

TRU廃棄物の特性を考慮した 人工バリアシステムの検討 (II)

成果概要

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1993年2月

三菱マテリアル株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱には十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。また今回の配布目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術管理部 技術情報室

TRU廃棄物の特性を考慮した人工バリアシステムの検討（Ⅱ）

田中 皓*

要旨

本研究は、TRU廃棄物の人工バリアシステムの構築を目的として、化学的なバリアとしての観点からと、工学的観点から人工バリアシステムの検討を実施し、その結果から設定した人工バリアシステムのTRU廃棄物に対する性能を評価したものである。化学的バリアの観点からは、主要な化学的劣化機構であるベントナイトのCa型化と、コンクリート空隙水中のpH環境の変化について、物質移行と化学反応を連成させた解析を行った。工学的観点からは、TRU廃棄物発生量と各国の処分施設の調査をもとに我が国におけるTRU廃棄物処分施設場の概念を設定、その建設性について検討した。

その結果、イオン交換モデルで評価した場合、ベントナイトのCa型化はベントナイトの厚さが2mでも数千年以内に終了し、これを避けることは困難であることがわかった。コンクリート空隙水中のpHは、時間と共に表面から徐々に低下するが、コンクリート中の深さ0.5m以深では10万年後もpH11.5以上を維持することがわかった。

工学的観点からは、処分場タイプとして坑道型、岩洞型、サイロ型を、岩種として軟岩と硬岩を設定し、岩盤に関する力学的成立性と、施工技術の有無について検討した。

性能評価から、重要な核種、元素としてRa-226, Pu, I-129が抽出された。Ra-226とPuは、それ自身ないしはその親核種の溶解度を低下させる環境を形成できれば、放出率を低減することが可能と考えられる。I-129には、今回適用した特性値に従えば、溶解度、放出率、遅延のいずれの機構によってもその放出を抑制することが困難であり、核種閉じ込め機能のより高い廃棄体が要求される。

本報告書は、三菱マテリアル株式会社が動力炉・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：040D0200

事業団担当課及び担当者：環境技術開発部 地層処分開発室 増田 純男

*原子力技術センター 技術第2部

Studies on Engineered Barrier System for TRU Waste Isolation
with Consideration to Characters of TRU Wastes(II)

Hiroshi Tanaka*

Abstract

In this study, characteristics of TRU waste isolation is examined from chemical and engineering aspects. As the main chemical degradation phenomena of it, the change of Na-bentonite to Ca-bentonite, pH drop in the concrete and ferrous ion distribution are analysed, using coupled analysis method of mass-transfer and chemical reaction. The concept of TRU waste isolation in Japan is set up and the constructivity is examined, concerning the information of the amount of TRU waste and other countries' waste isolation concepts.

The results shows that, Na-bentonite changes to Ca-bentonite within thousands of years. The pH in the pore water in the concrete barrier gradually drops from its surface to the inside of it. Though pore water at the depth of 0.5m in the concrete maintains its pH more than 11.5 even after 100 thousands years.

From the engineering aspects, mechanical stability, constructivity and closure technology is examined on the three types of waste isolations (tunnel, large scale tunnel and silo) and two types of rocks (soft and hard).

Performance analysis shows that Ra-226, Pu and I-129 are most hazardous nuclides. Hazard of Ra-226 and Pu will be went down, if more favorable chemical environment can be formed, in which the solubilities of them are lowered.

I-129 requires more stable waste form which has smaller nuclide release rate.

Work performed by Mitsubishi Materials Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract No. : 040D0200

PNC Liaison : Masuo Masuda, Geological Isolation Technology Section, Waste Management Technology Developmentt Division

* Waste Management Technology Department, Nuclear Technology Center.

目 次

第 1 章	化学的なバリア性能の観点からの人工バリアシステムの検討	1
1. 1	化学的雰囲気の時変化等の検討	1
1. 2	バリアの厚さの検討	10
第 2 章	工学的観点からの人工バリアシステムの検討	12
2. 1	TRU廃棄物の発生量の検討	12
2. 2	処分場概念の検討	12
2. 3	我が国における処分場の建設性に関する検討	13
2. 4	まとめ	21
第 3 章	TRU廃棄物毎の人工バリアシステムの性能検討	25
3. 1	人工バリアからの核種放出モデルの検討	25
3. 2	各廃棄物毎の人工バリアシステムの予備的性能評価	25
第 4 章	TRU廃棄物の人工バリアシステムに係わる研究開発課題の抽出	30

第1章 化学的なバリア性能の観点からの人工バリアシステムの検討

TRU廃棄物の陸地処分における安全確保においては、特に、含まれる長寿命核種対策に重点を置けば、物理的な閉じ込めによる減衰に期待することは困難であり、核種の化学的な挙動に着目した化学バリアの概念を導入することが有効と考えられている。

昨年度の検討においては、化学バリア機能は経時的に変化しないものとして、人工バリアシステムの基本的な構成について検討を行った。今年度は、人工バリアシステム内部の化学的雰囲気的时间変化を考慮して人工バリアシステムの構成について検討を行った。

この検討に当たっては、化学的に雰囲気を醸し出す化学種が関与する人工バリアシステム構成材と地下水との反応、及びそれらの化学種のニアフィールドにおける物質移動を同時に取り扱うことができる地球化学的物質移動計算コードを使用した。

1.1 化学的雰囲気の時変化等の検討

1.1.1 ベントナイトのCa型化に関する検討

TRU廃棄物処分場は廃棄体又はバリア材としてセメント成分を含む材料の使用が考えられているが、これらから放出される Ca^{2+} イオンによって高濃度のCaイオン雰囲気が形成され、早期にNa型ベントナイトをCa型に交換してしまう可能性がある。そこで、ベントナイトの代表的な劣化事象としてCa型化を取り上げ、Na型ベントナイトがその性能を保持できる期間について検討する。

(1) 検討方法

処分施設の外周部として、地質媒体、ベントナイト、コンクリートバリアからなる体系を考える。ベントナイトは初期状態ではNa型であり、ここにコンクリートの溶解によって放出されたCaイオンと、地下水によって輸送されたCaイオンが拡散によって侵入しCa型化が進行する。このCa型化の速度をベントナイト層の厚さを変化させて比較することによって、必要なベントナイト層の厚さを検討することにする。

ベントナイト中の地球化学反応としては、イオン交換によるCaイオンのベントナイト表面への吸着反応と、微量成分であるCalcite(CaCO_3)の溶解反応を考慮した。また、コンクリートは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ で表現した。

解析に使用したパラメータを表1.1.1～4に示す。

Table 1.1.1 Ion exchange constants of bentonite

イオン交換反応	平衡定数の対数 (log K)
$X^- + Na^+ \rightleftharpoons XNa$	20.0
$X^- + K^+ \rightleftharpoons XK$	20.6
$2X^- + Mg^{2+} \rightleftharpoons X_2Mg$	40.2
$2X^- + Ca^{2+} \rightleftharpoons X_2Ca$	41.8

Table 1.1.2 Chemical composition of bentonite (mol/l-water)

Na ⁺	4.30×10^{-2}
K ⁺	1.10×10^{-4}
Ca ²⁺	4.00×10^{-5}
CO ₂	2.15×10^{-2}
H ⁺	0.00×10^{-0}
NaX	2.96×10^{-0}
KX	3.30×10^{-2}
CaX ₂	3.15×10^{-1}
X(total)	3.62×10^{-0}

X ; ion exchange site

Table 1.1.3 Geochemical model of groundwater

		還元性天水起源 地下水	計算に使用した 地下水
モデル 地下水 の 組成	pH	9.2	9.2
	Eh (mv)	-350	
	Na ⁺ (mol/l)	2.7×10^{-3}	2.7×10^{-3}
	K ⁺ (mol/l)	7.7×10^{-9}	-
	Ca ²⁺ (mol/l)	4.2×10^{-5}	4.6×10^{-5}
	Mg ²⁺ (mol/l)	4.1×10^{-6}	-
	Cl ⁻ (mol/l)	-	-
	SO ₄ ²⁻ (mol/l)	7.3×10^{-8}	-
	CO ₂ (total) (mol/l)	1.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}
	Fe(total) (mol/l)	3.6×10^{-8}	-
	SiO ₂ (mol/l)	2.0×10^{-4}	-
	F ⁻ (mol/l)	6.3×10^{-4}	6.3×10^{-4}
H ⁺ (mol/l)		1.64×10^{-3}	

Table 1.1.4 Characteristics of media

	岩体	ベントナイト	コンクリート
体系の長さ (m)	100.0	0.5, 1.0, 2.0	1.0
空隙率 (-)	0.5	0.33	0.33
ダルシー流速 (m/y)	1.0	0.0	0.0
実効拡散係数 (m ² /s)	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-10}
分散長 (m)	1.0	0.0	0.0

(2) 結果

図1.1.1 ~1.1.2 に、例として、ベントナイト層の厚さが0.5mの場合の液相組成とベントナイトに吸着している元素濃度の空間分布を示す。1000年においてCa化した長さは、

