モデルパラメータ [-]

λ ; 間隙孔径分布パラメータ [-]

なお、表3-1に示したガス発生速度は廃棄体 1 m³に対する値であるが、ボルトタイプの処分場については、廃棄体定置ゾーンの容積に対し67%を廃棄体が占めるものとした。一方、サイロタイプについては廃棄体定置ゾーン全体に均一に廃棄体が分散したものとしてガス発生領域の設定を行っている。また、サイロタイプではガス発生速度の影響を見るため、低発生速度条件で試算を行った。

処分場閉鎖後瞬時に処分場内は地下水で飽和するものとし、重力の影響について

ボルトタイプ解析モデル



- 2次元直交座標
- 1/4断面にて表示
- 均質多孔体

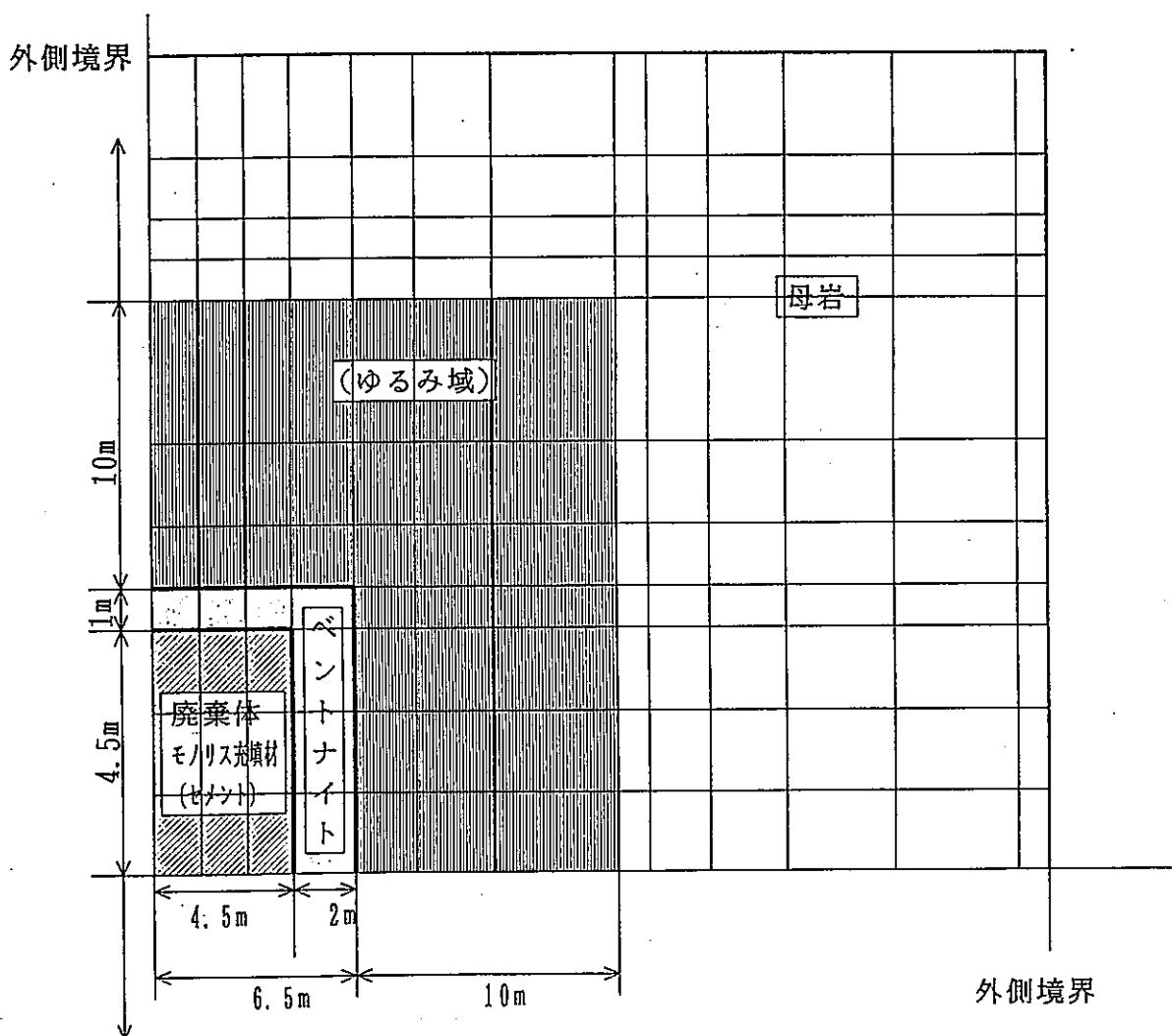
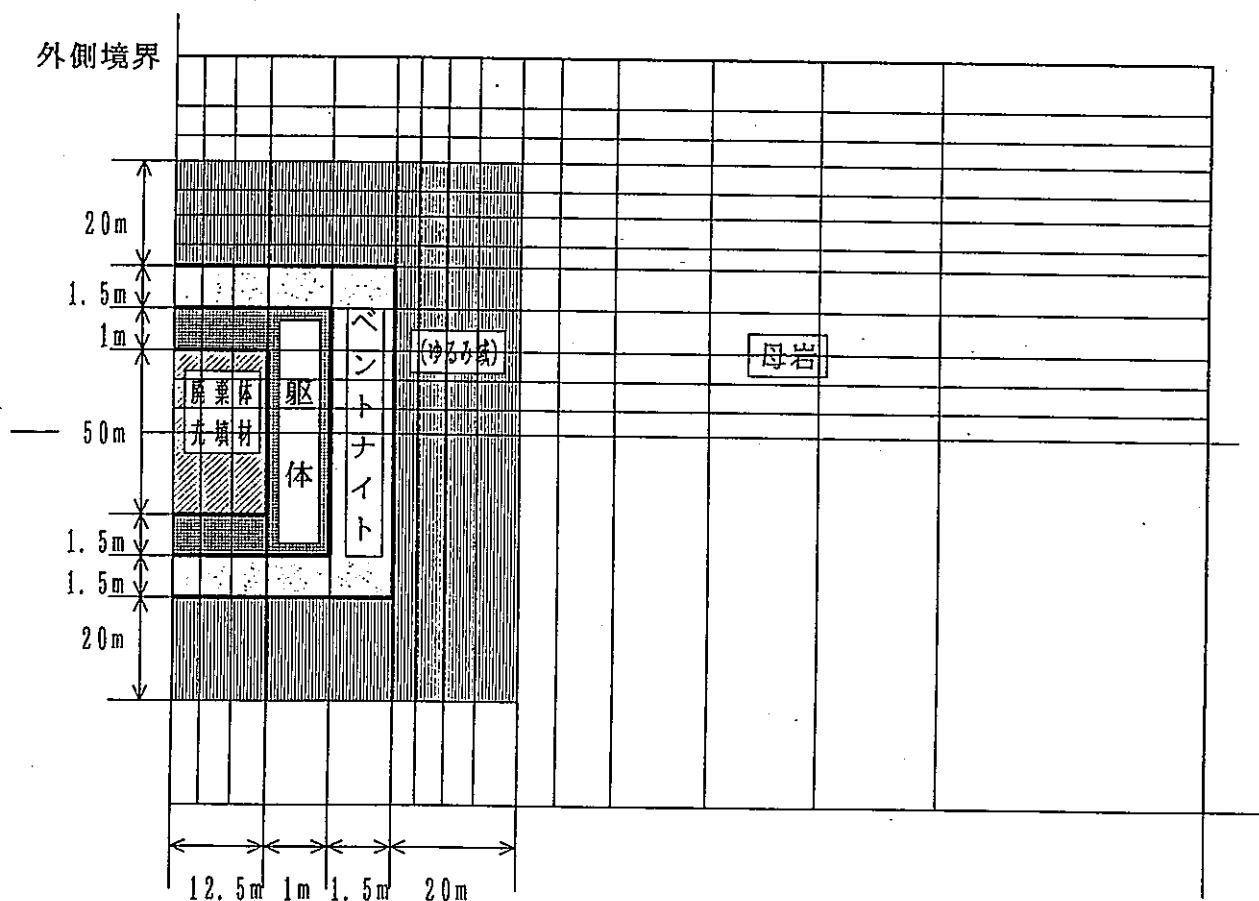
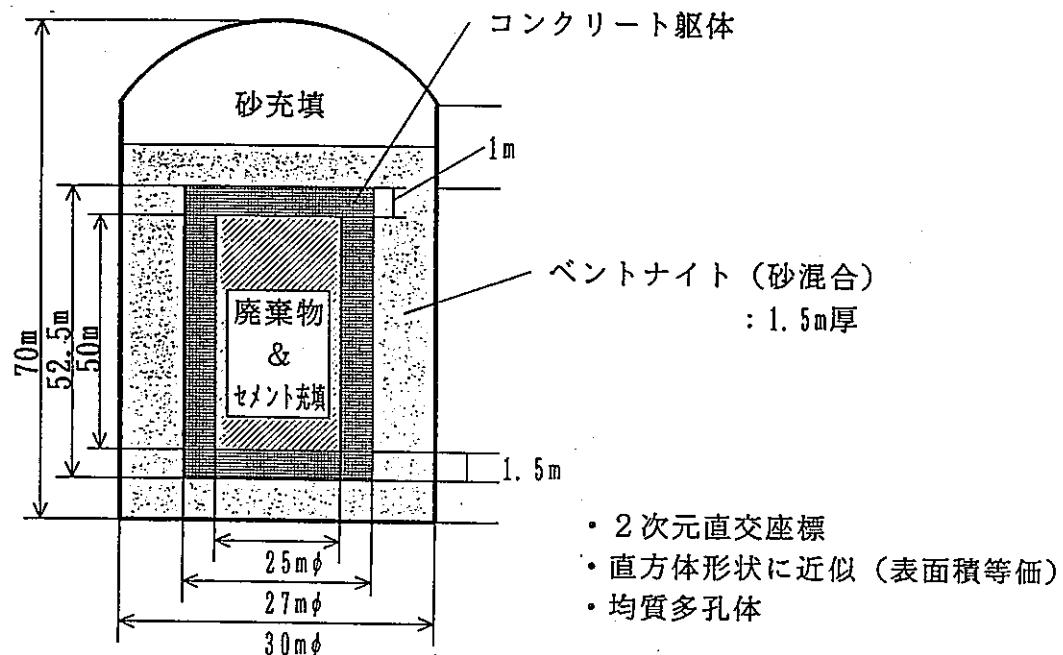


