

# 人工バリアシステムの設計研究(II)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究報告書)

## 概 要

1987年 8 月

三菱金属株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団  
技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 人工バリアシステムの設計研究(Ⅱ)

市川倫夫\*

## 要 旨

本研究には、次の二つの内容が含まれている。

第1部 TRU廃棄物処分システム(人工バリア)の設計研究

第2部 地層条件の人工バリアの設計基準に与える影響の検討

第1部では、動力炉・核燃料開発事業団から発生するTRU廃棄物を対象として、処分における人工バリアの役割と処分システムの基本概念を検討し、人工バリアシステムの性能評価手法の検討、設計基準の設定、性能評価計算の実施を通じて、設計研究を行った。

その結果、

- ・アスファルト固化体LA系は、浅地中処分、
- ・アスファルト固化体MA系とプラスチック固化体は、施設透水係数が $5 \times 10^{-11}$  m/sの深地中処分、
- ・プルトニウム廃棄物は、施設透水係数が $5 \times 10^{-12}$  m/sの準地層処分、

という処分方式を採用することにより、安全に処分できる見通しが得られた。また、評価の過程において、TRU核種の地球化学的挙動を把握することが重要であるという点が、明らかにされた。

第2部では、我が国で地層処分の研究対象となると思われる種々の地層について、地層の安定性や地層と地下水の物理的、化学的な特性を調査したが、

- ①「人工バリアシステムの設計研究(Ⅰ)」で設計した人工バリアシステムは、かなり安全側のパラメータを用いて性能評価を行っている。
- ②我が国の地層や地下水の基礎データが不足している。

ということにより、「人工バリアシステムの設計研究(Ⅰ)」で設計した人工バリアシステムを積極的に変更すべきであるという結果は得られなかった。

地層条件に応じた人工バリアシステムの性能評価研究を進めるためには、地層や地下水の基礎的データの取得に努めるとともに、完成度の高い地球化学コードを導入し、性能評価研究をより現実化することが望まれる。

---

本報告書は、三菱金属株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果の概要である。

事業団担当部化室および担当者：環境資源部廃棄物対策室、梅木博之

\*：三菱金属株式会社原子力技術センター

Aug., 1987

Design Study of Engineered Barrier System(II)

Michio Ichikawa\*

Abstract

This study consists of two major parts as follows :

Part 1 Design study of engineered barrier system for TRU waste disposal

Part 2 Effects of geological conditions on design criteria of engineered barrier system for HLW disposal.

In Part 1, the design study was performed to clarify the role of engineered barrier and preconceptual design of TRU waste disposal system, to review methodology for performance assessment, to propose the plain design criteria, and to assess the performance of engineered barriers.

The result shows that TRU waste disposal is feasible in a form of :

- shallow land disposal for bituminized waste LA,
- deeper-than-20m facility with the hydraulic conductivity of  $5 \times 10^{-11}$ m/s for bituminized waste MA and plastic-incorporated waste,
- deeper-than-100m facility with the hydraulic conductivity of  $5 \times 10^{-12}$ m/s for plutonium waste.

In the course of the assessment, it was suggested that the geochemical behavior of TRU nuclides gave the significant effect on the result.

In Part 2, stability and physico-chemical properties of candidate geology for HLW disposal in Japan was surveyed. Although basic data on geology and groundwater was scarce, this derived the conclusion that no change may be needed for the engineered barrier system proposed in "Design Study of Engineered Barrier System (I)" because conservative parameters were used in that performance assessment.

In order to give the assessment more validity, further work on the effects of geological conditions needs the data acquisition for geological properties and utilization of appropriate geochemical model.

---

Work Performed by Mitsubishi Metal Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation  
PNC Liaison : Hiroyuki Umeki, Waste Isolation Office, Waste Management and Raw Material Division