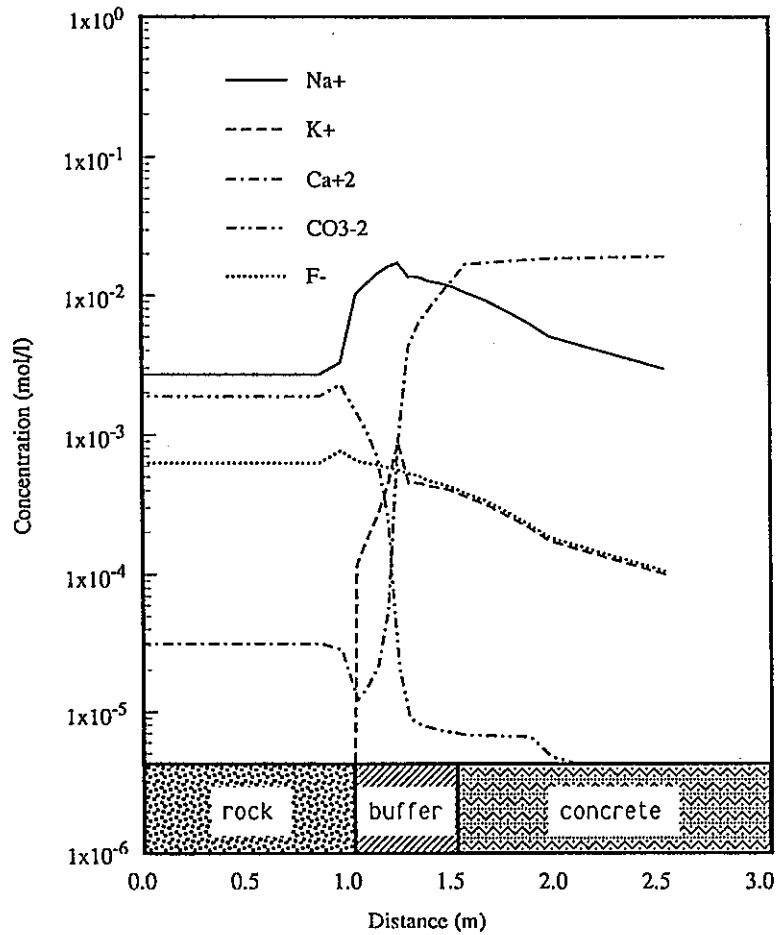


Fig. 1.1.1 Concentration profile of aquatic species at 1000y

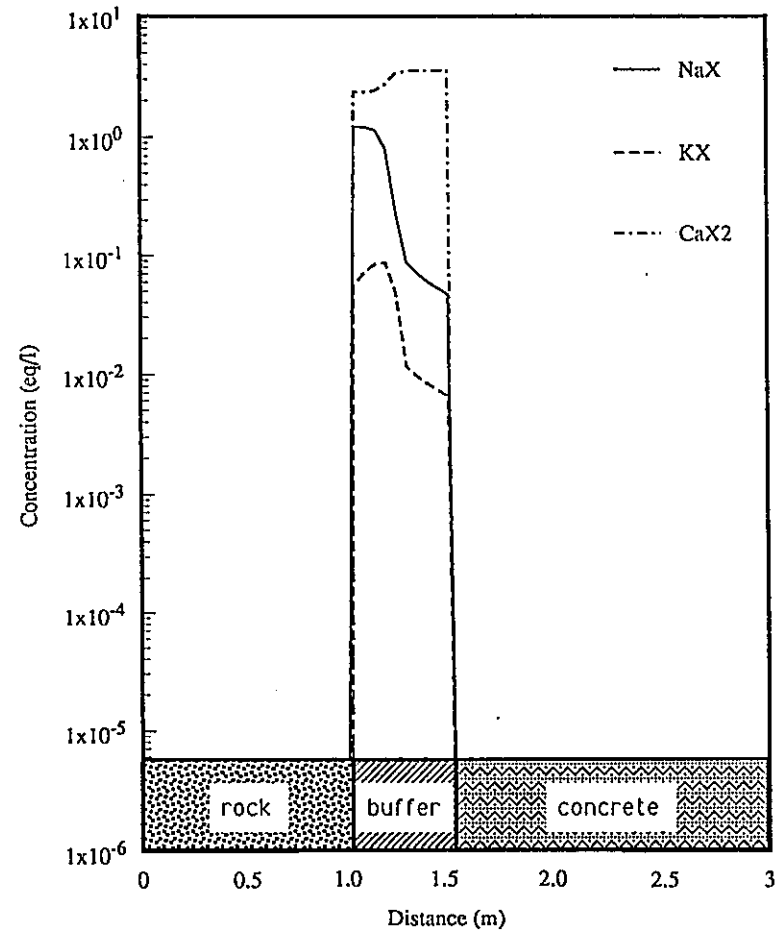


Fig. 1.1.2 Concentration profile of adsorbates at 1000y

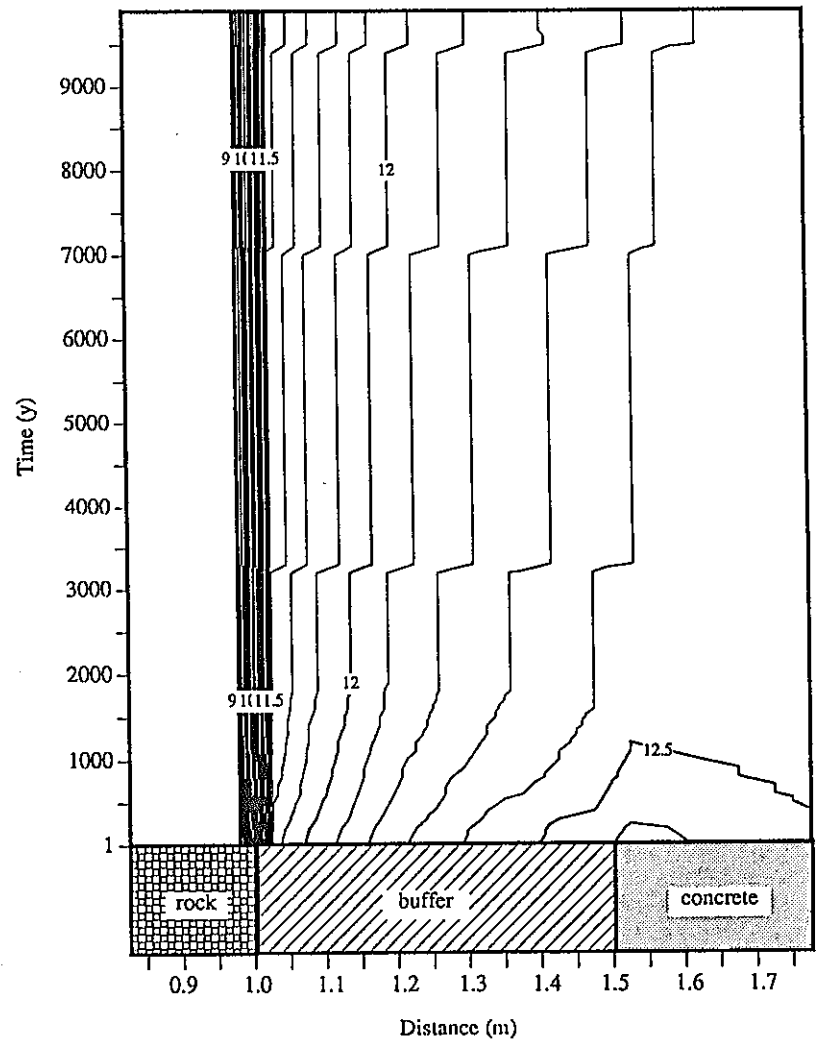


Fig. 1.1.3 pH contour of distance vs. time

厚さ0.5, 1.0, 2.0mの場合においてそれぞれ0.25m, 0.1m, 0.05mであり, ベントナイト層が厚いほどCa化は遅くなっている。しかしながら, 厚さ2.0mでも5000年で全ての領域でCa型がNa型を上回る。これは, 処分場の性能として期待される期間と比べれば短期間である。Ca型化を防止するためには, さらにベントナイトの厚さを増加させることが必要となるが, 例えば10万年間のCa型化防止を目標とするとベントナイト層の厚さは10m以上という非現実的なものになってしまう。このため, Ca型化を防止するのではなくCa型化を不可避と考え, その影響に対する対策を施しておくべきと考えられる。

1.1.2 コンクリート空隙水組成に関する検討

コンクリートは, 廃棄体ないしは処分施設の構造材料として用いられることが検討されている。コンクリート空隙水は高pHを示すが, 高pH環境下では鉄が不動態域にあるため腐食が抑えられること, アクチニド元素にはアルカリ性で低い溶解度を示すものが多いことから, 化学バリアとしての機能も期待されている。コンクリートは徐々に水に溶解するため, 長期的にはその空隙水のpHも中性に近くなり化学バリアの機能を喪失する。そこで, 処分場の機能が期待される期間, 化学バリアとしての機能を保持するにはどの程度の厚さを設定すればよいか検討を行った。

(1) 検討方法

コンクリートの成分は徐々に溶解し, 拡散によってベントナイトを通過して地質媒体へ放出される。この間, コンクリートはその組成を変化させながら同時にpH環境を変える。コンクリートの厚さは2.5mに固定し, 場所によるpH変化を調べることによって, 高pH環境を維持するのに必要なコンクリートの厚さを検討することにした。

コンクリートの地球化学モデルは, Atkinsonらによるもので, pHを決める主成分をportlandite と, CSH で表現した。一方, ベントナイトは前節での検討により数千年以内には全てCa型化してしまうため, Caとのイオン交換反応は扱わず拡散媒体としてのみ扱うことにした。

コンクリートに使用するセメントとしては, 一般的なものとしてB種高炉セメントを想定した。設定したセメントの化学組成を表1.1.5 に, コンクリートの示方配合を表1.1.6 に, また, これらから決まる鉱物組成を表1.1.7 に示す。また, 媒体のパラメータを表1.1.8 に示す。

Table 1.1.5 Chemical composition of type B blast furnace cement (wt%)
(普通ポルトランドセメント50%, 高炉スラグ50%とする)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
OPC	21.90	5.30	3.10	65.10	1.40	2.00	0.29	0.49
高炉スラグ	33.17	16.53	1.03	42.90	4.53	0.90	0.00	0.00
高炉セメント	27.5	10.9	2.1	54.0	3.0	1.5	0.15	0.15

Table 1.1.6 Standard mixing rate

水	高炉セメント	骨材
240	400	1450

$$\varepsilon = 0.33$$

$$\rho = 1.85 \text{ g/cm}^3$$

Table 1.1.7 Mineral composition of concrete (mol/l-water)

C ₃ A(CS ₂) ₃ H ₃ ₂	C ₃ FH ₆	C ₃ AH ₆	CSH(1.8)	CSH(1.5)	Na ₂ O	K ₂ O	CSH 中の Ca/Si(%)
0.88	0.47	1.29	3.88	5.15	0.03	0.03	1.63

C ; CaO , A ; Al₂O₃ , F ; Fe₂O₃ , H ; H₂O , S ; SiO₂ , S ; SO₄

Table 1.1.8 Characteristics of the media

	岩体	ベントナイト	コンクリート
体系の長さ (m)	100.0	0.5	2.5
空隙率 (-)	0.5	0.33	0.33
ダルシー流速 (m/y)	1.0	0.0	0.0
実効拡散係数 (m ² /s)	1.0 × 10 ⁻⁹	1.0 × 10 ⁻¹⁰	1.0 × 10 ⁻¹⁰
分散長 (m)	1.0	0.0	0.0

(2) 結果

液相と固相の元素分布を図1.1.3 ~1.1.4 に、pHの時間変化を図1.1.5 に示す。ベントナイト中の深さ0.05m の地点では、初期pHの約11.6から時間と共にpHが低下し、6.5万年でpH10まで低下する。コンクリート中では、深さ0.05m の地点では、10万年でも約pH11.5の高いpHを維持しており、これより深い地点ではさらに高いpHを示す。したがって、表面近傍以外は極めて長期間にわたって高pHが維持されることが分かった。

このようなpHの長期的な維持は、Caと反応してCalciteを生成する炭酸イオンの供給を拡散支配に抑制しているベントナイト、及びコンクリート中に多量に存在するCSHによりもたらされている。