図3-1 サイロタイプ処分場解析モデル

サイロタイプ解析モデル



外側境界

図3-2 サイロタイプ処分場解析モデル

表 3-1 性能評価試算条件

パラメータ	ボルトタイプ			サイロタイプ		
処分施設	直方体近似(2次元) 1.1mH × 13mW (× 200mL)			直方体近似(2次元) 55.5mH × 30mW (× 30mL)		
外形寸法	9.0mH × 9mW (× 200mL)			50mH × 25mW (× 25mL)		
廃棄体(充填材)	緩衝材 1m / 2m (ベントナイト混合)			1.5m (ベントナイト混合)		
躯体	——			1m / 1.5m (コンクリート)		
バリア物性(1)	密度 [kg/m³]	間隙率 [-]	密度 [kg/m³]	間隙率 [-]		
廃棄体(充填材)	2.4 × 10³	0.35	2.4 × 10³	0.35		
緩衝材	2.7 × 10³	0.30	2.7 × 10³	0.30		
躯体	——	——	2.6 × 10³	0.35		
母岩(ゆるみ域)	2.6 × 10³	0.03(0.10)	2.6 × 10³	0.03(0.10)		
バリア物性(2)	絶対透過係数 [m²]			絶対透過係数 [m²]		
廃棄体(充填材)	10⁻¹⁵			10⁻¹⁵		
緩衝材	10⁻¹⁸ , 10⁻¹⁹			10⁻¹⁸ , 10⁻¹⁹		
躯体	——			10⁻¹⁷		
母岩(ゆるみ域)	10⁻¹⁷ (10⁻¹⁵)			10⁻¹⁷ (10⁻¹⁵)		
相対透過係数 評価関数	Corey モデル		Slr=0.25 Sgr=0	Corey モデル		Slr=0.25 Sgr=0
毛管圧 評価関数	Narahimhan モデル	Pe=0, 0.5 [MPa] Po=0, 0.5 [MPa] $\eta = 1$	Narahimhan モデル	Pe=0, 0.5 [MPa] Po=0, 0.5 [MPa] $\eta = 1$		
ガス発生速度	H₂ : 0.3 m³(STP) / m³ · y			H₂ : 0.06 m³(STP) / m³ · y		
その他初期条件	圧力 [MPa]	間隙水 飽和度 [-]	温度 [°C]	圧力 [MPa]	間隙水 飽和度 [-]	温度 [°C]
	2.0	1.0	30	2.0	1.0	30

は無視した。

3.3 試算結果

前節において設定した処分概念及び2相流パラメータを用いて解析評価を行い、廃棄体からの発生ガスによる放射性核種の移行に対する影響について検討した。

3.3.1 ボールトタイプでのガスの蓄積

ここで、廃棄体及び各バリアの状態は、それぞれ処分場内とその近傍の以下に示す位置の数値で代表させている。

- ・廃棄体；ボールト中央部、図3-1の最下端行最左端列のメッシュ、ボールト中心からの距離=1.1[m]
- ・充填材；モノリスコーナー部、図3-1の廃棄体定置ゾーン右端上部コーナー部、ボールト中心からの距離=5.3[m]
- ・緩衝材；ベントナイトコーナー部、図3-1のベントナイトゾーン右端上部コーナー部、ボールト中心からの距離=7.4[m]
- ・緩み領域；緩み域コーナー部、図3-1の緩み域右端上部コーナー部、ボールト中心からの距離=19.1[m]
- ・母岩；ボールト、緩み領域の対角線延長上のメッシュ、ボールト中心からの距離=61.5[m]

(1) ボールトタイプ：ケース1

ケース1は、緩衝材の絶対透過係数を $1.0 \times 10^{-18} [\text{m}^2]$ とし、毛管圧の影響を考慮しないこととしたケースである。ガスの蓄積状況について、図3-3, 4にボールトタイプ処分場における各バリア域での間隙圧力の変化、及び間隙中ガス飽和度の変化を示した。

間隙圧力の上昇は図3-3に示すように、絶対透過係数の最も小さい緩衝材層の内側にある廃棄体及び(セメント)充填材ゾーンで著しい。

図3-4には間隙中のガスの飽和度、すなわち多孔質間隙中に占める気体の体積分率の変化を示している。ガス飽和度はガスの発生源である廃棄体ゾーンで最も高く、処分場閉鎖後約200年で37%に達しさらに上昇を続けている。閉鎖後約200年時点での各バリア層のガス飽和度は、充填材層について34%，緩衝材層で28%，処分施設からの距離10.5[m]のゆるみ領域で17%であり、処分施設からの距離53[m]の母岩ではほぼ0%であった。

(2) ボールトタイプ：ケース 2

ケース 2 は、緩衝材の絶対透過係数を $1.0 \times 10^{-18} [\text{m}^2]$ とし、毛管圧の影響を考慮したケースである。その他の試算条件についてはケース 1 と同一とした。

間隙圧力の上昇はケース 1 と同様に絶対透過係数の最も小さい緩衝材層の内側にある廃棄体及び(セメント)充填材ゾーンで著しいが、本ケースでは毛管圧の効果を考慮したことから、廃棄体及び充填材層での圧力上昇はより顕著であり、ガス発生領域以外の各層で圧力の急激な上昇が見られた。最大圧力は廃棄体及び(セメント)充填材ゾーンで処分場閉鎖約12年後に現われ、その圧力は約3.3 [MPa] であった。

毛管圧を考慮したことにより気泡の放出が抑制され圧力が上昇し、飽和度はより小さい値となった。ガス飽和度はガスの発生源である廃棄体ゾーンで最も高く、処分場閉鎖後約200年で29%に達しさらに上昇傾向にある。閉鎖後約200年時点での各バリア層のガス飽和度は、充填材層について29%，緩衝材層で22%，処分施設からの距離10.5 [m] のゆるみ領域で19%であり、処分施設からの距離53 [m] の母岩では0 %であった。

(3) ボールトタイプ：ケース 3

ケース 3 は、緩衝材の絶対透過係数を $1.0 \times 10^{-19} [\text{m}^2]$ とし、毛管圧の影響については無視したケースである。その他の試算条件についてはケース 1 と同一とした。

間隙圧力の上昇は緩衝材の絶対透過係数を1桁下げたことによって廃棄体及び(セメント)充填材ゾーンで特に著しい。最大圧力は最も遅い処分場閉鎖後約19年で現われ、その圧力は約5.6 [MPa] であった。

また、緩衝材の絶対透過係数を1桁下げたことによる気泡の放出抑制、圧力上昇の結果、飽和度は本試算ケースのうち最も小さい値となっている。処分場閉鎖後約200年時点において、ガス飽和度は廃棄体ゾーンで30%に達しさらに上昇傾向にある。同時点での各バリア層のガス飽和度は、充填材層について27%，緩衝材層で23%，処分施設からの距離10.5 [m] のゆるみ領域で14%であり、処分施設からの距離53 [m] の母岩では0 %であった。