\* : Mitsubishi Metal Corporation, Nuclear Engineering Center

## 第1部

TRU廃棄物処分システム（人工バリア）

の設計研究

## 目次

まえがき	1 - 1
1 TRU廃棄物の処分における人工バリアの役割	1 - 2
2 TRU廃棄物の処分システムの基本概念	1 - 3
3 人工バリアシステムの性能評価手法	1 - 4
3.1 水理バリア性能の評価手法	1 - 7
3.2 化学バリア性能の評価手法	1 - 8
4 人工バリアシステムの設計基準	1 - 10
5 人工バリアシステムの性能評価計算	1 - 11
5.1 施設内地下水中の核種濃度	1 - 11
5.2 水理バリアによる希釈効果	1 - 12
5.3 各廃棄物の処分に要求される水理バリア特性	1 - 13
6 TRU廃棄物処分システムの設計研究	1 - 15
6.1 廃棄物ブロック	1 - 15
6.2 充填材	1 - 17
6.3 シール	1 - 18
6.4 施設形状	1 - 18
7 今後の課題	1 - 19

## 图目次

Fig. 1 - 1 Effect of hydraulic conductivities on dilution of leachate from repository	1 - 1 4
--	---------

## 表目次

Table 1 - 1 Characteristics of TRU wastes	1 - 5
Table 1 - 2 Release coefficients of radionuclides	1 - 9

## まえがき

我が国の放射性廃棄物のうち、動力炉・核燃料開発事業団殿を中心に研究開発が行われている高レベル放射性廃棄物や既に事業化や法制面の整備が行われつつある低レベル放射性廃棄物に比べ、TRU廃棄物への対策は必ずしも充分ではない。現在までのところ、TRU廃棄物処分に関する技術開発はほとんど実施されておらず、処分概念も明確にされていないため、処理から処分に至る一貫性のあるシナリオの検討は行われていない。

TRU廃棄物は、高レベル放射性廃棄物に比べはるかに放射能は少ないものの、発生量および種類は多く、また、長寿命のアクチナイドを相当量含むという特徴を有する。これらの特徴に応じた処分システムの概念を早急に決定することは、TRU廃棄物の処理を合理化するとともに、放射性廃棄物全体の処分シナリオを検討するうえにおいても重要である。

本研究は、上記事項に資することを目的として、TRU廃棄物処分システムのうち人工バリアについて検討を行ったものであり、その内容は、以下の通りである。

1. TRU廃棄物の処分における人工バリアの役割
2. TRU廃棄物の処分システムの基本概念
3. 人工バリアシステムの性能評価手法
4. 人工バリアシステムの設計基準
5. 人工バリアシステムの性能評価計算
6. TRU廃棄物処分システムの設計研究
7. 今後の課題



## 1. TRU廃棄物の処分における人工バリアの役割

放射性廃棄物の陸地処分における安全確保の基本的考え方は、土壌や地層等の天然バリアと固化体、容器、充填材、施設構造物等の人工バリアを組み合わせることによって、廃棄物中核種の長期的閉じ込めと漏洩率の低減を図り、その環境中濃度を十分に低減させることにより安全性を確保するというものである。

このうち人工バリアに期待される役割としては、

- (1) 放射性廃棄物の長期間の閉じ込めを行い、放射性核種を減衰させる（時間バリア機能）
- (2) 放射性廃棄物からの放射性核種の漏洩率を低減させる（漏洩バリア機能）

の2つがあり、人工バリアの設計においてもこの役割を十分に発揮できるものとするのが望ましい。

TRU廃棄物に含まれる放射性核種のなかで半減期が比較的短いものについては、人工バリアの「時間バリア機能」が300年程度期待できる場合には、この期間中に十分なレベルにまで減衰し、その安全性を確保することが期待できる。

一方、半減期が比較的長いアクチニド核種/TRU核種は、300年程度の人工バリアの「時間バリア機能」によっては十分なレベルにまで減衰せず、その安全性を確保することが困難である。これらの核種は、前述の核分裂生成物核種に比べ、その化学的挙動は一般に複雑であり、水に対する溶解度は一定の化学的条件下ではかなり低くなることが報告されている。したがって、こうしたアクチニド核種/TRU核種の諸特性を考慮した場合、人工バリアに期待する機能としては、「時間バリア機能」よりも、むしろ「漏洩バリア機能」に期待することが効果的であると考えられる。この人工バリアの「漏洩バリア機能」は、具体的には更に次の2つの機能によって構成されると考えられる。