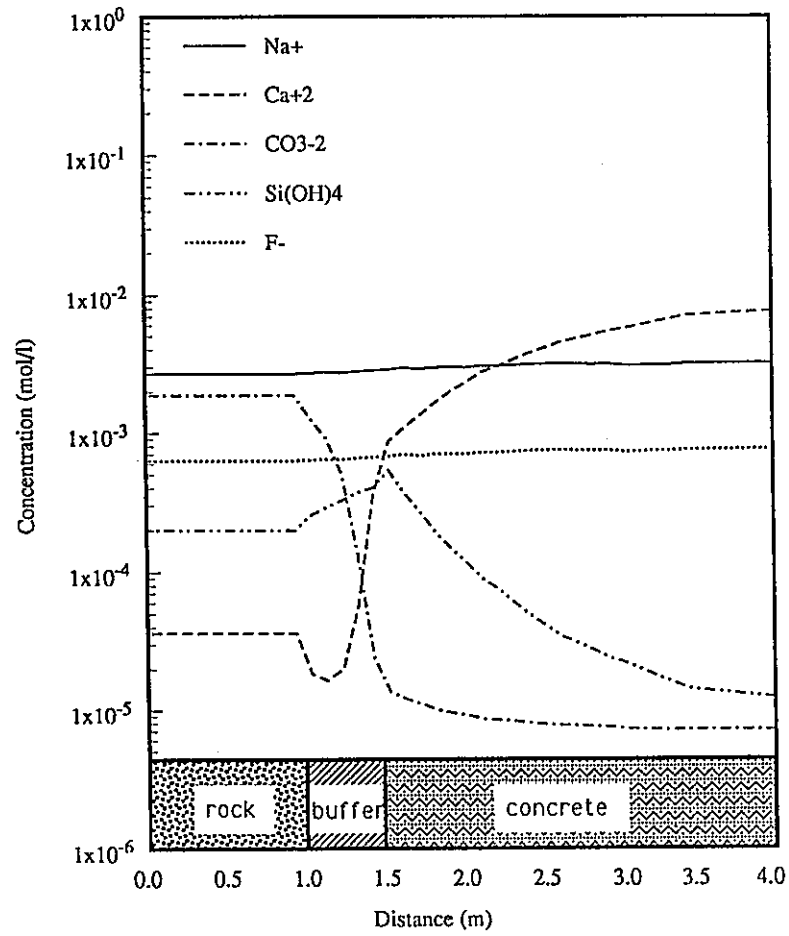


Fig. 1.1.4 Concentration profile of aquatic species at 100000y

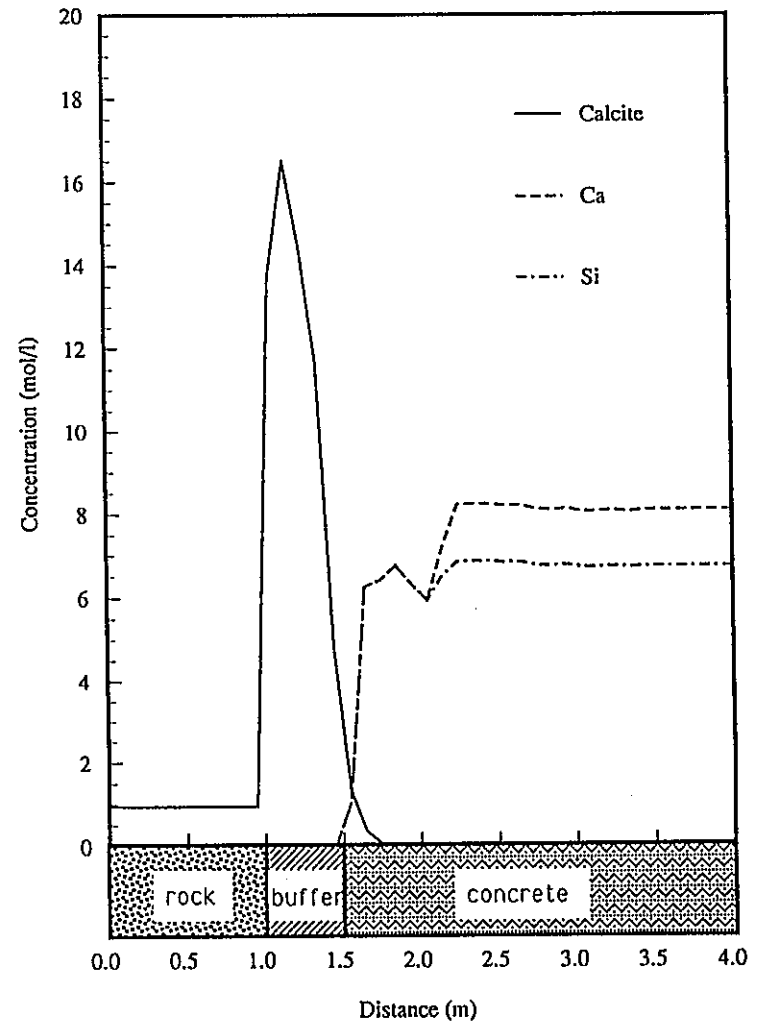


Fig. 1.1.5 Concentration profile of solid phase at 100000y

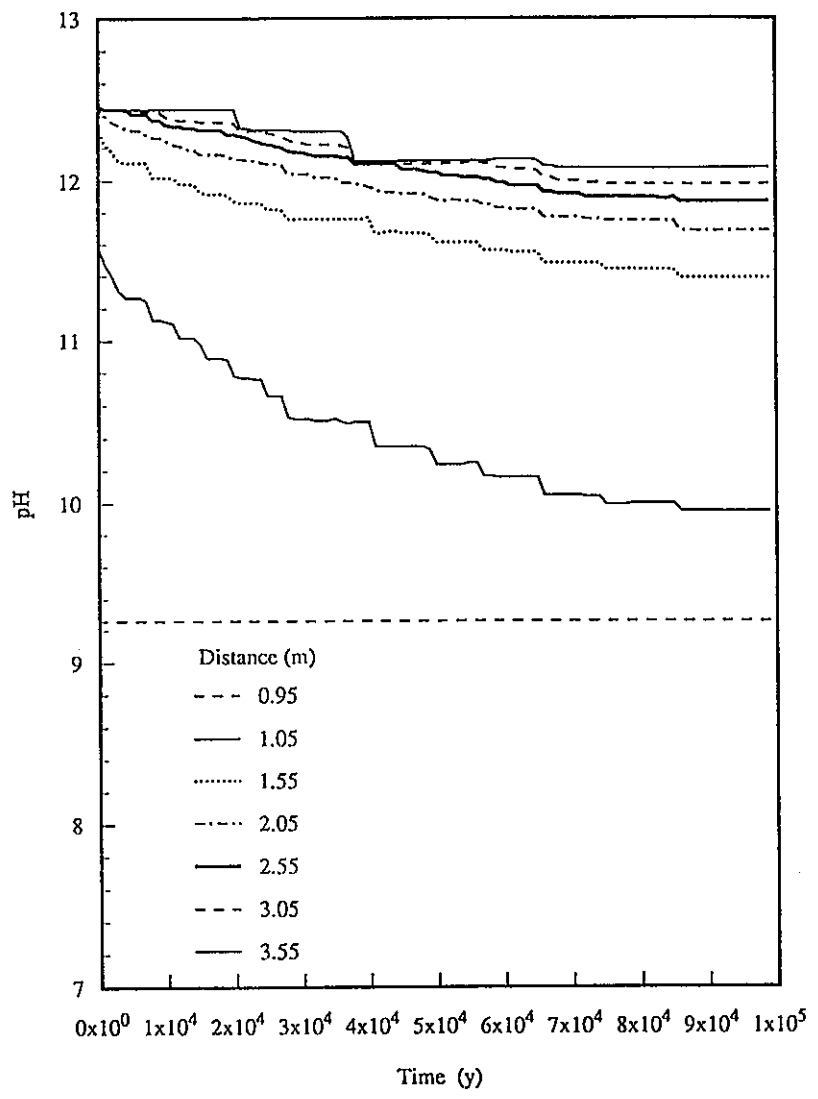


Fig. 1.1.6 Time dependent pH in the concrete

1.1.3 2価鉄の濃度分布に関する検討

コンクリート中の鉄筋及び廃棄体に含まれる鉄，またベントナイト中の黄鉄鉱(pyrite)は腐食することによりその周囲を還元環境にする。このような還元条件下では鉄は2価の陽イオンとして液相中に存在する。しかし，溶液中の地下水が酸化雰囲気であると，地下水中溶存酸素が徐々にベントナイト層，コンクリート層へ浸入し鉄イオンは2価から3価に酸化され，酸化雰囲気となる。本項ではこの進展速度を調べることで還元環境が維持される領域（鉄が2価である領域）の分布を検討した。

(1) 検討方法

体系，及び媒体のパラメータは1.1.3のベントナイトのCa型化に関する検討の条件と同様の値を使用した。コンクリートは，その厚さ（0.5m）の中央に鉄筋等の鉄があるとして，その地点までをモデル化した。境界条件は岩体の上流端で酸素，コンクリート層の下流端で2価鉄を一定濃度とした。初期条件としては酸素濃度は岩体中のみ一定濃度，また，2価鉄濃度は岩体，コンクリート中は0，ベントナイト中は黄鉄鉱の溶解による一定濃度を与えた。また， $\text{Fe}(\text{OH})_2$ の溶解度は $\text{Fe}(\text{OH})_2$ の溶解度寄り十分低いことから酸素と反応した2価鉄は3価に酸化し液相から除かれ，再溶解は起きないと仮定している。

解析条件を表 1.1.9に示す。

Table 1.1.9 Parameter list of the analysis

	岩体	ベントナイト	コンクリート
体系の長さ (m)	1.0	0.5	0.25
空隙率 (-)	0.5	0.33	0.33
ダルシー流速 (m/y)	1.0	0.0	0.0
実効拡散係数 (m^2/s)	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-10}
分散長 (m)	1.0	0.0	0.0
分配係数 (m^3/Kg)	0.0	0.0	0.0
初期条件			
Fe^{2+}			
液相 (mol/l -water)	0.0	2.0×10^{-6}	0.0
固相 (mol/l -water)	0.0	3.7×10^{-1}	0.0
O_2			
液相 (mol/l -water)	0.025	0.0	0.0
固相 (mol/l -water)	0.0	0.0	0.0
境界条件			
Fe^{2+} (mol/l -water)	0.0		2.0×10^{-6}
O_2 (mol/l -water)	0.025		0.0

(2) 結果

図1.1.6 及び図1.1.7 に10000年での液相及び固相の濃度プロファイルを示す。液相及び固相の濃度は空隙水中濃度である。

液相中の2価鉄は、緩衝材中では岩体側からの酸素の浸入により酸化し、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ の沈澱として固相に移行している。しかし、緩衝材中の鉄との反応に酸素が消費されることから10000年経過時点においても酸素は緩衝材—岩体境界部より約20cmのところ迄しか浸入しない結果となった。したがって、1万年経過後でも、これより内側にあるコンクリート中は還元雰囲気には保たれる。

1.2 バリアの厚さの検討

前節においては、人工バリア中の化学的雰囲気の見点から、ベントナイトのCa型化、コンクリート空隙水の化学組成の経時変化、及び2価鉄の濃度分布について検討を行った。その結果、10万年以上の時間スケールでCa型化に耐えられるベントナイト厚さは数10m以上となり、処分施設の設計や経済性の面で妥当性を欠くことになる。CSHのインベントリが十分であれば、コンクリート中のpHは10万年間11.5以上に保たれる。必要なCSHの量は軀体、内部充填材と廃棄体とで担保されるが、10万年間に減少したCa成分の量から考えると、これらの合計で1.5m程度の厚さがあれば充分と考えられる。また、2価鉄による還元雰囲気はベントナイト厚さ0.5mでも長期間維持される。