3.3.2 ボールトタイプでのガスの移行

ボールトタイプ処分場に対する上記3ケースについて、最大圧力の経時変化を図3-5に示した。

緩衝材の絶対透過係数を $1.0 \times 10^{-18} [\text{m}^2]$ としたケース 1 に比較してこれを $1.0 \times$

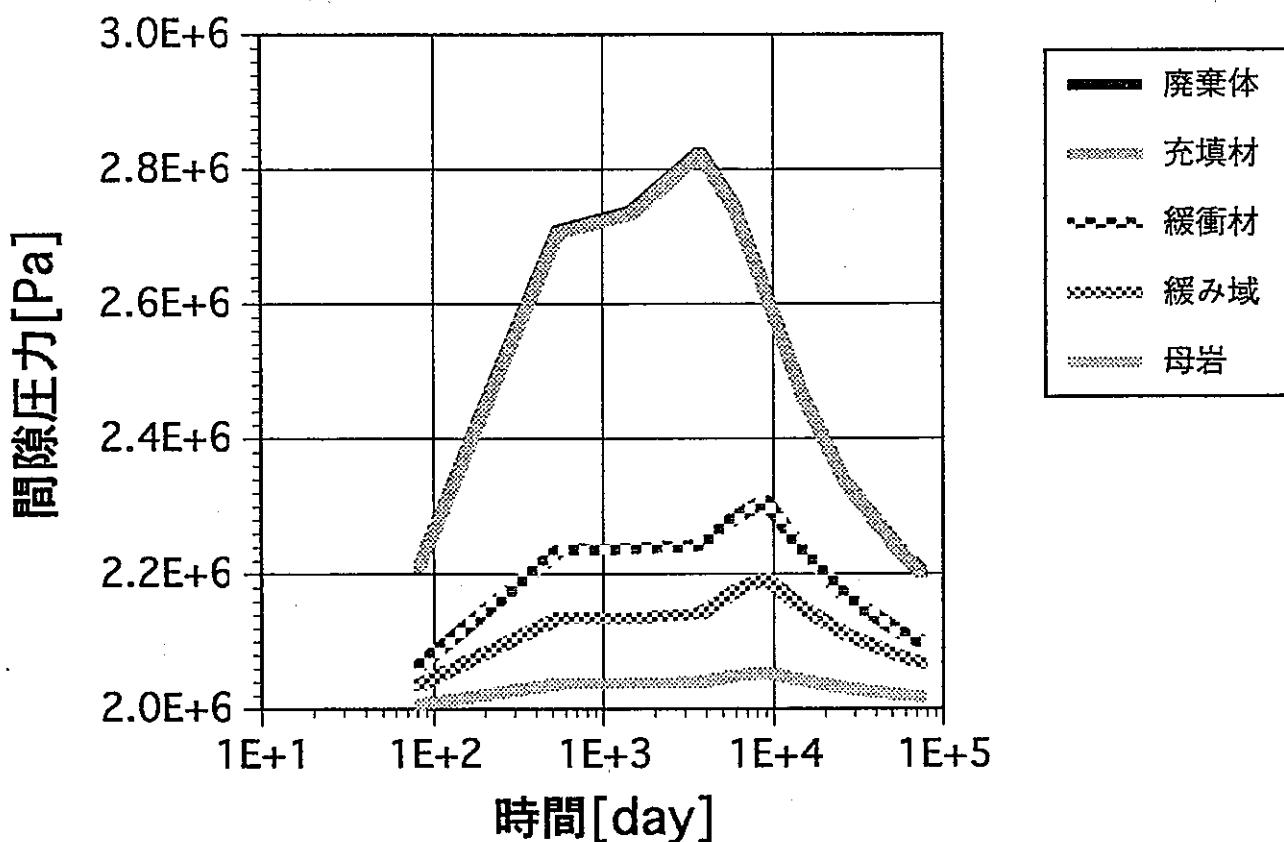


図3-3 圧力の経時変化（ボルト，ケース1）

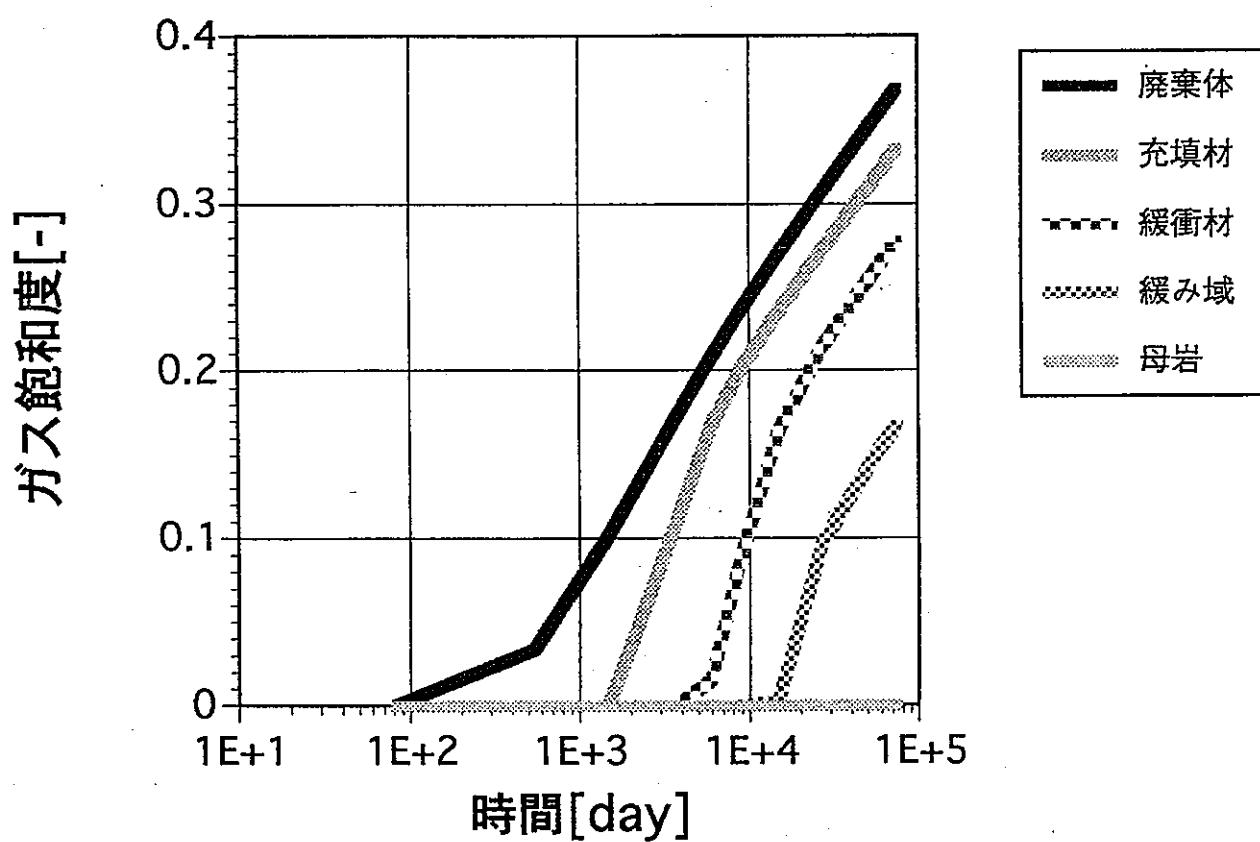


図3-4 ガス飽和度の経時変化（ボルト，ケース1）

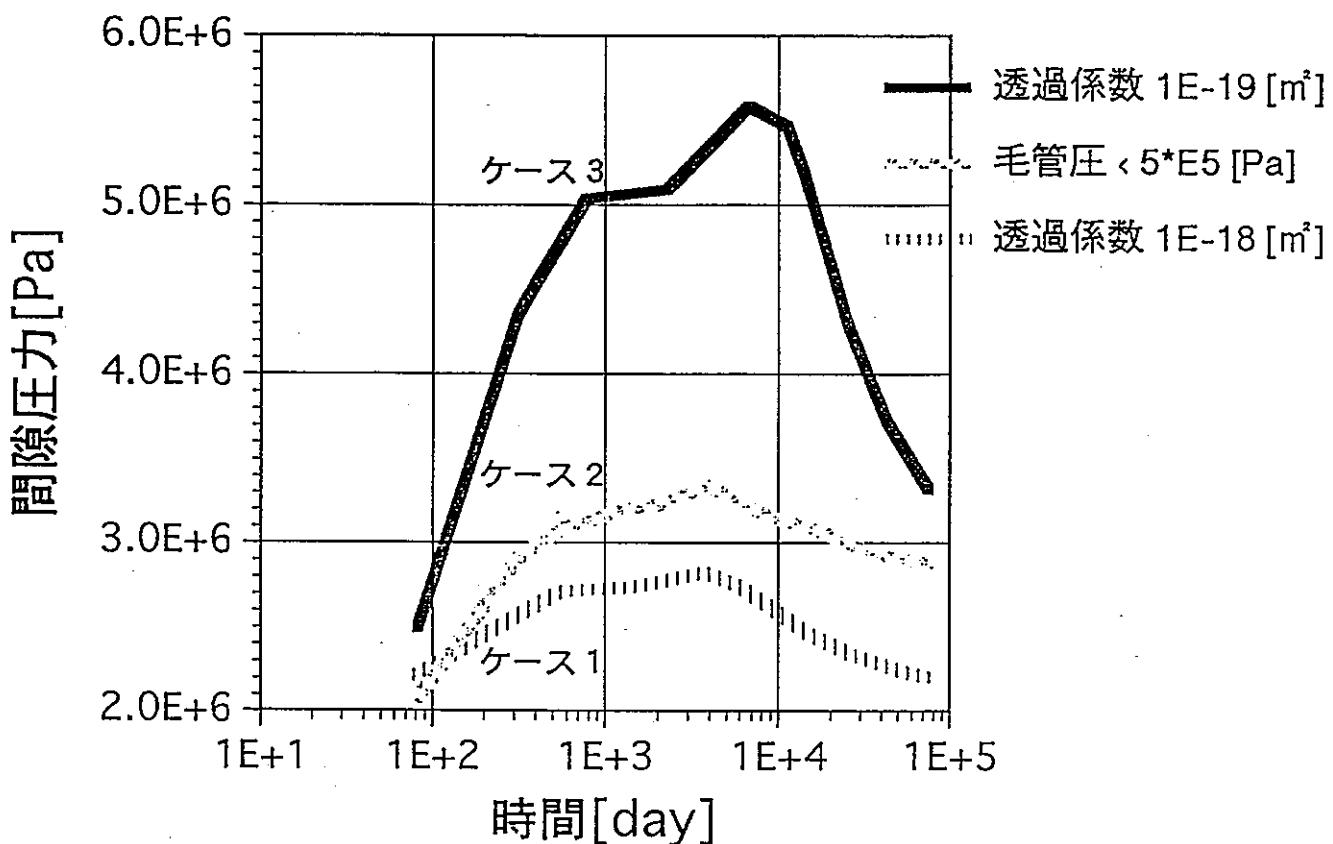


図3-5 各ケースの最大圧力の経時変化（ボールト）

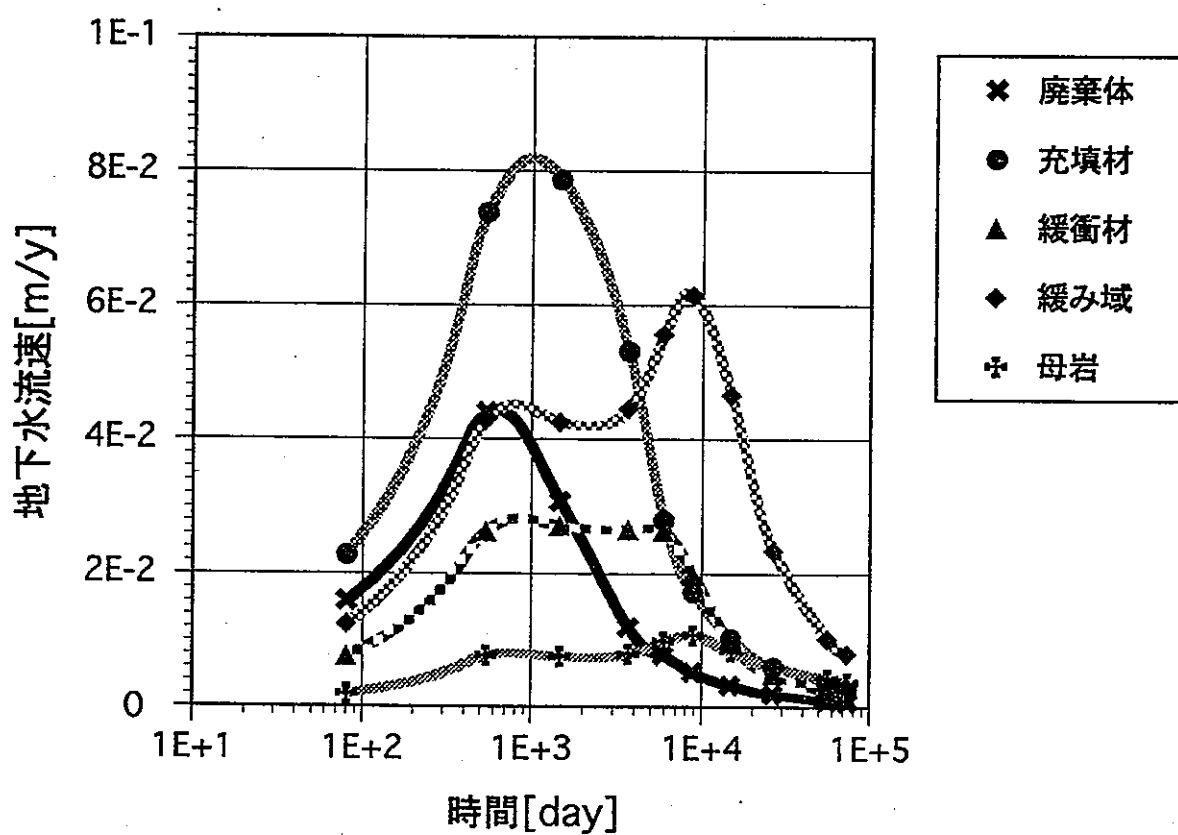


図3-6 間隙水流速の経時変化（ボールト， ケース 1）

$10^{-19}[\text{m}^2]$ としたケース3では、処分施設内の最大圧力が約2.8[MPa]上昇し、ガスの蓄積に及ぼす影響は大きい。今後の透過係数の測定、評価が重要である。

毛管圧の影響を考慮したケース2では、Narasimhanのモデルを適用し、この時のパラメータを表3-1に示すように、気相が液相におき替わって侵入する最小の圧力差を0.5[MPa]として評価を行った。この場合、最大圧力はケース1に比較して約0.5[MPa]の上昇であった。

図3-6に各バリア層における間隙水の線流速の経時変化を示す。気泡の放出によって各バリア内の間隙水流速は影響を受けたことが明らかである。また緩衝材の気泡放出抑制機能は地下水流速に及ぼす影響を緩和する効果があると言える。ここで重要なことは緩衝材中の間隙水が、ケース3においても0.01[m/y]を超える流速で動くことであり、数十年から数百年程度の期間ではあるが、拡散バリアとしての機能を喪失し、放射性核種を含む恐れのある処分場内の間隙水を30%～40%以上放出する点である。これは可溶性核種について、廃棄体等による核種放出抑制機能が期待できない場合、影響が大きいことが考えられる。