- (1) TRU廃棄物への年間接触水量を低減する機能（水理バリア機能）
- (2) TRU廃棄物に接触する地下水中の核種濃度を低減する機能（化学バリア機能）

以上述べた様に、TRU廃棄物の処分において人工バリアに期待する機能としては、単

に「時間バリア機能」のみでなく「漏洩バリア機能」をも重視することが望ましい。この理由は、TRU核種が一般に長半減期の核種であるため、時間バリアのみによって長期的安全性を確保することが技術的に困難であること、および、安全評価／性能評価の観点から、1000年のオーダーの長期耐蝕性を技術的に示すことは容易ではなく、むしろ収着効果や溶解度効果等による漏洩率の低減効果を示すことの方が容易であることである。

## 2. TRU廃棄物の処分システムの基本概念

原子力委員会および原子力安全委員会が示した考え方にに基づき、本研究においては、TRU廃棄物を、そのTRU核種濃度レベルに応じていくつかのカテゴリーに分類し、それぞれのカテゴリーに対して適切な処分方式を適用するという考え方を採用する。そして、この処分方式としては、「人間接近シナリオ」と「地下水移行シナリオ」に対する性能の違いを考慮し、次の処分方式を対象として検討を行う。

- (1) 浅地中処分・・・地表下20m以浅の処分施設であり、将来における「人間接近シナリオ」の発生を考慮する。施設が被覆層中に設けられるため、施設周辺の土壌の透水係数は比較的大きく、施設への「年間浸入水量」も比較的大きくなる。したがって、人工バリアからの「漏洩率」も相対的に他の施設よりも大きい。
- (2) 深地中処分・・・地表下20m以深の処分施設であり、将来における「人間接近シナリオ」の発生は無視することができる。施設全体が被覆層下部にある基盤岩中に設けられるため、施設周辺の岩盤の透水係数は比較的小さく、施設内への「年間浸入水量」も比較的小さくなる。浅地中処分施設に比べ、人工バリアからの「漏洩率」が相対的に小さい施設である。
- (3) 準地層処分・・・地層中数100m程度の深さの施設であり、将来における「人間接近シナリオ」の発生は無視することができる。施設周辺の岩盤の透水係数はかなり小さく、施設への「年間浸入水量」もかなり

小さくなる。さらに、深部地層中は地下水の化学的条件が還元性であるため、アクチニド核種やTRU核種の地下水への溶解度が小さくなり「地下水中濃度」が低くなるため、核種の人工バリアからの「漏洩率」がかなり小さな施設である。

一方、本研究において検討するTRU廃棄物としては、動燃事業団の各施設において発生している次の廃棄物を対象とする。

- (1) アスファルト固化体LA系
- (2) アスファルト固化体MA系
- (3) プラスチック固化体
- (4) Pu廃棄物

これらの廃棄物の核種濃度および諸特性は、表1-1に示す通りである。

以上に示した廃棄物の核種濃度および諸特性にもとづき、これらの区分方法と処分方式を安全性およびコストの面から総合的に評価するならば、次に示す区分方法と処分方式の組み合わせが最適であると考えられる。

浅地中処分	.....	アスファルト固化体LA系
深地中処分	.....	┌ アスファルト固化体MA系 └ プラスチック固化体
準地層処分	.....	

### 3. 人工バリアシステムの性能評価手法

1.において述べた様に、人工バリアの「漏洩バリア機能」は、水理バリア機能および化学バリア機能により構成される。ここでは、これらの評価手法について検討を行った。

Table 1-1 Characteristics of TRU wastes

## アスファルト固化体

核種	LA	MA
$^{60}\text{Co}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-1} \mu\text{Ci/g}$
$^{90}\text{Sr}$	$6 \times 10^{-3}$	1.4
$^{95}\text{Zr}$	—	$1 \times 10^{-2}$
$^{95}\text{Nb}$	—	$1 \times 10^{-2}$
$^{106}\text{Ru}$	$8 \times 10^{-3}$	4
$^{125}\text{Sb}$	$9 \times 10^{-3}$	2
$^{134}\text{Cs}$	$4 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-1}$
$^{137}\text{Cs}$	$7 \times 10^{-2}$	4
$^{144}\text{Ce}$	—	2
$^{233}\text{U}$	$1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$
$^{234}\text{U}$	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$
$^{235}\text{U}$	$6 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-6}$
$^{236}\text{U}$	$1 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
$^{238}\text{U}$	$1 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
$^{238}\text{Pu}$	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-2}$
$^{239}\text{Pu}$	$7 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-3}$
$^{240}\text{Pu}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$
$^{241}\text{Pu}$	$2 \times 10^{-4}$	2
$^{242}\text{Pu}$	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-5}$
$^{241}\text{Am}$	$2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-1}$
表面線量率	30	1300 mR/h
発熱量	$2.5 \times 10^{-10}$	$1.7 \times 10^{-8} \text{ W/g}$