そこで、次のようにバリア厚さを設定する。コンクリートの厚さは、廃棄体と合計で1.5mとする。廃棄体の大部分は固化材としてセメントを含み、また廃棄体と軀体の間にはモルタルを充填することが予想されるため、これらの部分のセメント成分の量は多い。そこで、コンクリートのバリアは、0.5mとし、残りの1mを廃棄体、内部充填材に割り当てることとする。ベントナイトに求められる性能である、物質の移動速度を低減する観点からは、CSHの溶解速度、2価鉄の酸化速度のいずれも、0.5mのベントナイト層によって効果的に低減される結果が得られている。そこで、ベントナイト層の厚さは0.5mと設定する。

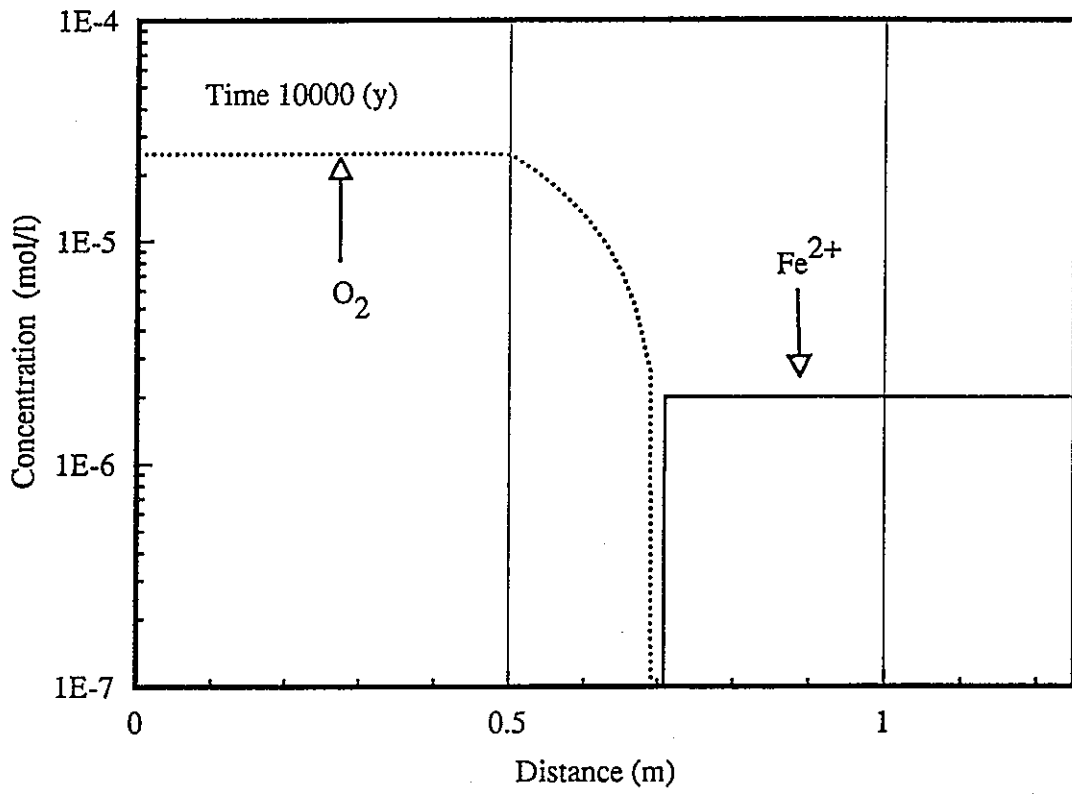


Fig. 1.1.7 Concentration profile of aquatic species at 10000y

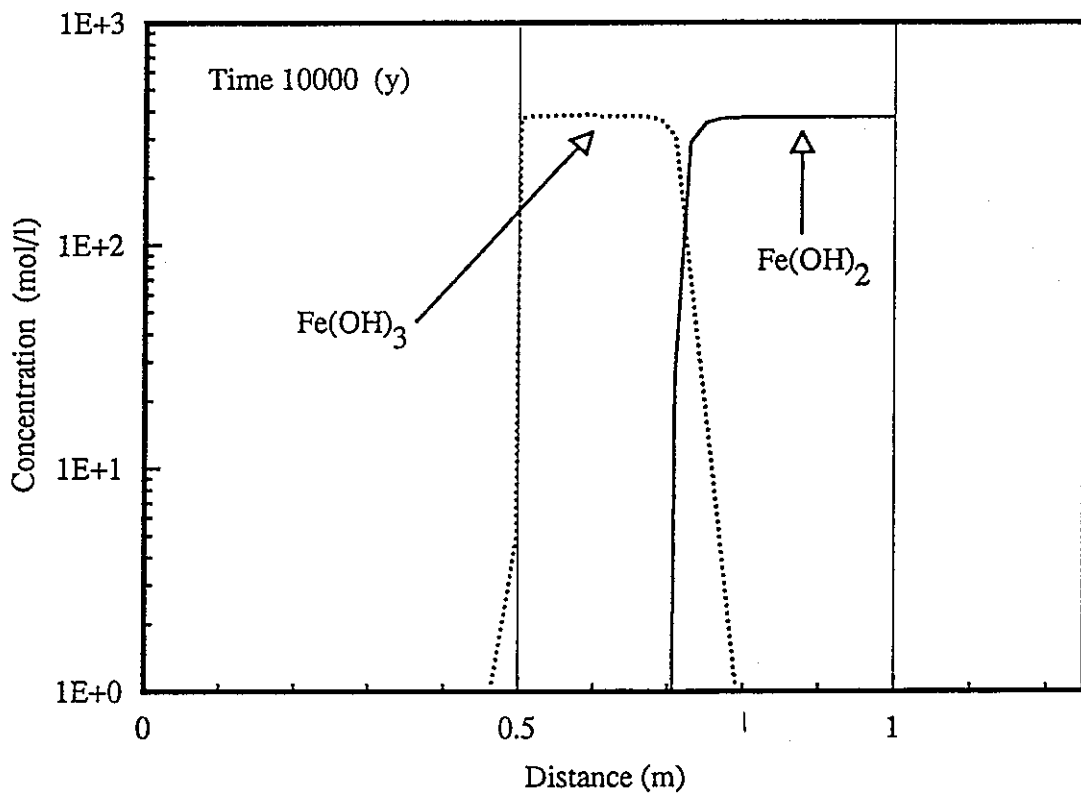


Fig. 1.1.8 Concentration profile of precipitation at 10000y

第2章 工学的観点からの人工バリアシステムの検討

本章では、TRU廃棄物の処分概念の構築に向けて、工学技術、安全性、経済性等の観点から、概略検討、評価を行う。

2.1 TRU廃棄物毎の発生量の検討

(1) 検討にあたっての前提

以下の前提条件のもとでTRU廃棄物の発生量を推定することとする。

- ① 基礎資料
原則として、“TRU核種を含む放射性廃棄物の処理処分について”（平成3年7月30日、原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会）を参考とする。
- ② 推定時期
2010年におけるTRU廃棄物の累積発生量の推定を行う。
- ③ 廃棄物の分類
“TRU核種を含む放射性廃棄物の処理処分について”での廃棄物分類に従う。
- ④ 廃棄物の区分
再処理及びMOX燃料加工から発生する低中レベル廃棄物のうちの6割をTRU廃棄物とする。

(3) 推定結果

(2)及び(1)④から、

$$\begin{aligned} \text{TRU廃棄物発生量} &= \text{再処理からの発生量} + \text{MOX燃料加工からの発生量} \\ &= 20000 \text{ MTU} \times 2 \text{ m}^3/\text{MTU} \times 0.6 \\ &\quad + 30000 \text{ THM} \times 0.2 \text{ m}^3/\text{THM} \times 0.6 \end{aligned}$$

以上から2010年におけるTRU廃棄物の累積発生量は、30000 m³となる。

2.2 処分場概念の検討

2.2.1 TRU廃棄物処分施設の要件

TRU廃棄物の主な特徴を以下に挙げる。

- ・ α 線の半減期が長い。従って、長期間の隔離が必要となる。
- ・低発熱、非発熱廃棄物なので、処分に際して冷却を要する廃棄物が少ない。
- ・発生量は高レベル放射能廃棄物と比べて非常に多い。

したがって、TRU廃棄物処分場に要求される条件としては、次の2点が挙げられる。

- ・長期間にわたる確実な隔離システム（天然バリア+人工バリア）
- ・大規模な処理能力

2.2.2 各国の処分施設形態

世界各国のTRU廃棄物に相当する廃棄物処分場の形態は、坑道型、岩洞型、サイロ型に分類され、それぞれ次の特徴を持つ。

- ・坑道型 : 断面積は10~40m²が多い。
 深度は 200~1300m と幅があるが、岩種との相関性が強い。
 (500m 以深は全て硬岩立地)
 定置方法は、坑道内に積み上げる方法と、坑道から処分孔(φ1~2m程度)を掘削して、その中に定置する方法の2パターンである。
 坑道はライニングがある場合と、ない場合があり、ライニングがある場合には、そのバリア効果を期待している。
- ・岩洞型 : 断面積は200~900 m² 程度。
 深度は 500m程度が多く、全て硬岩立地。
 定置方法は、コンクリート製のピットの中に積み上げる方法からバラ積みまでさまざまである。
- ・サイロ型 : 容積は4000~6000m³ 程度。
 サイロ躯体もバリアとして期待している。

2.3 我が国におけるTRU廃棄物処分施設の建設性の検討

2.3.1 TRU廃棄物処分場概念の検討

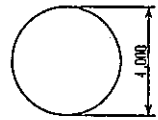
TRU廃棄物処分場の建設性を検討するために、次のTRU廃棄物処分場概念(検討用モデル)を設定する(図2.3.1~2.3.2)

- ・坑道型 : 断面積 10m²程度(タイプ1)
 : 断面積 40m²程度(タイプ2)
- ・岩洞型 : 断面積 200m²程度(タイプ3)
 : 断面積 1000m²程度(タイプ4)
- ・サイロ型 : 断面積 500m²程度(タイプ5, 空洞体積 25000m³程度)
 : 断面積 1000m²程度(タイプ6, 空洞体積 70000m³程度)

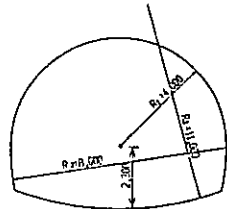
建設地点の岩種としては、大きく硬岩と軟岩の2種類に分けて考える。硬岩は日本に広く分布する花崗岩、軟岩は新第三紀の堆積岩が代表的な岩種である。

建設深度は、軟岩における事例が多い地下200m、岩洞型の実例が多い500m、硬岩における事例が多い1000mの3ケースを設定する。

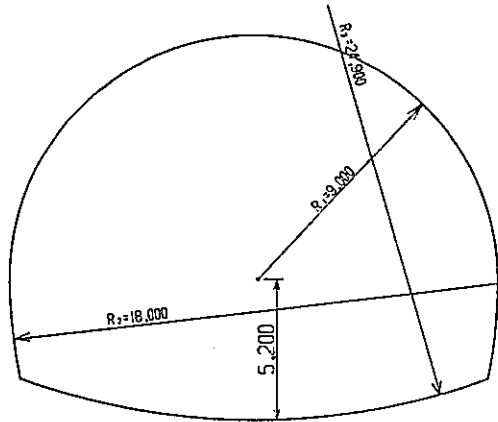
廃棄体の形状は、すべて図-2.3.2に示すようなパッケージ(200リットルのドラム缶)に収納されているものとする。収納部分の断面積が小さいタイプ1についてはこのパッケージを俵積み、収納部分の断面積が大きいタイプ2~6については、コンクリート製のコンテナ(縦2.2m×横2.2m×高さ1.1m)に9本のパッケージを収納し(図-2.3.2)、このコンテナを積み上げて行く方法とする。処分対象となるTRU廃棄物を3万m³(15万本)と仮定すると必要空洞体積は、次のようになる。