以上のようにガスの発生による処分場内でのガスの蓄積は、周辺のバリアの気体透過特性によって大きく影響され、また放出されたガスは地下水の移行に対しても影響を及ぼすことが明らかとなった。今後は上述のように2相流パラメータの収集に努めると共に、ガス、間隙水の移行を放射性核種の移行評価に関連付けた評価を実施する必要がある。また処分場内の圧力上昇による物理的影響、ガス放出デバイスの効果等についても評価を行う必要があろう。

3.3.3 サイロタイプでのガスの蓄積

ここで、廃棄体及び各バリアの状態は、それぞれ処分場内とその近傍の以下に示す位置の数値で代表させている。

- ・廃棄体；サイロ中央部、図3-2の廃棄体充填材ゾーン左上端部コーナー、
サイロ中心軸からの距離=2.5[m]
- ・構造物；躯体側面部、図3-2の躯体ゾーン側面上部、サイロ中心軸からの
距離=13[m]
- ・緩衝材；ベントナイト側面部、図3-2のベントナイトゾーン側面上部、サ
イロ中心軸からの距離=14.25[m]
- ・緩み領域；緩み域側面部、図3-2の緩み域側面上部、サイロ中心軸からの距

離 = 30.0 [m]

- ・母 岩 ; 廃棄体, 車体, 緩衝材, 緩み領域の対象メッシュ水平延長線上のメッシュ, サイロ中心軸からの距離 = 75.0 [m]

ケース1はボルトタイプと同じであり, 緩衝材の絶対透過係数を $1.0 \times 10^{-18} [\text{m}^2]$ とし, 毛管圧の影響を考慮しないこととしたケースである。ケース2は, 表3-1に示すように緩衝材の絶対透過係数を $1.0 \times 10^{-18} [\text{m}^2]$ とし, 毛管圧の影響を考慮したケースである。その他の試算条件についてはケース1と同一とした。また, ケース3は, 緩衝材の絶対透過係数を $1.0 \times 10^{-19} [\text{m}^2]$ とし, 毛管圧の影響については無視したケースである。

ケース1の結果について間隙圧力の上昇を図3-7に示す。ボルトタイプと同様, 絶対透過係数の最も小さい緩衝材層の内側にある廃棄体及び構造物ゾーンの圧力が最も高い。前述のようにサイロタイプでは廃棄体ゾーン平均のガス発生速度をボルトタイプの1/3としているため, 圧力の上昇が緩慢であり, 約200年間の評価期間内にはピーク値が観察されなかった。

図3-8は間隙中のガスの飽和度の変化を示している。上記のようにガスの発生速度が小さいためガス蓄積の初期段階にあり, ガス飽和度はガスの発生源である廃棄体ゾーンで約14%に達したところである。

3.3.4 サイロタイプでのガスの移行

サイロタイプ処分場に対する上記3ケースについて, 最大圧力の経時変化を図3-9に示した。

緩衝材の絶対透過係数を $1.0 \times 10^{-18} [\text{m}^2]$ としたケース1に比較してこれを $1.0 \times 10^{-19} [\text{m}^2]$ としたケース3では, 処分施設内の最大圧力が約2.7[MPa]まで上昇している。また, 各バリア層中の2相流評価において毛管圧の影響を考慮したケース2でも, 約2.7[MPa]まで上昇しているが, この段階ではケース2と3の挙動に明確な相異は現われていない。

図3-10にケース1の各バリア層における間隙水の線流速の経時変化を示す。気泡の放出によって各バリア内の間隙水流速が影響を受けたことが明らかである。ボルトタイプと比較すると緩衝材中の間隙水流速は, 0.007[m/y]と小さい値で定常的に推移している。これはガス放出速度が小さいためと考えられるが, 今後より長期の評価を実施し確認する必要があろう。いずれにしても緩衝材の拡散バリア機能は

喪失しており、放射性核種を含む処分場内の間隙水は短期間に放出される可能性がある。

以上のようにガスの発生速度が小さい場合には、ピーク圧力、ピーク放出フラックスに達する期間が長期化することが明らかであり、適正なガス発生速度を評価する必要があるほか、この場合には人工バリア性能の経時変化との関係を考慮して評価を行わねばならない場合もある。

3.3.5 今後の課題

以上、本試算による検討を基に得られた今後の課題を以下にまとめた。

○評価パラメータ、データ取得

- ・各種バリア材、地層物質に対する絶対透過係数の把握
- ・各バリアの間隙水飽和度と透過係数、毛管圧との関係の明確化
- ・適正なガス発生速度の評価

○評価条件

- ・処分場閉鎖後の再冠水挙動を含めた、ガス発生の影響に対する評価
- ・地下水流れ場におけるガスの放出による地下水理への影響に対する評価
- ・重力の効果を考慮し、気泡の比重差による上昇移行に対する評価
- ・より長期の移行挙動の評価