continue

プラスチック固化体

$^{106}\text{Ru}$	$2 \times 10^{-2} \mu\text{Ci/g}$
$^{125}\text{Sb}$	$2 \times 10^{-4}$
$^{129}\text{I}$	$3 \times 10^{-4}$
$^{239}\text{Np}$	$9 \times 10^{-12}$
$^{238}\text{Pu}$	$1 \times 10^{-9}$
$^{239}\text{Pu}$	$1 \times 10^{-10}$
$^{240}\text{Pu}$	$2 \times 10^{-10}$
$^{241}\text{Pu}$	$4 \times 10^{-8}$
$^{241}\text{Am}$	$8 \times 10^{-10}$
$^{243}\text{Am}$	$9 \times 10^{-12}$
$^{244}\text{Cm}$	$7 \times 10^{-10}$
表面線量率	1 mR/h
発熱量	$1.0 \times 10^{-16}$ W/g

プルトニウム廃棄物

$^{238}\text{Pu}$	$7 \times 10^2$
$^{239}\text{Pu}$	$9 \times 10^1$
$^{240}\text{Pu}$	$2 \times 10^2$
$^{241}\text{Pu}$	$6 \times 10^3$
$^{242}\text{Pu}$	$5 \times 10^{-1}$
表面線量率	400 mR/h
発熱量	$3.0 \times 10^{-5}$ W/g

### 3. 1 水理バリア性能の評価手法

「地下水移行シナリオ」においては、通常、人工バリアの性能は、年間接触水量を低減することによって高めることができる。年間接触水量を低減するためには、

- (1) 処分施設を透水係数の低い天然バリア中に設置する
- (2) 処分施設自身の透水係数を低くする

という2つの基本的方法がある。

具体的に施設の年間接触水量を評価する場合には、これら2つの「組み合わせ効果」を評価する必要がある。また、施設のタイプによっても具体的な評価の考え方と評価モデルが異なってくる。

まず、「浅地中処分施設」においては、施設が比較的透水係数の大きな通気層中に設置されると考えられる。この場合、施設周辺の地下水流は通気層中を鉛直下方向に流れる通気層中浸潤水であり、それは一般に不飽和浸透流である。また、施設に浸入した地下水の挙動は、地下水浸入のシナリオ等によって異なり、かつ、これらの地下水の挙動は一般に部分不飽和浸透流となると考えられる。

こうした不飽和浸透流解析は、通常、「クルートの土壌水分拡散方程式」を有限差分法や有限要素法等によって解くことにより、解析することができる。しかしながら、解析を簡単化するために、地下水浸入シナリオを単純化し、降雨浸潤水が全量もしくは一定比率だけ施設へ浸入／浸出するという仮定や、施設内は地下水で飽和状態になっているという仮定など、簡略かつ保守側の仮定を採用することが実際的である。

一方、「深地中処分施設」もしくは「準地層処分施設」においては、施設は帯水層下部の地層中に設置されると考えられる。この場合、施設周辺の地下水流は比較的透水係数の小さい地層中を流れる地下水であり、これは一般に飽和浸透流である。また、施設に浸入した地下水の挙動は、地下水浸入のシナリオによって余り異ならず、飽和浸透流解析によって解析することが可能である。

こうした飽和浸透流解析は、通常、「ナビエ・ストークス方程式」を、有限差分法、有限要素法等によって解くことにより解析することができる。現在、こうした飽和浸透流解析を行う計算コードが世界的に多数利用されている。

なお、こうした施設の浸透流解析においては、解析作業の簡略化の方法として、施設全体に一つの「マクロ透水係数」を与えて解析を行うことが考えられ、本研究においてはこの簡略化モデルを用いることとする。