タイプ1

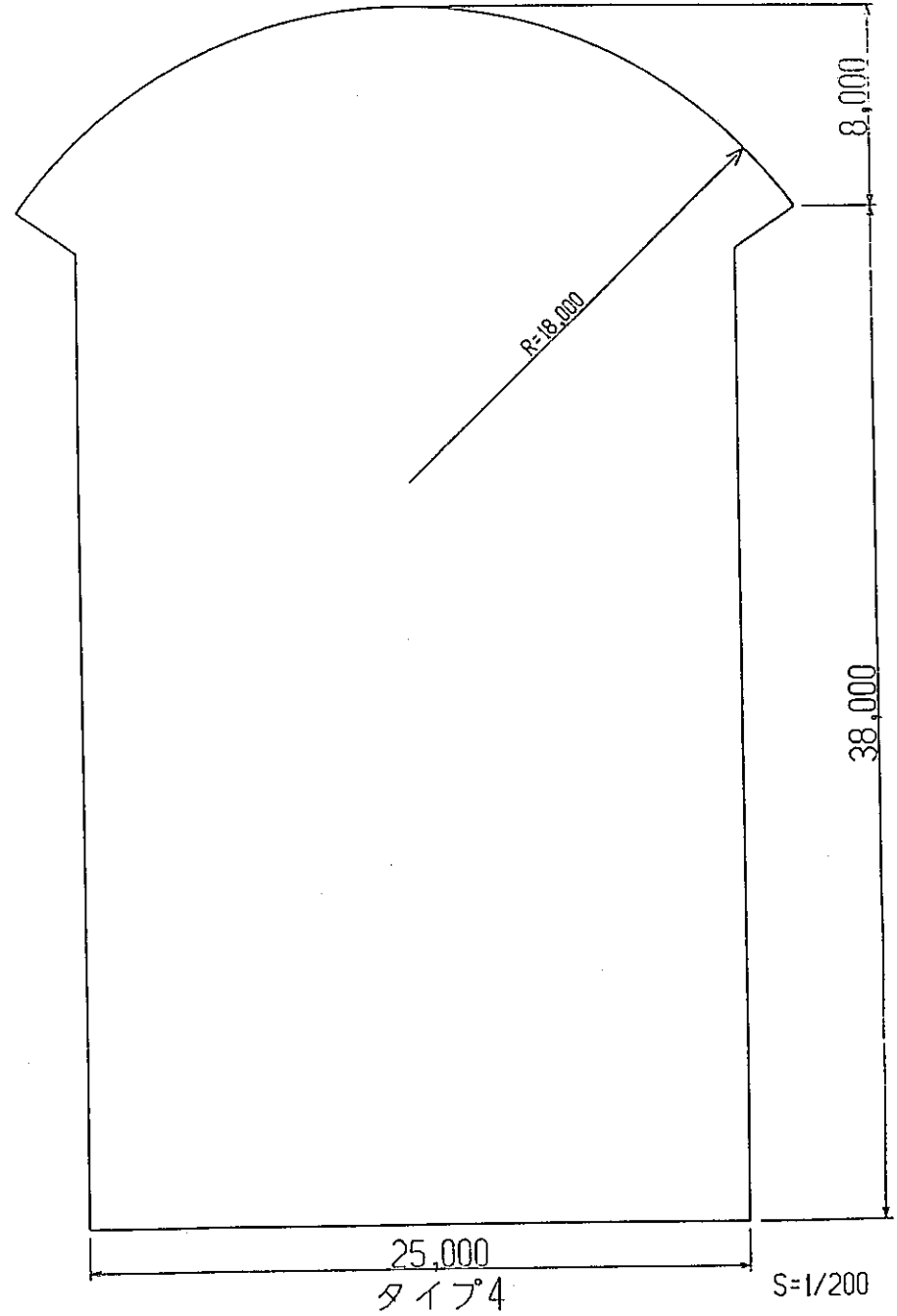


タイプ2



タイプ3

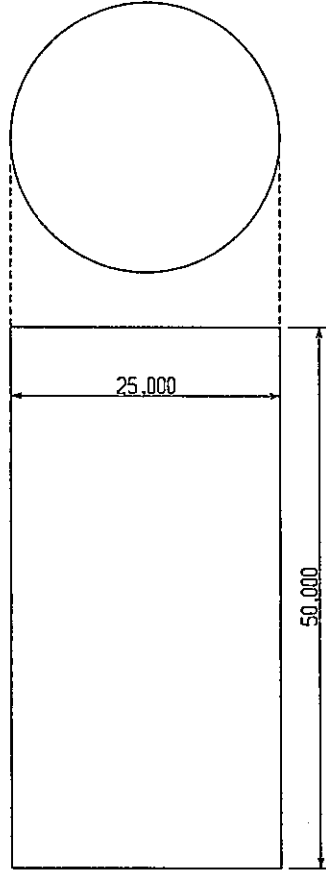
S=1/200



25,000
タイプ4

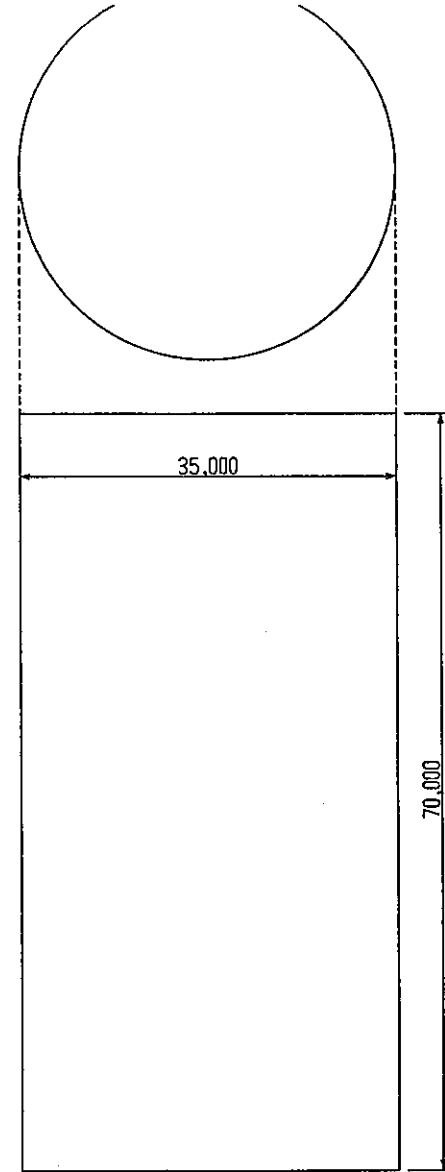
S=1/200

Fig. 2.3.1 Geometry of cave type 1 ~4



タイプ5

S=1/500



タイプ6

S=1/500

Fig. 2.3.2 Geometry of cave type 5, 6

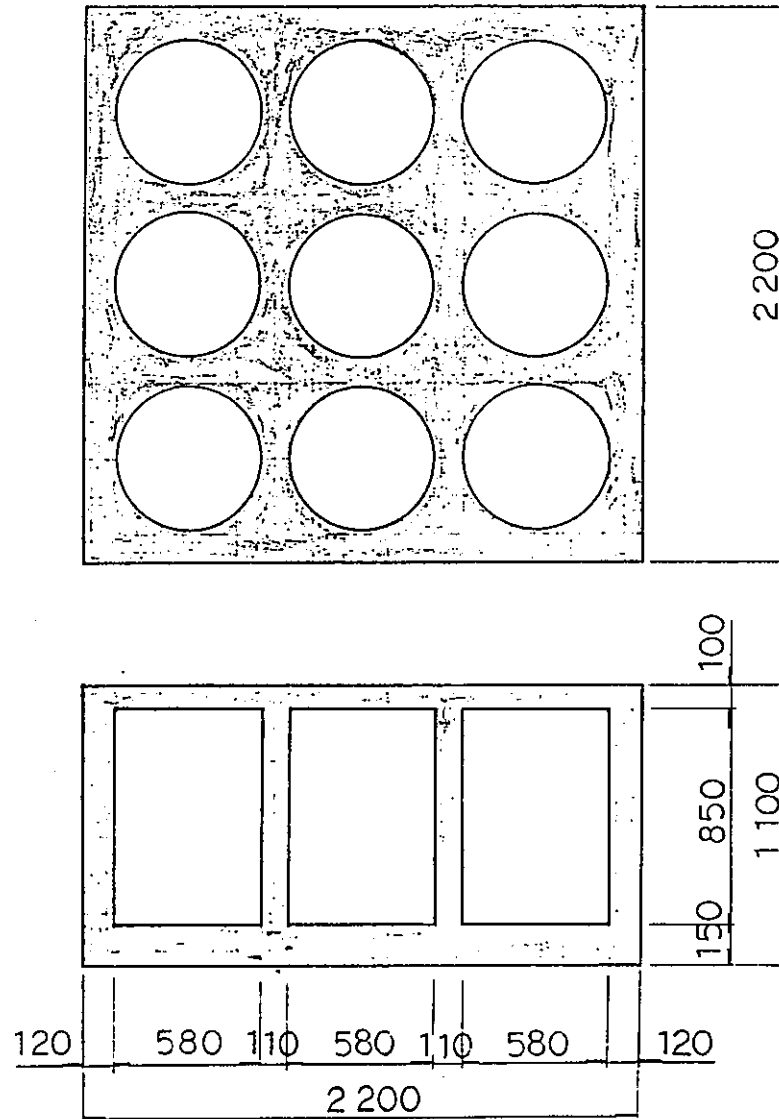
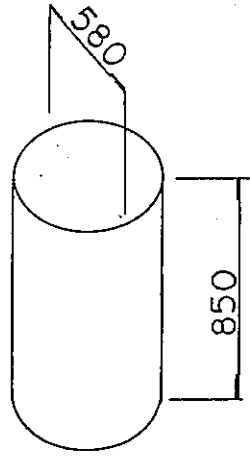


Fig. 2.3.3 Geometry of concrete container

タイプ1 (坑道型)	21万m ³	タイプ2 (坑道型)	31万m ³
タイプ3 (岩洞型)	17万m ³	タイプ4 (岩洞型)	15万m ³
タイプ5 (サイロ型)	30万m ³	タイプ6 (サイロ型)	21万m ³

周囲の岩盤と廃棄体の間には、緩衝材を充填する。緩衝材の材料は、圧縮ベントナイトとする。また、緩衝材の厚さは最低1mを確保する。

2.3.2 建設性の検討

処分場の建設性を検討するにあたり、考慮すべき項目として以下のものが挙げられる。

- ・力学的成立性；施工時、操業時、数千年先までの間、処分場が力学的に安定でなければならない。
- ・施工技術；想定される大深度に大規模の地下空洞を、地盤の緩みを少なく掘削できなければならない。
- ・閉鎖技術；処分場のために掘削した地下空洞を、地山または組成礼状の不透水性が得られるように埋め戻すことができなければならない。