○評価モデル

- ・溶質の移行との連成による、放射性核種の移行の直接評価
- ・ガスの種類により、地下水中溶存成分等との地球化学的反応との連成

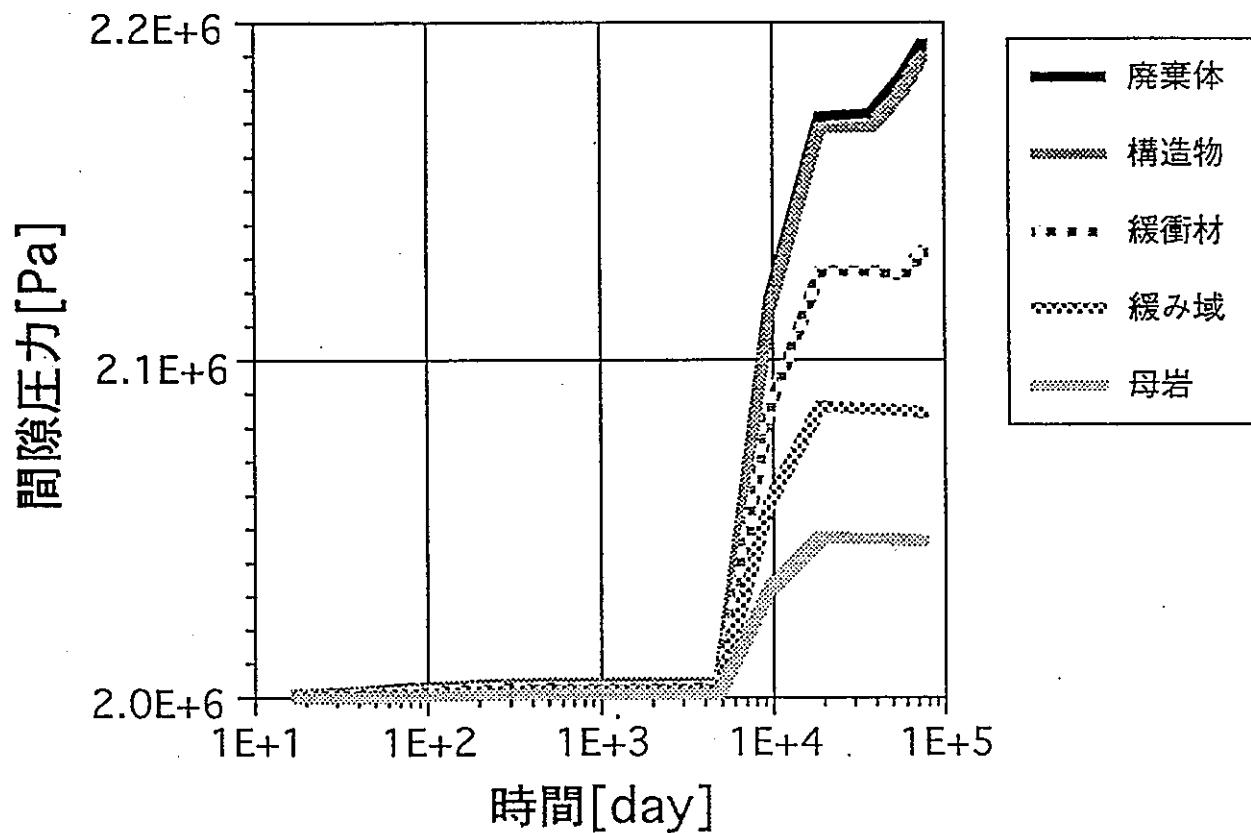


図3-7 圧力の経時変化（サイロ、ケース1）

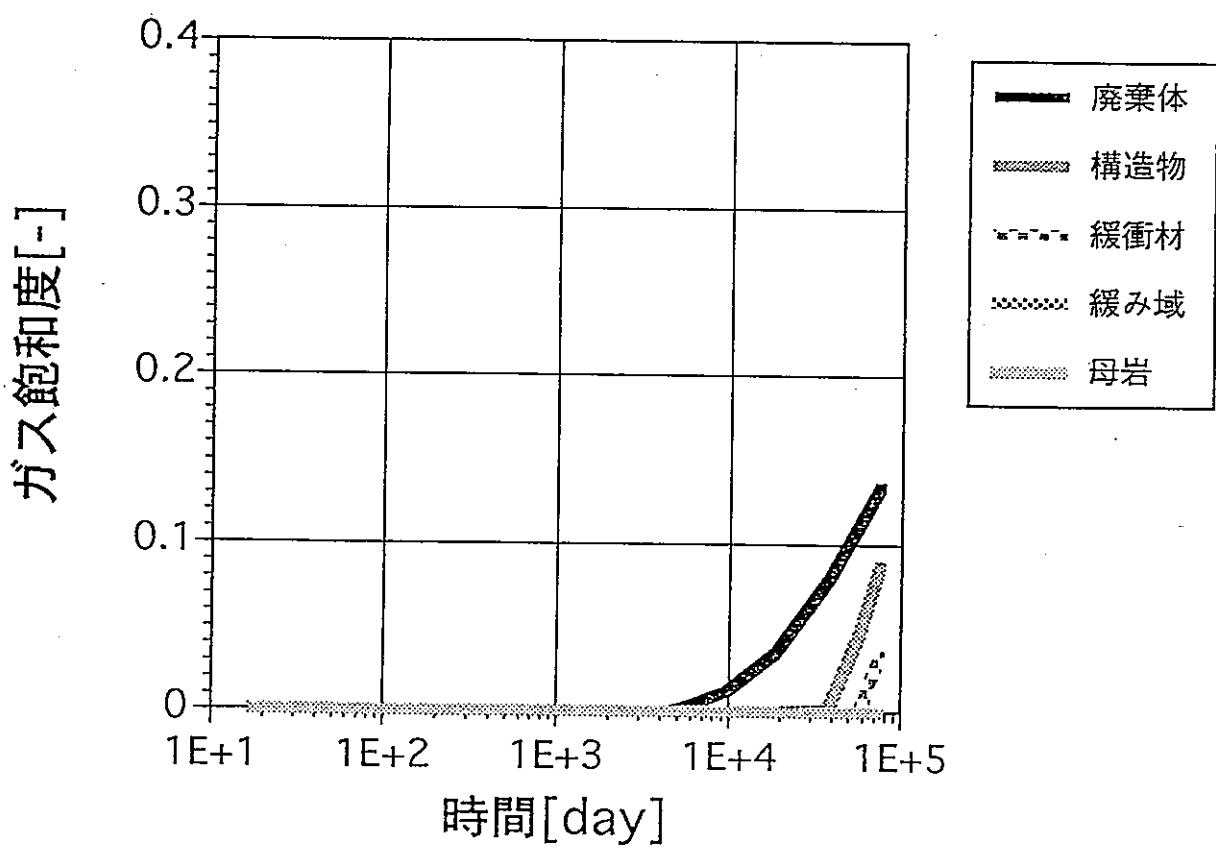


図3-8 ガス飽和度の経時変化（サイロ、ケース1）

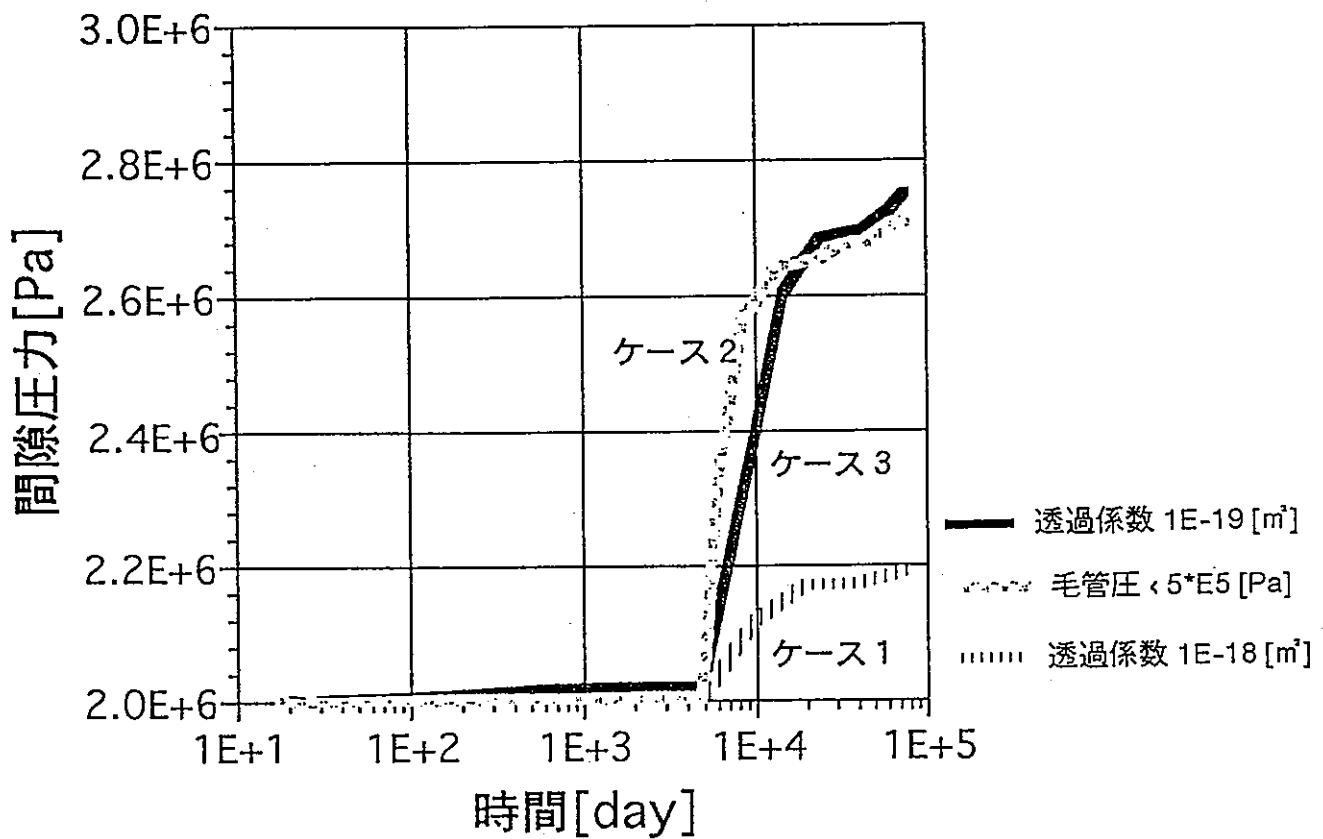


図3-9 各ケースの最大圧力の経時変化（サイロ）

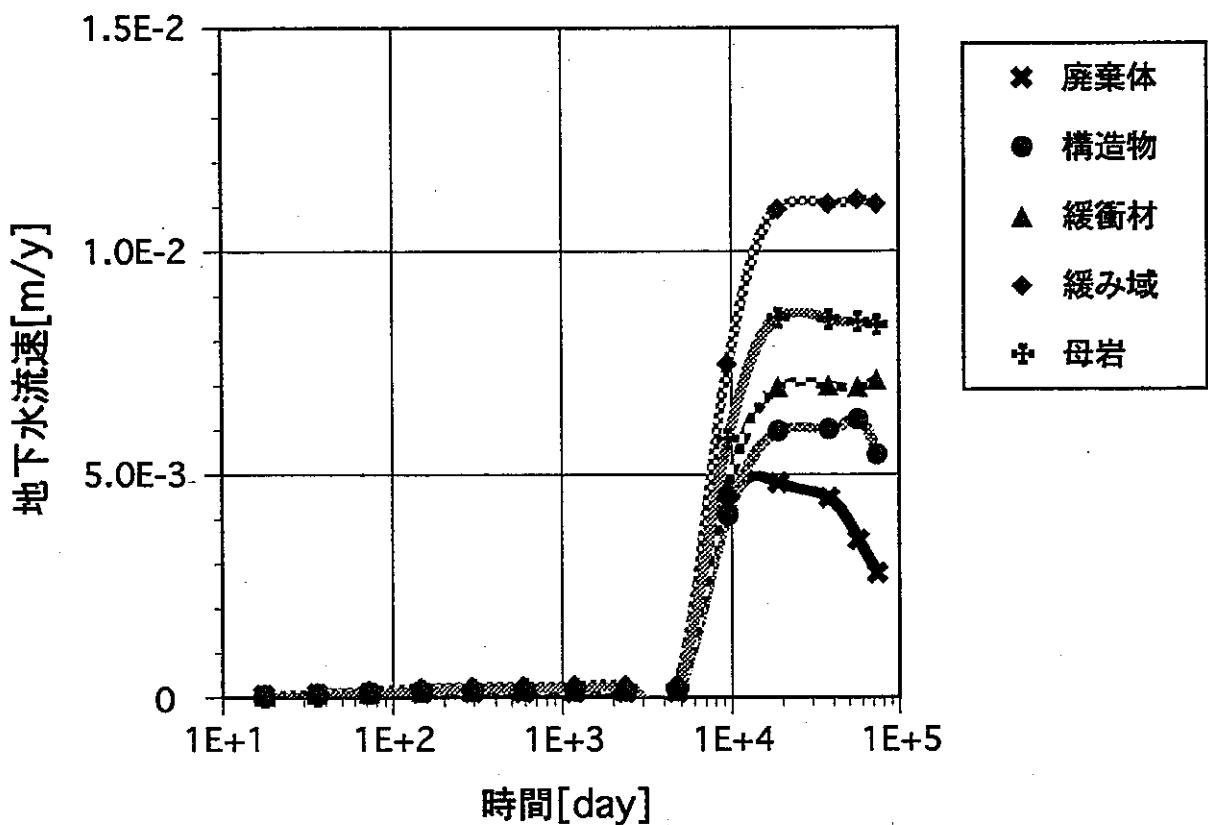


図3-10 間隙水流速の経時変化（サイロ，ケース1）

4. 全体性能評価手法の開発検討及び研究開発課題の摘出

本章では、TRU廃棄物処分システム全体の性能を評価する手法の体系概念、及び評価手法確立までの手順や体系化の検討を行うと共に、必要となる研究開発課題の摘出、開発工程の検討を行った。

4.1 総合的性能評価手法の検討

本検討ではTRU廃棄物の処分研究開発として研究開発課題とすべき個別現象の摘出、及びモデル体系の検討は、これまでにシナリオ解析がある程度行われている地下水移行シナリオを中心として行った。

4.1.1 総合的性能評価概念の検討

ここでは高レベル放射性廃棄物の地層処分に対する総合的性能評価システム体系を参考として、我が国におけるTRU廃棄物処分に対する総合的性能評価に係るシステム体系の概念について検討した。

地下水移行シナリオについて、OECD/NEAのワーキンググループが例示したモデルチェインの考え方従い、また、前述の高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に係るシステム体系を基礎として、必要なモデルの組合せを各評価モデルの入出力データの流れと関連づけて体系化を行った。この結果を総合的性能評価システム概念と体系として図4-1, 2に示した。

総合的性能評価システム体系のイメージをより明確にするため、内外の既存の評価モデルを用いて具体的に構成した一例を以下に示す。地下水理、核種移行を直接評価する「全体システム評価モデル」と、これらのモデル構築の基礎及び評価条件を設定する「現象解析モデル」の観点から各評価モデルを分類した。さらに、評価体系に組み込まれている各解析コードの相互関連を関係付けたものを図4-3に例示した。

今後は、我が国を含めた各国の性能評価モデル及びそれらによって構成される評価システム体系を参考とし、それらを構成する各種現象に対する評価モデルを組合せ、また必要な解析モデルを開発、整備することにより、我が国におけるTRU廃棄物処分の総合的性能評価システムの構築を推進する必要がある。