### 3. 2 化学バリア性能の評価手法

T R U 廃棄物処分の特徴の1つである長期性を考慮して地下水中核種濃度を保守側に予測、評価する基本的なモデルとしては、

- (1) 施設充填材等による核種収着を評価し、収着の度合を表す「分配係数」を用いて地下水中核種濃度を評価する。(放出係数モデル)
- (2) 施設内地下水の化学的条件を評価し、この条件のもとでの核種の「溶解度」を用いて地下水中核種濃度を評価する。(溶解度モデル)

の2つがある。

このうち「放出係数モデル」は、

「収着性を持つ固層と接触する液層中に存在する核種は、固層への収着作用により液層と固層の間に分配平衡を生じ、液層中核種濃度(地下水中核種濃度)と固層中核種濃度(廃棄物中核種濃度)の間に一定の比例定数で表される平衡が生じる。」

という考え方にもとづき、廃棄物中核種濃度から地下水中核種濃度を推定するモデルである。そして、この場合の比例定数を「放出係数」と呼んでいる。

この「放出係数」は、経験的に与えられる係数であるが、保守的かつ簡易な推定方法としては、廃棄物周辺に設置される充填材の「分配係数」を用い、この逆数をもって「放出係数」とする方法が考えられる。

この「放出係数モデル」および「放出係数」は、米国、英国、仏国の陸地処分の安全評価研究において用いられており、また、最近、我が国の原子力安全委員会における「低レベル放射性廃棄物の濃度上限値」の評価モデルとしても用いられている。

これら、諸外国の研究において用いられている「放出係数」の例を表1-2に示す。

Table 1 - 2 Release coefficients of radionuclides

NRPB (NRPB-R161)

放出係数		放射性核種
平均値	範囲	
$1 \times 10^{-1}$	$6 \times 10^{-3} \sim 2$	I, Cs, Tc
$3 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-1}$	Sr, Ru
$3 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-3}$	U, Pu, Am, Zr, Nb, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Ce, Pm, Sm, Eu アクチノイドの娘核種

NRC (NUREG-0782)

Basic Nuclide	Calculated Ratio	Other Nuclides	Assumed Ratio
H-3	1.15	Tc-99 I-129	0.115 0.115
C-14**	$5.76 \times 10^{-3}$		
Co-60	$1.48 \times 10^{-2}$	Fe-55 Ni-59 Ni-63 Nb-94	$1.48 \times 10^{-2}$ $1.48 \times 10^{-2}$ $1.48 \times 10^{-2}$ $1.11 \times 10^{-2}$
Sr-90	$9.86 \times 10^{-3}$		
Cs-137	$1.62 \times 10^{-4}$	Cs-135	$1.62 \times 10^{-4}$
U-238**	$1.25 \times 10^{-4}$	U-235	$1.25 \times 10^{-4}$
Pu-239†	$4.67 \times 10^{-4}$	Pu-238 Pu-241 Pu-242 Np-237 Cm-243 Cm-244	$4.67 \times 10^{-4}$ $4.67 \times 10^{-4}$ $4.67 \times 10^{-4}$ $4.67 \times 10^{-4}$ $4.67 \times 10^{-4}$ $4.67 \times 10^{-4}$
Am-241	$4.11 \times 10^{-3}$	Am-243	$4.11 \times 10^{-3}$

\*Ratio of the leachate concentration (in Ci/m<sup>3</sup>) to the waste concentration in (Ci/m<sup>3</sup>). Assumed ratios are estimated based on chemical similarities between the basic nuclide and the nuclide of concern.

\*\*Calculated using West Valley leachate concentrations and Maxey Flats inventories.

†The calculated ratio includes Pu-238.



一方、「溶解度モデル」は、TRU核種の溶解度を推定することにより地下水中核種濃度を推定するモデルである。

一般に、特定の化学的條件（通常、還元性の雰囲気）のもとでは、TRU核種は水に対する溶解度が極めて低くなり、この溶解度が実質的に地下水中核種濃度の上限値となる場合がある。したがって、地下水中核種濃度を予測するモデルとして、一定の化学的條件のもとでのTRU核種の溶解度を予測するモデルを用いることが考えられるが、現在のところ、この「溶解度モデル」としては、現在、欧米各国において開発と適用が進められている「地球化学的計算コード」を用いることが妥当である。

「溶解度モデル」は、特に地層処分や準地層処分のような、地下水の化学的條件が還元性の雰囲気を形成していることが期待される処分方式において地下水中核種濃度を推定する場合に有効である。