ここでは、上記の3項目の中で最も基本的な項目と考えられる力学的成立性、及び定性的な経済性評価を実施した。

(1) 岩盤に関する力学的成立性

表2.3.1～3に我が国における地下構造物の施工実績をまとめる。

Table 2.3.1 Examples of under ground power station

地下発名	空洞規模 H×B×L (m)	空洞掘削量 (m ³)	空洞 断面積 (m ²)	土被り (m)	地 質
新高瀬川	54.5×27×160	285,400	1448	250	花崗閃緑岩～閃緑岩
玉原	49.5×27×114.5	132,290	1238	240	礫岩、凝灰角礫岩
今市	51×33.5×160	200,000	1460	400	角礫岩 珪質砂岩 砂質・粘板岩互層
奥矢作第二	47.8×22.4×103.3	101,300	998	340	花崗閃緑岩
奥美濃	40.5×18.5×116	86,913	923	350	流紋岩
南原	43.9×23×82.6	81,900	1104	220	花崗岩
侯野川	46.2×23.5×155.5	157,000	1110	350	花崗岩
本川	45.4×22.3×96.4	100,960	1085	270	結晶片岩
大平	48.9×22.8×94.4	79,080	1041	250	砂岩・粘板岩
新豊根	46.5×22.4×140.5	140,000	1027	220	黒雲母花崗岩
下郷	45.5×22×171	140,000	1000	100	細粒砂岩・閃緑岩
蛇尾川	51.4×29×165	191,000	1150	250	流紋岩

Table 2.3.2 Examples of tunnels in Japan

種類	名称	延長(m)	深度(m)	最深部の主な地質	備考
道路・鉄道トンネル	青函トンネル	53 850	480	安山岩	海底坑道
	大清水トンネル	22 235	1 300	石英閃緑岩	
	中山トンネル	14 830	400	緑色凝灰岩	
	北陸トンネル	13 870		砂岩	
	新清水トンネル	13 500	1 250	石英閃緑岩	
	関越トンネル	10 885	1 100	ホルンフェルス	
	恵那山トンネル	9 625	1 000	花崗岩	
	鍋立山トンネル	9 117	300	泥岩	
	肥後トンネル	6 340	400	砂岩	
	志戸坂トンネル	5 590	470	粘板岩	
石炭鉱山	三池炭鉱	392 100	675	砂岩	S.61*
	太平洋炭鉱	241 600	750	砂岩・頁岩・礫岩	S.61*
	赤平炭鉱	156 200	800	砂質頁岩・砂岩	S.60*
	砂川炭鉱	109 000	1 100	砂岩・頁岩	S.60* ,SL-960m,
	南大夕張炭鉱	63 300	1 000	頁岩	S.61* ,SL-730m,
	幌内炭鉱	62 500	1 200	頁岩	S.61* ,SL-1140m,
金属鉱山	別子鉱山	**	2 150	石英片岩・緑泥片岩	SL-960m
	足尾鉱山		1 000	石英粗面岩・珪岩	
	生野鉱山		1 000	石英粗面岩・玄武岩	
	棚原鉱山			石英閃緑岩・粘板岩	SL-820m

* 延長の実績年

** 金属鉱山の多くは閉山のため正確な延長距離は不明

Table 2.3.3 Examples of deep shaft in Japan

種類	名称	径(m)	深度(m)	最深部の地質	備考
道路・鉄道・発電所	恵那山換気立坑	6.2	620	流紋岩	ショートステップ工法
	奥矢作業第2発電所立坑	6.7	380	花崗閃緑岩	ショートステップ工法
	中山(四方木)立坑	6.0	372	凝灰角礫岩	ショートステップ工法
	長峰第二換気立坑	5.4	344	緑色片岩	
	中山(中山)立坑	6.0	313	石英安山岩・凝灰岩	ショートステップ工法
	中山(高山)立坑	6.0	295	凝灰角礫岩	ショートステップ工法
	布引換気立坑	5.1	210	花崗岩	
石炭鉱山	幌内排気立坑	6.0	1 044	砂岩・頁岩	ショートステップ工法
	高松立坑	6.0	1 014	砂岩・頁岩	
	夕張新鉱第1立坑	7.0	916	頁岩・砂質頁岩	
	砂川南部立坑	5.5	891	頁岩・砂岩	
	夕張新鉱第2立坑	7.0	808	頁岩・砂質頁岩	
	砂川中央立坑	4.8	766	砂岩・頁岩	
	池島第2立坑	6.0	754	砂岩・頁岩	
	山野第2立坑	6.0	737	砂岩・頁岩	
	曇島入気立坑	5.0	720	砂岩・頁岩	
	土島入気立坑	5.0	705	砂岩	

空洞の支保工の概略検討を目的として、初期応力が静水圧状態である円形トンネルを対象に、モール・クーロンの破壊基準を用いた弾塑性理論を適用した空洞安定解析を行った。ここで、初期応力は、土被り圧の1.5倍の値が等方等圧に作用するものと仮定した。また、降伏後の岩盤挙動としてバイリニア型の完全弾塑性モデルを用いた。

解析に用いた岩盤物性値を表2.3.4に示す。又、吹きつけコンクリートの圧縮強度は150kgf/cm²とした。塑性領域（ゆるみ域）は1.5mまでを許容すると仮定して支保コンクリートの巻立て厚さを算定した。

Table 2.3.4 Parameter list of the analysis

物性値		単位体積重量 (kgf/m ³)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (deg)
岩盤分類						
硬岩	A	2,700	30,000	0.2	7.5	35
	B		10,000	0.2	6.0	35
軟岩	A	2,300	4,000	0.3	4.0	30
	B		2,000	0.3	2.0	30
	C		1,000	0.4	1.0	25

解析結果より、支保コンクリートの巻立て厚さを2mまで許容するものと考え、おおよそ以下のことがいえる。

- ・坑道型（タイプ1, 2）は、硬岩の場合は深度1000mまで掘削可能。
軟岩の場合は、深度500m程度までは掘削可能。
- ・岩洞型（タイプ3, 4）及びサイロ型（タイプ5, 6）は、硬岩の場合深度500m程度、軟岩の場合深度200m程度が限界。

これらの結果は、世界各国の処分場の事例調査結果や、他の類似する地下構造物の我が国における施工実績の調査結果とも、ほぼ整合性がとれるものである。

(2) コンクリートに関する力学的成立性

坑道の覆工やサイロの躯体といったコンクリート部材に作用する荷重としては、前述した支保内圧の他に地下水圧が支配的となる。地下発電所などの大空洞では十分な排水工を行い、水位の低下や間隙水圧の低下を図り、空洞の安定を確保している。しかしな

がら、処分場の場合、対象とする期間は数百年～数千年のオーダーが要求されるため、この期間中には静水圧状態に戻る可能性が考えられる。そこで、一例としてタイプ6を地下500mに建設する場合の水圧の影響について、概略検討を行う。

(a) サイロを厚肉円筒とみなした場合

躯体コンクリートに設計基準強度 $\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートを用いた場合、水圧による圧縮応力がコンクリートの許容圧縮応力度 $\sigma_{ca}=140\text{kgf/cm}^2$ 以下になるための躯体の部材厚 t_c は、8.1mとなり非現実的である。

(b) サイロ内部のしきり壁を抵抗材として考慮した場合

サイロ躯体は曲げ部材と考え、水圧をサイロ内部のしきり壁に受けもたせるとする。ひび割れを許さないための躯体の部材厚 t_c は2.5mとなる。

水圧により発生する圧縮応力をコンクリートの許容圧縮応力度以下に収めようとすると、しきり壁厚 t_w は、1.3mとなる。

(c) コンテナを抵抗材として考慮した場合

コンテナをサイロ内部に定置後、空隙をコンクリートやセメントミルク等の充填材で充填し、サイロ躯体とコンクリートを一体化することにより、コンテナも抵抗材として考慮できる。この場合、要求される許容圧縮応力度 273kgf/cm^2 を満たすには、 $\sigma_{ck}=\underline{800\text{kgf/cm}^2}$ 以上が必要であると推定される。一方、サイロ、コンテナ共 $\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートを用いた場合には、コンテナに収納するパッケージを4本とすれば水圧によって発生する圧縮応力を σ_{ck} 以下に収めることが可能である。

これまでの検討においては、土圧は支保工で受け持つものと仮定したが、数百年～数千年という長期間にわたり支保工が土圧を支え続けられるか否かは不明であるため、最終的には土圧も設計荷重として考慮する必要があるものと考えられる。

(3) 緩衝材に関する力学的成立性

一般に吸水した圧縮ベントナイトは、圧縮強度が低下することが知られている。そこで、タイプ6を例にとりサイロの支持力に対する概略検討を実施する。

サイロ下部の微小ベントナイト要素を考える。この要素には、鉛直方向にはサイロの自重が作用し、水平方向には変形が拘束されていると考え、微小ベントナイト要素に作用する主応力 σ_1, σ_2 は、それぞれ 1.8MPa 、 1.2MPa となる。これより、図2.3.4に示すように、モールの円は、破壊曲線を侵してはおらず、本検討に用いた仮定の範囲ではベントナイトはサイロの支持力を失っていないと判断される。

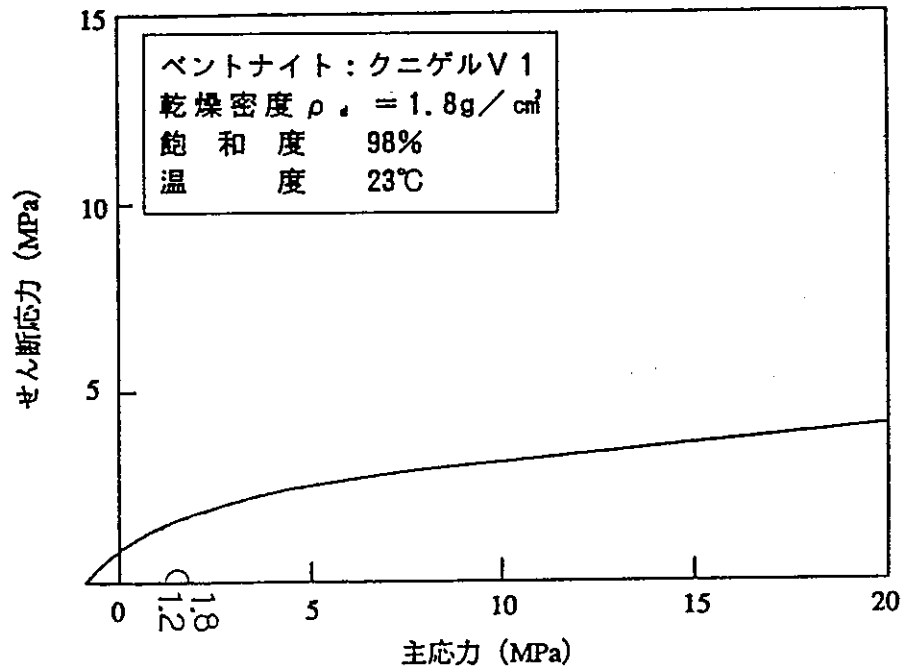


Fig. 2.3.4 Mohr's stress circle for the small element

また、ベントナイトの吸水は外側から順次進んでいくと考えられるので、吸水の程度は均一的ではないと思われる。したがって、サイロの不等沈下に対する検討が必要であると思われる。