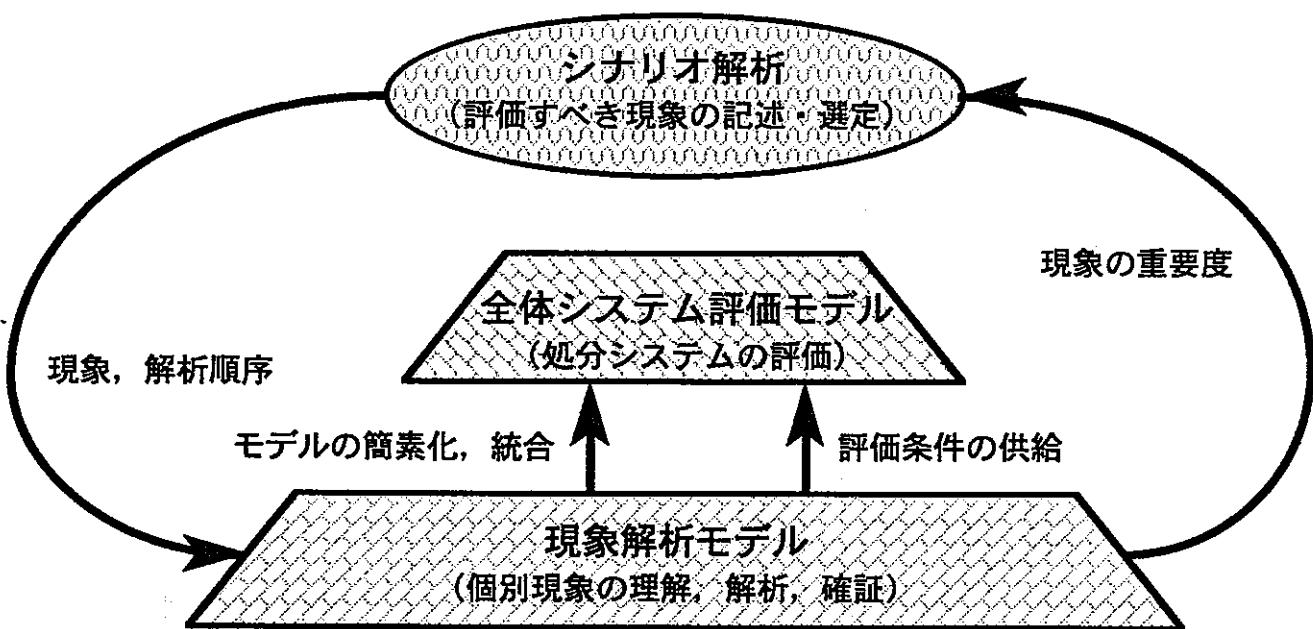


図4-1 TRU廃棄物処分の総合的性能評価システム概念

接近シナリオ

- 地球外を原因とする現象 ; 噴石、太陽活動等
- 地球内の原因による現象 ; 地質、気候
地形、人間活動
地質水文等

発端事象 → 影響評価モデル
発生確率評価モデル

生活圏の核種濃度

地下水シナリオ

広域／処分場近傍
地下水流动
(ファーフィールド)ニアフィールド
地下水流动廃棄体からの
核種溶出緩衝材中の
核種移行構造物、ゆるみ領域の
核種移行地層中の
核種移行生物圏中の
核種移行、被爆

- ・2／3次元水理解析
モデル
多孔質媒体
亀裂性媒体
(飽和、不飽和)

- ・2/3次元水理解析
モデル
ゆるみ領域、構造
物緩衝材
(飽和、不飽和)

- ・核種浸出モデル
・固化媒体溶解モデル
(・容器腐食モデル)

- ・核種移行モデル
(拡散、吸着)
(移流分散、吸着)
(分配平衡)
(飽和、不飽和)

- ・核種移行モデル
(拡散、吸着)
(移流分散、吸着)
(分配平衡)
(飽和、不飽和)

- ・核種移行モデル
(移流分散、吸着)
(マトリクス拡散)
(飽和、不飽和)
(均質、不均質)
多孔質媒体
亀裂性媒体

- ・食物連鎖モデル
(摂取、吸入)
(外部被爆)

動水勾配
地下水流量／流速地下水流量／流速
物質移行メカニズム
再冠水現象間隙水中核種濃度
核種放出量間隙水中核種濃度
核種放出量間隙水中核種濃度
核種放出量間隙水中核種濃度
核種放出量実効線量
リスク

現象解析モデル/データ

廃棄物の発熱
による影響

熱解析モデル

温度分布
熱流速放射線による
影響放射線分解評価モデル
(廃棄体、緩衝材、水)分解生成物量
(ガス、酸化物等)
etc.金属腐食によ
る影響腐食モデル
(酸化／還元性雰囲気)
鉄、鉄合金、他
全面／局部腐食腐食速度
腐食生成物発生量
(ガス、酸化物等)
 O_2 / H_2O 消費量微生物による
影響微生物活動モデル
(栄養／エネルギーの
消費)
代謝産物の生成
核種への作用栄養／エネルギー消費量
(劣化、酸化／還元量)
代謝産物生成量
(ガス、酸、他、イオン)
取込核種量地球化学モデル
(鉱物／水、鉱物／鉱物、
鉱物／有機物、ガス／水
等の反応)

(平衡論、速度論)

(放射性核種、鉱物
腐食生成物、有機物
コロイド、錯体)地下水化学条件
(pH, Eh
溶存イオン濃度
析出量
存在化学種
etc.)地下水の地球化
的条件による影響

ガス発生の影響

ガス蓄積／移行モデル
(二相流評価)
(ガス溶存、吸着)
(移流拡散)間隙圧力
間隙水飽和度
ガス流量／流速
地下流量／流速人工バリアの
構造力学的安全性応力解析モデル
圧密、粘弾塑性モデル
クリープモデル
(廃棄体、
緩衝材、
構造物、岩盤)各部応力、変形
廃棄体変位
構造物沈下
破壊安全性

□ : 評価対象領域、項目

← : データの流れ

□ : 評価モデル

□ : 評価データ・指標

図4-2 TRU廃棄物処分の総合的性能評価システム体系

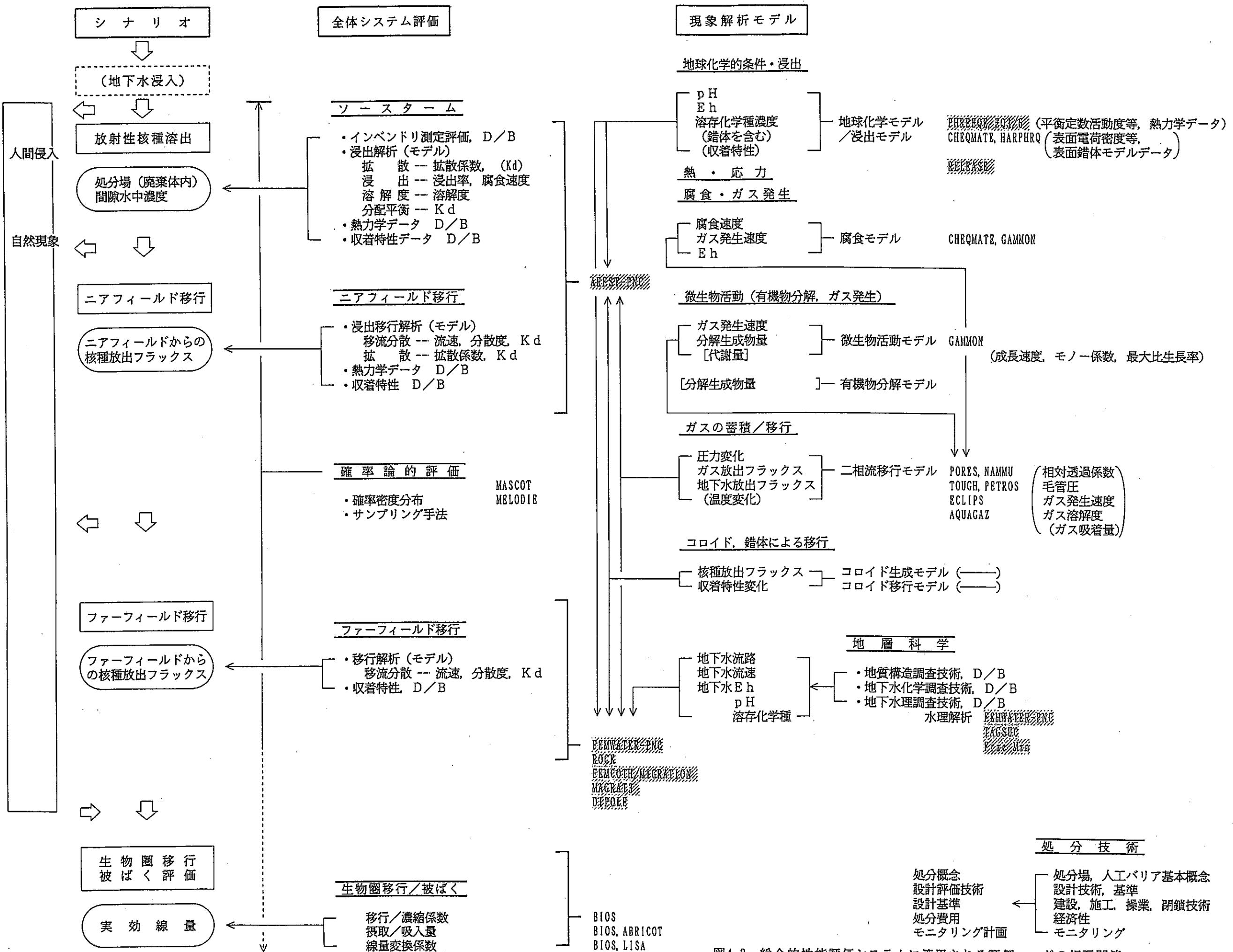


図4-3 総合的性能評価システムに適用される評価コードの相互関連

4.1.2 総合的性能評価システム確立手順の検討

本項では、4.1.1項において概念を示したTRU廃棄物処分の総合的な性能評価システムについて、同評価システムを確立するまでの手順に対して検討を行った。総合的性能評価システムの整備手順を簡潔に図4-4に示した。

4.2 研究開発課題の抽出と開発工程の検討

4.2.1 研究開発課題の抽出

前節で検討を行った総合的性能評価システムの整備手順に従い、第1章において選定された評価対象シナリオの評価に必要なモデル開発をはじめとする研究開発項目を抽出し、これらについて既存の評価手法、今後高レベル放射性廃棄物の地層処分開発研究において開発予定の評価手法、及び特性データ等についてその適用性、導入の有効性について検討を行い、TRU廃棄物処分の研究開発として開発すべき項目の絞り込みを行った。

高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発等から取り込みが可能な研究開発課題の主だったものとして、以下の項目が抽出されている。

シナリオ解析；地下水理、地下水化学、地球化学的影響、鋼製容器の腐食に関するニアフィールド核種移行シナリオ、天然有機物の存在によるファーフィールド核種移行シナリオ、地層処分における直接放出／人間侵入シナリオの一部または全部

ニアフィールド性能評価

；地下水理解析、炭素鋼腐食、水の放射線分解、熱解析、ベントナイトの膨潤、岩石のクリープ変形、応力解析、廃棄体からの核種浸出、地球化学的評価、バリア材吸着特性、核種溶解度の解析技術、特性データの一部または全部

ファーフィールド性能評価

；広域水理／地質評価、核種の移流分散、地球化学的評価、天然コロイドの影響、バリア材吸着特性の解析技術、特性データの一部または全部

以上の結果よりTRU廃棄物の処分研究として独自に研究開発を実施すべき項目を選定し、表4-1に整理した。

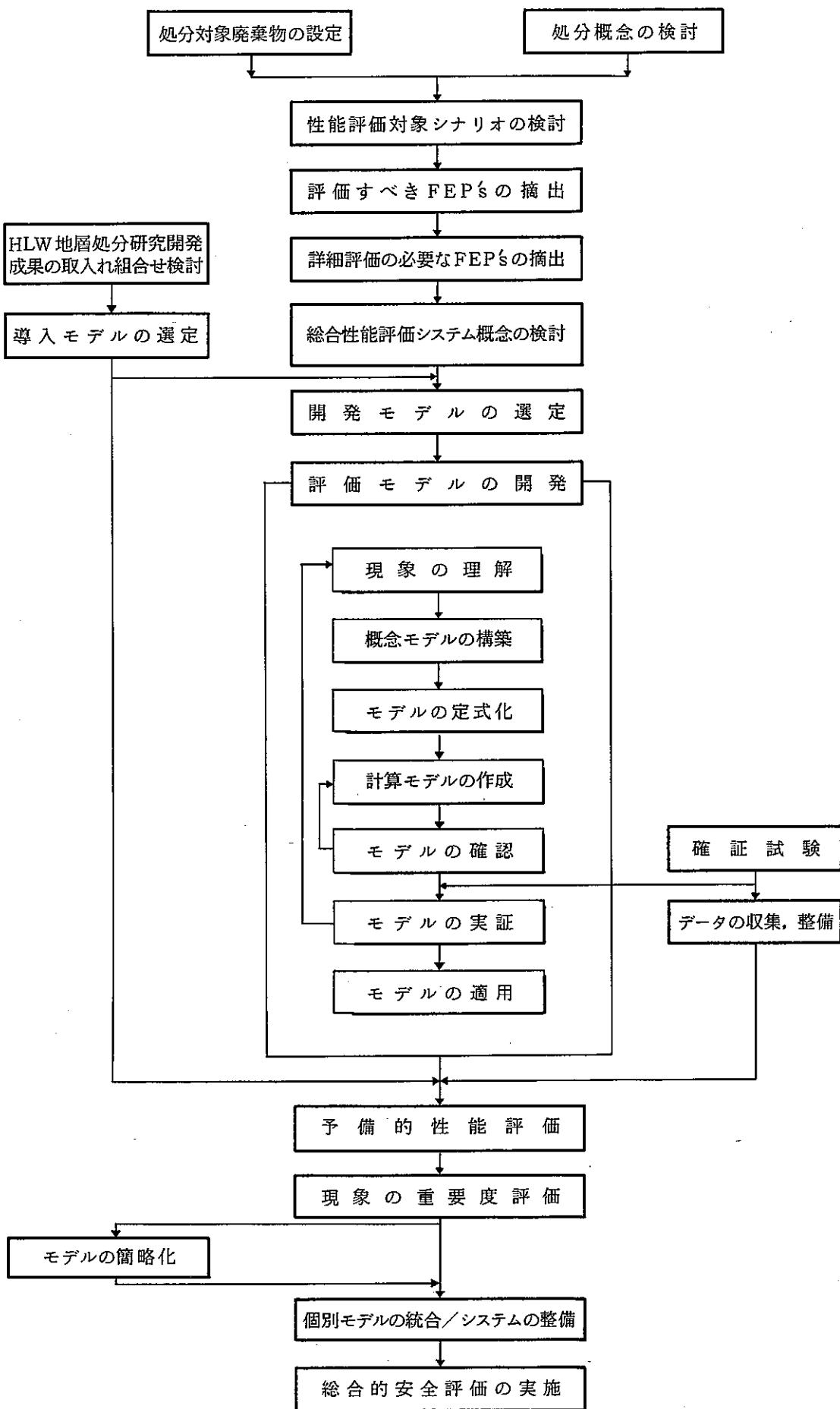
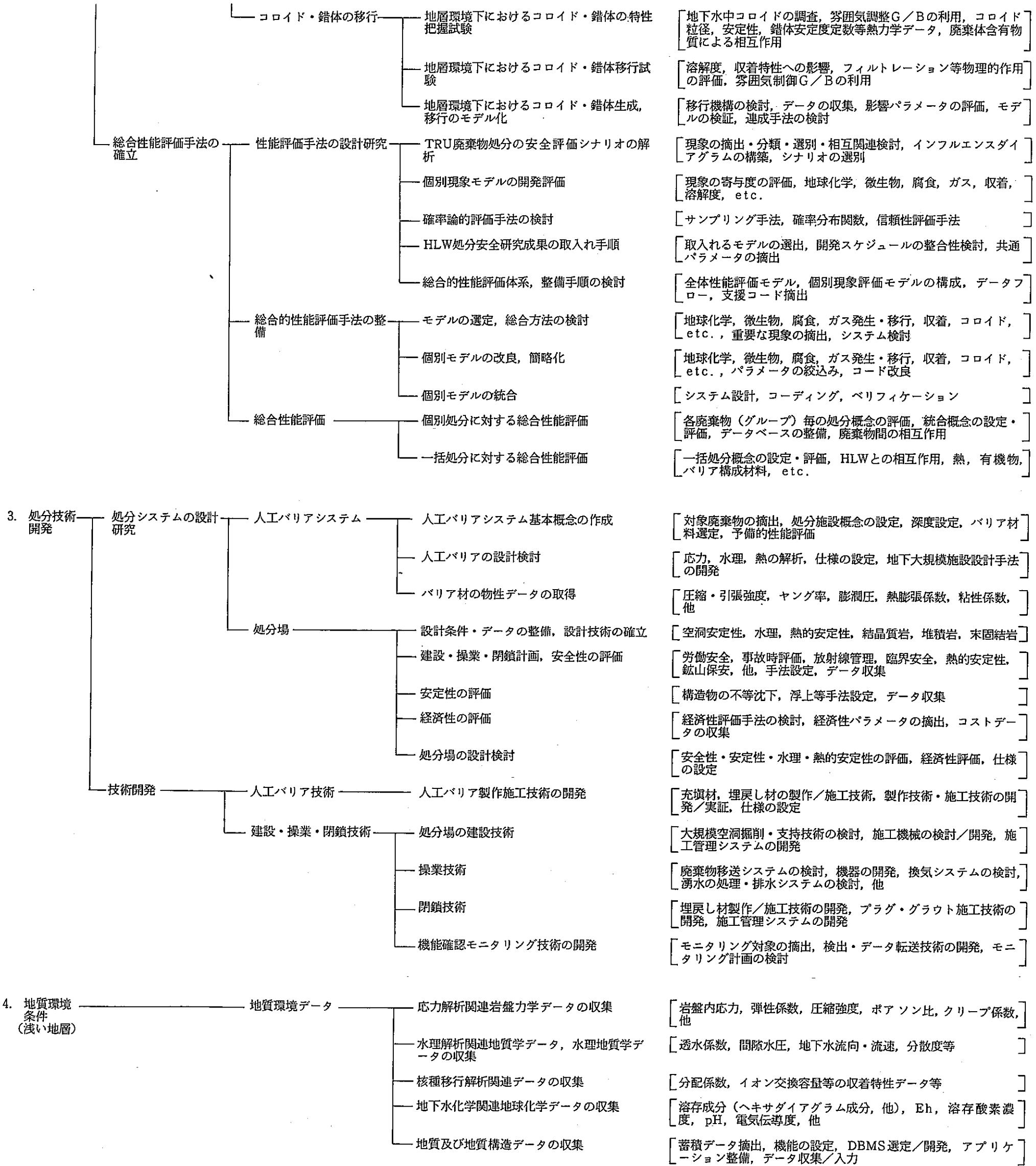


図4-4 TRU廃棄物処分の総合的性能評価システム整備手順

表4-1 T R U 廃棄物処分研究開発課題

1. 廃棄体特性評価	各種廃棄体特性調査	核種インベントリ	測定対象核種の摘出 分析・測定方法の検討 非破壊測定システムの開発 核種濃度確認手法の検討 分析・測定、データ解析	[核種組成の設定、長期毒性算定、潜在影響度評価] [サンプリング方法、試料調整方法、測定技術・装置選定] [パッシブX線法、パッシブ中性子法、アクティブ中性子法、ラジオグラフィー、トモグラフィー] [スケーリングファクタ法等によるインベントリ決定システム] [測定、データベース化] [貯蔵・輸送・処分各段階での安全確保要件、安全評価、特性試験対象選定] [形状、寸法、重量、密度、間隙率、機械的強度、熱的特性、線量率等、サンプリング方法、測定技術] [測定、データベース化] [化学組成、分子構造、吸着性、サンプリング／測定技術] [溶解度／吸着性への影響物質の選定] [金属、セルロース、プラスチック類、錯化剤、NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , CO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ , 他、雰囲気制御G/B利用] [測定、データベース化] [溶解度調査、化学形による溶解度変化] [化合物形態、固相中化学形分析技術、雰囲気制御G/Bの利用] [測定、データベース化]
	物理的特性		評価項目、基準・規格の整備 特性評価手法の検討 測定、データ解析	[形状、寸法、重量、密度、間隙率、機械的強度、熱的特性、線量率等、サンプリング方法、測定技術] [測定、データベース化]
	化学的特性		廃棄体構成物質の調査検討 長期性能影響物質の摘出 分析・測定方法の検討 分析・測定、データ解析 化学形分析対象核種選定 分析測定方法の検討 分析・測定、データ解析	[化学組成、分子構造、吸着性、サンプリング／測定技術] [溶解度／吸着性への影響物質の選定] [金属、セルロース、プラスチック類、錯化剤、NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , CO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ , 他、雰囲気制御G/B利用] [測定、データベース化] [溶解度調査、化学形による溶解度変化] [化合物形態、固相中化学形分析技術、雰囲気制御G/Bの利用] [測定、データベース化]
	廃棄体技術開発	廃棄体製造技術	廃棄体製造技術の開発	[廃棄体要求性能の設定、減容固化技術選定、実証試験]
		品質保証技術	品質保証体系の検討整備	[品質管理因子の選定、測定・評価方法の標準化、検査確認体制]
	2. 性能評価研究	シナリオ研究	地下水移行シナリオの検討(ニア) 地下水移行シナリオの検討(ファー) 気体状核種移行シナリオの検討	[廃棄体特性・バリア構成を基礎、FEP's] [ガス、有機物の影響、特有核種、FEP's] [FEP'sの摘出・選定・組合せ、評価モデル、条件の選定] [FEP'sの摘出・選定・組合せ、評価モデル、条件の設定、深度の変化による影響] [生起確率、モデルパラメータ、データベース化]
		隔離性研究	人間接近シナリオの影響 浅地層処分に対する自然現象の影響 データ収集	[FEP'sの摘出・選定・組合せ、評価モデル、条件の選定] [FEP'sの摘出・選定・組合せ、評価モデル、条件の設定、深度の変化による影響] [生起確率、モデルパラメータ、データベース化]
		ニアフィールド性能評価		
	i) ニアフィールド環境条件評価	コンクリートの化学的緩衝作用	化学的緩衝作用の機構の検討 化学的緩衝性評価モデルの開発 化学的緩衝作用確認試験 コンクリートのナチュラルアナログ	[高pH維持機構の検討、Ca(OH) ₂ 溶解、セメント水和物溶解] [溶解反応の設定、平衡定数、その他熱力学データの収集、pHvs時間の評価] [セメント組成/地下水組成の影響確認、雰囲気制御G/Bの利用、評価モデルの検証] [コンクリート等の長期組成変化把握、評価モデルの検証] [Eh, pH変化、評価モデル検討、評価モデルの検証]
		腐食、微生物の影響評価	金属腐食による地球化学的条件への影響評価 微生物活動による地球化学的条件への影響評価	[Eh, pH変化, SO ₄ ²⁻ 生成等、微生物活動モデルの検討/検証] [金属腐食反応、微生物活動機構、放射線分解] [金属腐食モデル(腐食速度、熱力学データ、Eh・H ₂ 分圧等の影響)、微生物活動モデル(速度論データ、代謝反応、pH・O ₂ 濃度等の影響)、放射線分解(吸収線量、G値)]
		ガス発生	ガス発生機構の調査 気体発生評価モデルの開発 ガス発生評価試験 ガス発生抑制技術の開発	[腐食試験、微生物培養試験等、雰囲気制御G/Bの利用、モデル検証] [反応の制御、ガスの消費/吸着等] [廃棄体特性・バリア構成等を考慮したデータ収集、評価]
		熱、応力、水理条件	温度、応力、水理条件評価	[均質/不均質固化体、化学バリア、物理的閉込め、拡散バリア、他] [対象元素選定、対象化学物質選定、雰囲気制御G/Bの利用、浸出率、拡散係数、分配係数、表面錯体モデルパラメータ] [セメント/ペントナイト成分、有機物、有機塩類、pH/Eh変化] [浸出率、拡散、腐食溶解、溶解度限界、他、劣化影響] [長期浸出試験、浸出挙動のモデル化(浸出率、拡散、腐食溶解、個別要素モデル、次元解析、確率論)]
	ii) 固化体からの核種放出	廃棄体からの放射性核種の浸出	各種廃棄体に期待すべき機能の検討 処分環境下長期浸出試験 長期浸出制限機能影響因子の確認 長期浸出挙動のモデル化 不均質廃棄物の浸出挙動 固化媒体のナチュラルアナログ	[天然類似現象の摘出、データ収集、モデル検証]