(4) 経済性

経済性に関する事項としては、用地の取得、インフラの整備、施設の建設・操業・閉鎖、廃棄物の運搬、廃棄物密度、閉鎖後のモニタリング等が挙げられる。その中で、施設の建設コストに着目すると、掘削の難易度が経済性に大きく影響する。掘削の可能性と、経済性の概略評価を表2.3.5,6に示す。

この結果、掘削性に問題が無ければ、分散的（坑道）に埋設するよりも集中的（岩洞、サイロ）に埋設する方がメリットが多いと判断できる。

2.4 まとめ

工学的観点からの人工バリアシステムの検討として、世界各国のTRU廃棄物に相当する廃棄物処分場についての事例調査を実施することにより、処分施設形態を分類、整理し、各施設形態に対して、力学的成立性を中心に処分場の建設性の検討を実施した。

検討結果をまとめて表2.3.7に示す。

Table 2.3.5 Technical feasibility of constructing the repository

タイプ 岩盤	坑道型	岩洞型	サイロ型
硬 岩	・大深度(1000m)に対しても現状掘削技術で対応可能	・500m程度の深度までは掘削実績あり。 (揚水式地下発の実績から類推)	同 左
軟 岩	・200m程度の深度までは掘削実績あり ・空洞の安定性について検討必要(500m程度が限界)	・空洞の安定性について検討が必要(掘削できる場合でも補助工法や大規模な支保工が必要)	同 左

Table 2.3.6 Rough estimation of construction cost

項目	硬 岩			軟 岩			備 考
	坑道型	岩洞型	サイロ型	坑道型	岩洞型	サイロ型	
施設の水平面積	△	○	○	△	○	○	
掘削性	○	△	△	△	×	×	難易度が影響
掘削体積	△	○	○	△	○	○	

Table 2.3.7 Feasibility of constructing TRU waste repository

処 分 形 態		坑 道 型		岩 洞 型		サイロ型	
検 討 用 モ デ ル		タイプ1：空洞断面積10m ² 程度 タイプ2：空洞断面積40m ² 程度		タイプ3：空洞断面積200m ² 程度 タイプ4：空洞断面積1000m ² 程度		タイプ5：空洞断面積500m ² 程度 タイプ6：空洞断面積1000m ² 程度	
岩 種		硬 岩	軟 岩	硬 岩	軟 岩	硬 岩	軟 岩
実 績	TRU廃棄物処分場 としての実績（海外）	600～1000m で計画多数	200～300mで計画あり	500m 程度の計画が多い	計画無し	計画はあるが岩種や深度との相関は特定できず	
	他の類似構造物の実績 （国内）	道路・鉄道用トンネルの 実績多い 鉱山には深度 1000m以上のものもある	道路・鉄道用トンネルの 実績多い	地下発電所・石油備蓄基 地の実績あり（土被り最 大400m程度）	実績は少ない	地下発電所・石油備蓄基 地の実績あり（土被り最 大400m程度）	実績は少ない
力 学 的 成 立 性	掘削に対する安全性 （空洞安定解析結果）	タイプ1, 2とも1000m まで掘削可能	タイプ1, 2とも500m 程度までは掘削可能	タイプ3, 4とも500m 程度までは掘削可能	タイプ3, 4とも200m 程度までは掘削可能	タイプ5, 6とも500m 程度までは掘削可能	タイプ5, 6とも200m 程度までは掘削可能
	その他の事項	・トンネル覆工に作用する水圧を考慮する必要がある。 ・空洞断面積が小さい分、他の処分形態よりも耐震 上有利。		・トンネル覆工に作用する水圧を考慮する必要がある。 ・空洞断面積が大きい分、他の処分形態よりも耐震 上不利。		・サイロ躯体に作用する水圧を考慮する必要がある。 ・ベントナイトが吸水することによる各種の影響（ 膨潤圧、支持力低下、変形特性の変化）がサイロ 躯体に与える影響を検討する必要がある。	
経 済 性	必要空洞体積 ^(*)	タイプ1：21万m ³	タイプ2：31万m ³	タイプ3：17万m ³	タイプ4：15万m ³	タイプ5：30万m ³	タイプ6：21万m ³
	掘 削 性	他と比べて掘削費が安く すむ要素が多い	深度が増すに従って掘削 費が高くなる要素が多い	深度が増すに従って掘削 費が高くなる要素が多い	補助工法や大規模な支保 工が必要になる場合は掘 削費が大幅に上昇する	深度が増すに従って掘削 費が高くなる要素が多い	補助工法や大規模な支保 工が必要になる場合は掘 削費が大幅に上昇する

(*) 印：TRU廃棄物量3万m³を処分することを
想定。

第3章 TRU廃棄物毎の人工バリアシステムの性能の検討

3.1 人工バリアからの核種放出モデルの検討

母岩，ベントナイト，コンクリートバリア，廃棄物からなる体系を考え，各TRU廃棄物から放出される核種フラックスを評価し，バリアの効果を検討した

核種の放出メカニズムとしては，放出率と溶解度を考慮した。今年度は，昨年度のモデルから，各核種の溶解度をそれぞれの時間，空間毎の同位体存在比から算出できるように改良した。

3.2 各廃棄物毎の人工バリアシステムの予備的性能評価

3.2.1 入力データ

各廃棄物のインベントリ，媒体の特性，分配係数，放出率，溶解度は，昨年度の検討と同じパラメータ値を使用した。尚，評価対象とした核種は，昨年度と同じく，TRU核種とその娘核種のうち半減期20年以上のもの，及びF.P.のI-129, Sr-90, C-14である。

3.2.2 検討結果

人工バリア表面における核種放出フラックスの例を図3.2.1に示す。また，各廃棄物毎にTRU核種の中で毒性の高い核種を上位3核種抽出し表3.2.1にまとめる。

共通して高い毒性を示すのはRa-226であり，これに付随して，これと平衡にある娘核種のPb-210が現れる。ハル・エンドピース，無機系雑固体廃棄物，金属系雑固体廃棄物，有機廃液固化体では，Ra-226の生成源になるU-238, U-234のインベントリが小さいため，Pu-242, Pu-239がこれより上位に現れる。還元雰囲気ではPuの溶解度が下がるため，Pu同位体の毒性は下がり，Ra-226が最も高い毒性を示す。Ra-226の生成源は移行中のTh-230であり，Th-230の生成源は廃棄物中のU-234である。したがって，Ra-226はインベントリのU-234濃度を直接的に反映する。

核種と，バリア機能の関連を調べるために，核種の毒性を①初期インベントリ，②初期インベントリ×放出率，③溶解度，④処分施設表面での最大水中核種濃度，の4点で示し，各バリア機能が核種の毒性低減に示す効果を比較した（図3.2.2）。主な元素の特徴を次に示す。

- ・Puは，高い吸着性を持つが，酸化雰囲気中では溶解度による低減効果がなく，いずれの同位体も半減期が長いことから，処分施設表面で高い濃度を示す場合がある。
- ・Uは酸化雰囲気中では極めて低い溶解度を持つが，それぞれの親核種からの生成が

あるため、ベントナイト中でむしろ濃度が上昇し、処分場表面の方が高い毒を持つ場合がある。しかし、U 自身の濃度はそれほど高くなく、むしろ問題なのはその娘核種の濃度である。

- Thは、Th-229, Th-230のいずれも半減期が長いためベントナイトバリア内での減衰が小さい。また、溶解度も低くないので、溶解度で制限されることもない。一方、その親核種であるU-233, U-234は溶解度が低いため、ベントナイト中の濃度は低い。したがって、放出されるThのうち移行中のUからの寄与は小さいことになり、大部分は廃棄物内での連鎖崩壊で生成したものになる。

吸着効果は大きいため、処分施設表面での濃度は高くない。

- Ra-226は、Th-230から生成する。ベントナイトへの吸着性が小さいため、減衰する前に処分施設から放出され、多くの廃棄物において最大の濃度を示す。
- I-129 と、C-14は、吸着、溶解度、減衰のいずれの効果も余り期待することができない。特に、I-129はインベントリが大きい場合があり、その場合には大きな毒性を示す。

Table 3.2.1 Nuclides with the highest release flux on each solidified waste

	大 ←————— 毒性 —————→ 小			
ハル・エンドピース				
(酸化雰囲気)	Pu-242	Ra-226 Pu-239		
(還元雰囲気)		Ra-226		Pb-210 Pa-231
無機系雑固体廃棄物				
(酸化雰囲気)	Pu-242 Pu-239	Ra-226		
(還元雰囲気)		Ra-226		Pb-210 Am-243
金属系雑固体廃棄物				
(酸化雰囲気)	Pu-242 Pu-239	Ra-226		
(還元雰囲気)		Ra-226		Pb-210 Am-243
有機廃液固化体(プラスチック)				
(酸化雰囲気)		Pu-239 Ra-226 Pu-240		
(還元雰囲気)		Ra-226		Pb-210 Am-243
一般廃液固化体(アスファルト)				
(酸化雰囲気)		Ra-226		Pb-210 Pu-240
(還元雰囲気)		Ra-226		Pb-210 Th-230
一般廃液固化体(セメント)				
(酸化雰囲気)		Ra-226		Pb-210 Pu-240
(還元雰囲気)		Ra-226		Pb-210 Th-230
無機系M O X 廃棄物				
(酸化雰囲気)		Ra-226	Np-237 Pb-210	
(還元雰囲気)		Ra-226		Pb-210 Pa-231
金属系M O X 廃棄物				
(酸化雰囲気)		Ra-226 Pu-239 Np-237		
(還元雰囲気)		Ra-226		Pb-210 Th-230

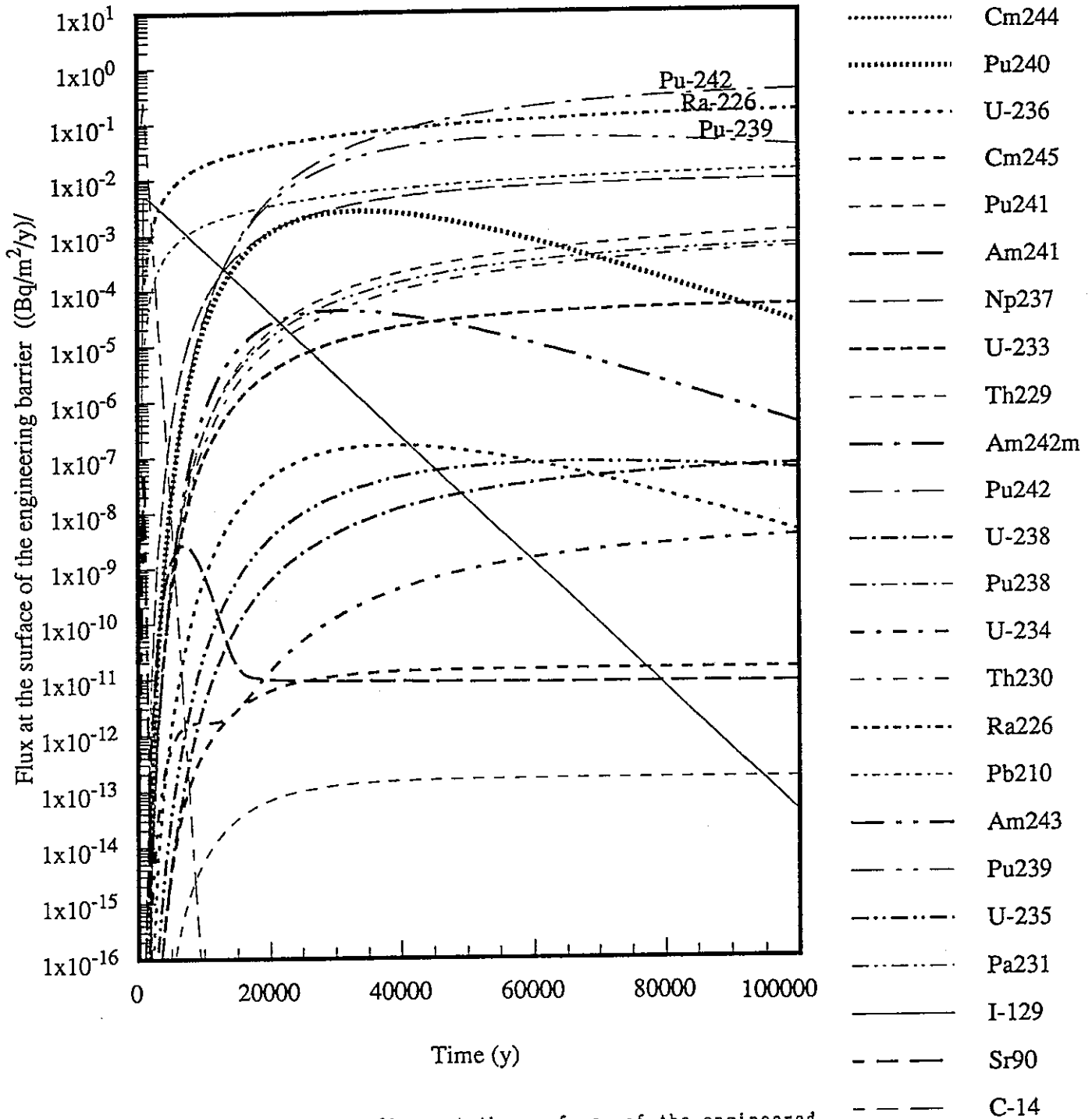


Fig. 3.2.1 Time dependent flux at the surface of the engineered barrier (Fuel element hull and end-piece under the oxidizing condition)

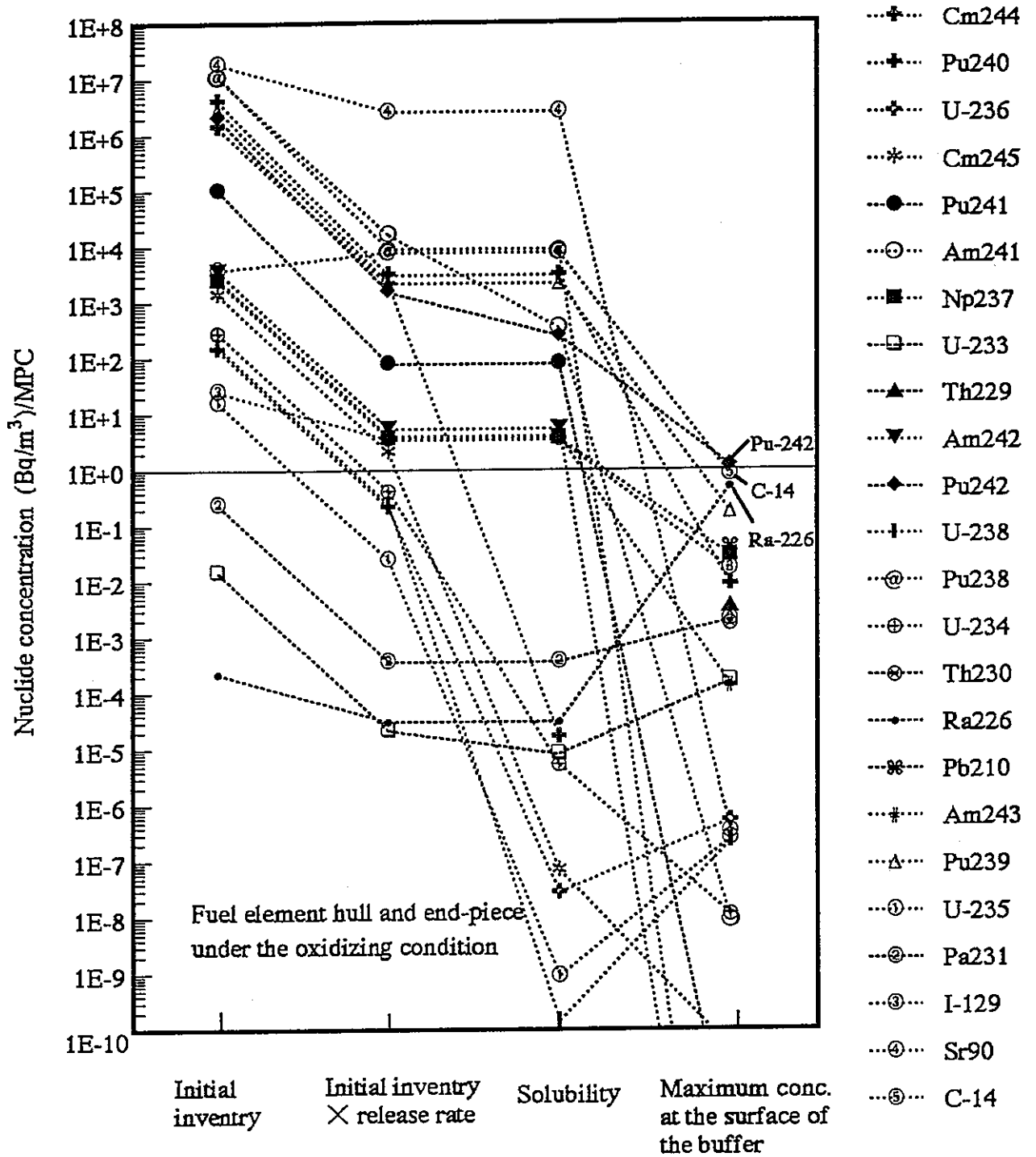


Fig. 3.2. 2 Comparison of the Nuclide concentration at the various positions in the engineered barrier

以上にまとめた各元素の特性をもとに、全体の毒性を支配することがあるRa, Puについて、その濃度を低減する方法を検討する。

Puの場合はその親核種からの寄与はほとんどないため、その濃度を低減するには、それ自身の放出挙動を改善しなければならない。問題となるのは、酸化雰囲気での溶解度であり、これが低下すれば最終的な濃度も低下する。溶解度を低下させる方策としては、酸化雰囲気でPuと低い溶解度の沈澱を形成する配位子を検討することと、処分場を還元雰囲気で維持する方法を検討することが考えられる。

Ra-226の放出を低減するには、Th-230の廃棄物からの放出を低減しなければならない。Thの放出は溶解度によって抑制されないが、現在適用しているパラメータにおいて、Thの廃棄物中の濃度はその溶解度と同じ桁である。したがって、より精密なデータ、ないし他の配位子との沈澱によって溶解度が低下すれば、これによって放出を低下させられる可能性がある。

第4章 TRU廃棄物の人工バリアシステムに係わる研究課題の抽出

4.1 第1章から抽出された課題

(1) ベントナイトのCa型化

本研究によって、ベントナイトは早期にCa型化することが分かった。したがって、現在、Na型ベントナイトで先行している特性調査をCa型ベントナイトについても実施する必要がある。

(2) コンクリート空隙水組成に関する検討

今回は、空隙水組成を予測することを目的に、コンクリートの劣化の基本的な機構であるコンクリートの浸出について検討を行った。ひび割れの原因となるエトリンガイトの生成など、コンクリート中ではこの他にも多様な反応が起こる。その中から、人工バリアの性能に影響を与える現象を抽出し、これをモデル化することが必要であろう。また、この解析では、コンクリートの物理的性質は変わらないものとして扱ったが、実際には、化学反応に対応して空隙率、透水係数、拡散係数などが変化することが考えられるので、より現実的な評価を行うには、化学反応と物理的変化の相互作用をモデル化するとともに、劣化時の特性を測定することが必要である。

4.2 第2章から抽出された課題

(1) 地下空洞安定性の検討

本研究では、円形トンネルに対する2次元解析により、地下空洞の掘削時安定性を概略検討した。しかし、例えば、サイロ型のように円筒形の地下空洞の掘削時安定性は3次元的影响を考慮すべきであり、より適切なモデルによる地下空洞安定性の検討が必要である。

(2) 構造物安定性の検討

数万年以上という長期間にわたるTRU廃棄物処分場の安全性を確認するためには、長期にわたって作用する荷重（水圧、土圧）に対する構造物の安全性の検討が不可欠である。水圧、土圧の作用により処分場全体は3軸圧縮に近い状態になることが予想され、その場合には3次元的な耐荷構造を考慮した検討が必要となる。

4.3 第3章から抽出された課題

(1) I-129 対策

I-129 に対しては、吸着、溶解度、拡散バリアの面からでは有効な対策が見いだせない。残る対策としては、廃棄体マトリックスをより健全性の高いものにし、その溶解速度を低減することを考えなければならないであろう。

(2) Pu対策

Puは、酸化雰囲気では溶解度で制限されず、高いフラックスを示す場合がある。そこで、酸化雰囲気でもより低い溶解度を持つ沈澱を探るか、処分場が還元雰囲気で保てるような対策を考える必要がある。

(3) Ra-226対策

Ra-226の放出を低減するには、その親核種であるTh-230の放出を抑制する必要がある。Thは、今回使用したパラメータでは沈澱を形成しないが、その最大濃度は、溶解度と同じ桁まで及んでいることから、より精度の高い溶解度データないしは他の配位子とで沈澱を形成するかもしれない。もし、沈澱が形成されれば全体の放出率を低下させることができる。

4.4 TRU廃棄物処分研究全体に対する課題

(1) TRU廃棄物インベントリの予測

評価の基礎データであるTRU廃棄物のインベントリは、未だ不確定要素が多い。評価の基礎であるだけに、より確度の高いデータの取得が望まれる。

(2) 溶解度データ

TRU廃棄物の評価において核種の溶解度は主要パラメータであるが、その精度には、まだ次のような問題点がある。①核種の溶解度を定める、処分施設内での化学的雰囲気が十分な信頼性を持って得られていない。②熱力学データから得られた溶解度には著しく低いものがあり、中には溶解度測定による検証が不可能なものもある。その様なデータの扱いには注意が必要である。③熱力学データベースのデータはまだ全てが確定的な値になっているわけではない。

そこで、より正確な評価を行うためには、次の項目についてさらに検討する必要があると考えられる。

- ・地下水、空隙水組成のより精密な予測
- ・著しく低い溶解度の再評価
- ・熱力学データベースの信頼性の向上