iii) 人工バリア及び周辺岩盤中の核種移行に関する研究	拡散移行	充填材材料の選定 透水試験 処分環境下拡散特性試験 低拡散材料の開発	[セメント／コンクリート, ベントナイト／粘土等] [拡散バリア機能の確認, 透水係数] [対象元素選定, 霧囲気制御G／Bの利用, 見かけの拡散定数, pH, Eh等影響因子の確認] [主にI等陰イオンの移行を抑制する材料]
	溶解度	処分環境下溶解度試験 溶解度影響物質の摘出 地球化学モデルの開発, 検証	[測定対象元素・化学形の選定, 霧囲気制御G／Bの利用, 热力学データの収集] [Eh, pH, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ 等共存イオン, 錯化剤, 他] [溶解モデルの設定, 収集データを用いたモデルの検証]
	吸着特性	吸着性を期待すべき人工バリア材料の選定 吸着性影響物質の摘出 処分環境下吸着特性試験 吸着モデルの開発／適用 高吸着性材料の開発	[セメント／コンクリート, ベントナイト／粘土等] [Eh, pH, 有機物及びその劣化生成物, 錯化剤, その他共存イオン] [測定対象元素の選定(I, Cを含む), バッチ法, カラム法, 拡散法, 分配係数, イオン交換容量, 表面錯体モデルパラメータ] [データの収集, モデルの検証, 影響物質の評価] [主にI等陰イオンに対する吸着特性の改善]
	コロイド生成・移行	処分環境下コロイド・錯体の生成, 特性把握試験 コロイド・錯体生成への地球化学モデルの適用, 検証 処分場環境下コロイド錯体移行試験 コロイド・錯体移行モデルの開発, 検証 コロイド・錯体生成／移行モデルの連成, 検証	[コロイド・錯体形成物質の摘出, 霧囲気制御G／Bの利用, コロイド粒径／安定性, 錯体安定度定数等熱力学データ, 地球化学モデルの検証] [反応機構の設定, 热力学データの適用, 影響パラメータの評価] [溶解度, 吸着特性への影響, フィルトレーション等物理的作用の評価, 霧囲気制御G／Bの利用] [移行機構の検討, データの収集, 影響パラメータの評価] [連成手法の検討(物質収支式への組込み, ステップバイステップ)]
	ガスの蓄積移行	人工バリアの透気試験 ガス蓄積影響因子の確認 ガス(水)移行評価モデルの開発 内圧上昇によるバリアへの力学的影響評価 ガスの移行による核種移行への影響評価	[試験対象人工バリア材の選定, H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , 移行モデルの検証, 母岩ゆるみ域での透気性試験, 毛管圧力, 透過係数] [バリア材によるガス吸着, 水への溶解等] [二相流評価モデル, 龟裂媒体中での移行] [ガス蓄積量の評価, 破壊圧力, 破壊の影響] [気体放射性核種, 水中放射性核種, 吸着特性との連成]
	バリア材の劣化	性能劣化機構と影響因子の調査 セメント／コンクリートの性能劣化試験 ベントナイト／粘土鉱物の性能劣化試験 ナチュラルアナログ 劣化生成物の生成機構に関する調査 微生物活動モデルの調査, 開発 腐食生成物評価モデルの調査開発 性能劣化モデルの整備	[セメント／コンクリートの化学的緩衝作用・吸着特性, ベントナイト／粘土の吸着特性・拡散バリア特性, その他材料, pH, 共存イオン等による影響の調査検討] [劣化加速試験, CO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ 等共存イオン, Eh, 微生物, 廃棄物・充填材との相互作用, 吸着特性変化] [劣化加速試験, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ 等共存イオン, pH, Eh, 廃棄物・充填材との相互作用, 吸着／拡散バリア特性変化] [天然類似現象に対する調査, 劣化機構の検討, 劣化モデルの検証] [微生物活動, 有機物の化学分解, 金属の腐食, 劣化機構, 劣化生成物の摘出, 拡散／吸着性変化] [代謝特性, エネルギー収支, エネルギー源, 栄養源, 生長率等のデータ収集, 物質の消費と代謝産物の生成を評価] [地球化学モデルによる腐食生成物評価手法の整備, 热力学データの収集] [劣化機構の定量化, モデルの開発, データ収集, データベース化, 性能劣化, 劣化生成物]
	特有核種に対する対策	I-129, C-14の移行抑制バリアの開発	[高吸着性, 低透水性バリア, 低溶解度化学形処理技術子]
	ファーフィールド性能評価		
i) ファーフィールド環境条件評価	ガスの移行	岩石中のガス透過性試験 ガス(水)移行モデルの整備 内圧上昇によるバリアへの力学的影響評価 ガスの移行による核種移行への影響評価	[代表的地層物質(岩石)の選定, H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , 移行モデルの検証, 透過係数, 毛管圧力] [二相流評価モデル, 龟裂媒体中移行] [ガス蓄積量の評価, 破壊圧力, 破壊の影響] [気体放射性核種, 吸着挙動との連成]
	広域水理	不飽和帯における核種移行評価	[移行モデルの調査／開発, 確証試験, データ収集, データベース化, モデルの検証]
ii) 地層中の核種移行に関する研究	吸着特性	吸着特性影響物質の摘出 ニアフィールド物質による影響評価 影響物質存在下吸着特性試験 影響物質の移行に関する試験, 評価 地球化学解析コードの適用	[フミン物質等天然有機物, 廃棄物・人工バリア起因の物質, CO ₃ ²⁻ 等錯体形成物質, pH, Eh等影響調査] [セメント／コンクリートによる化学的緩衝作用, その他影響物質の移行試験] [測定対象元素の選定(I, Cを含む), バッチ法, カラム法, 拡散法, 分配係数, イオン交換容量, 表面錯体モデルパラメータ, pH, 有機物等錯化剤, その他共存イオン] [pH, 有機物等錯化剤, その他共存イオン, 吸着特性試験, 拡散／移流移行試験] [データ収集, モデル検証, 影響物質の評価]



4.2.2 開発工程の検討

前項において摘出された研究開発項目については、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発に関する工程を参考とすることにより、基本的に以下の方針に従って研究開発を進めるものとして検討した。

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発計画は平成10年を目処に、ニアフィールドの定量的評価、及びファーフィールドの概略的評価について第2次中間取りまとめを行う予定とする。したがって、TRU廃棄物の処分研究としては、平成10年ころを目処に“廃棄体特性評価”を優先的に実施し、性能評価の基本データ、評価対象の特性を明確化する。

並行して処分技術開発のうち処分システムの概念を検討し、性能評価対象とすべき現象の抽出、整理を行い、性能評価シナリオを構築する。さらに、これらに対して評価モデルの整備を行いつつ、予備的な性能評価を実施しその重要度を把握、評価することにより最終的に総合的性能評価システムに組み込むべきモデルを開発、選択していく。

また一方、微生物活動、コロイドの影響等現状において知見の乏しい課題については、相対的に長期の研究開発期間を必要とすると予想されるところから、早急に基礎的な研究開発から立上げるものとする。

最終的には高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発計画が平成15年を目処にニアフィールド及びファーフィールドの定量的評価を取りまとめ、最終報告を行う予定であり、これと時期を合わせ、最終的には平成15年を目処に研究開発を鋭意実施し、処分システムの総合性能評価手法の確率を図るものとする。

以上の工程を図4-5に示した。

項目	平成										
	5年	6年	7年	8年	9年	10年	11年	12年	13年	14年	15年
I ソースターム研究											
1. 廃棄体特性調査	平成10年度を目処に主体的に実施										
2. 廃棄体技術開発											
II 性能評価研究											
1. シナリオ研究	廃棄体特性調査と並行して実施										
2. 隔離性研究											
3. ニアフィールド 性能評価	平成15年を目処に総合的性能評価手法を整備 微生物活動、コロイド等の影響は基礎的な情報収集から開始 評価モデルの整備、予備的性能評価、モデルの開発・改良・統合化										
4. ファーフィールド 性能評価	平成15年を目処に総合的性能評価手法を整備										
III 処分技術開発	平成15年を目処にシステムの具体化を図る 性能評価研究の進展に応じて設計研究、経済性評価、建設・施工技術開発を実施										
IV 地質環境条件	TRU廃棄物に特有の処分条件に対して実施										

△ HLW第2次中間取り纏め

△ HLW取り纏め

図4-5 TRU廃棄物処分研究開発概略工程