#### 4. 人工バリアシステムの設計基準

放射性廃棄物の陸地処分の安全性は、次のプロセスにより、確保されると考えられる。

- (1) 人工バリア内部での閉じ込めによる核種の減衰（時間バリア機能）
- (2) 人工バリア内部からの核種の漏洩率の制御（漏洩バリア機能）
- (3) 天然バリア内部での閉じ込めによる核種の減衰（時間バリア機能）
- (4) 天然バリア内部での拡散希釈（希釈バリア機能）
- (5) 環境水系（河川、湖沼等）による拡散希釈（希釈バリア機能）

いま、陸地処分システムの安全目標を、

環境水系の水を飲用する公衆の受ける被曝線量が「 $1\text{ mrem}/\text{年}$ 以下」（基準線量）となること

とした場合、環境水系での核種濃度が「最大許容濃度の $1/5000$ 以下」（基準濃度）

となることを目標とする必要がある。

この場合、人工バリアの設計基準としては、本来、天然バリアのバリア性能と合わせて上記の環境水系の基準濃度を達成する人工バリア性能を設計することが妥当であるが、本研究においては、処分サイトも定まっておらず天然バリア性能が明確になっていない段階での検討を行うことから、人工バリアの設計基準としては、

人工バリアから漏洩した核種の地下水中濃度が最大許容濃度の $1/10$ 以下となることを目標とする。

この設計目標は、この後、天然バリア中での核種の減衰、環境水系中での核種の希釈、という2つの安全ファクターが存在し、かつ、これら2つのファクターにより、十分に $1/500$ 程度の減衰と希釈が期待できることから妥当な設計目標であると考えられる。ここで「人工バリアから漏洩した核種の地下水中濃度」とは、施設から漏洩した直後に施設周辺地下水によって希釈される効果をも含んだものである。

## 5. 人工バリアシステムの性能評価計算

前節までの検討に基づき、TRU廃棄物処分システムの性能評価計算を行った。各廃棄物と接触した地下水中の核種濃度の計算及び水理バリアによる希釈効果の計算結果から、各廃棄物の処分に必要な水理バリア特性を検討した。

### 5.1 施設内地下水中の核種濃度

2.における検討結果に従い、各廃棄物処分施設内地下水中の核種濃度の検討に当たり、次のモデルを採用した。

- |               |         |
|---------------|---------|
| ・アスファルト固化体LA系 | 放出係数モデル |
| ・アスファルト固化体MA系 | 放出係数モデル |
| ・プラスチック固化体    | 放出係数モデル |

各廃棄物についての結果は次の通りである。

① アスファルト固化体LA系

廃棄体からの浸出液に含まれるアクチナイド/TRU核種の濃度は、基準濃度を越えることはない。Cs-137及びSr-90が初期に基準濃度の $10^3$ 倍の濃度となっているが、300年後には基準濃度にまで減衰する。

なお、浅地中処分は我が国において、現在事業化が進められており、本研究のような一般的フィージビリティ評価における検討対象となるだけの課題は無いと考えられるため、以後検討対象から除外した。

② アスファルト固化体MA系

初期数百年はSr-90が、その後の数千年はAm-241が廃棄物の毒性を支配する。廃棄体の全毒性は、初期の100年が基準濃度の $10^4 \sim 10^5$ 倍、300年後が $10^2$ 倍であり、基準濃度に達するのは3000年後である。

③ プラスチック固化体

初期にはRu-106が放射能の大部分を占めるが、毒性ではI-129が全期間を通じ支配的となる。廃棄物の毒性は基準濃度の $10^3$ 倍である。

④ プルトニウム廃棄物

Puの溶解度は $6.0 \times 10^{-14} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ M、Uの溶解度は $4.4 \times 10^{-10} \sim 3.3 \times 10^{-6}$ Mの範囲にある。これから、プルトニウム廃棄物の毒性は、最悪の場合でも、基準濃度の数倍に過ぎないといえる。

5.2 水理バリアによる希釈効果

アスファルト固化体LA系を除いた処分の方式である深地中処分及び準地層処分を対象として、次の考え方にに基づき、処分施設のマクロ透水係数と施設周辺の透水係数をパラメータとして希釈効果の検討を行った。

地下水流れ方向に対し施設の長さ方向を垂直に配置した。岩盤中を施設の上流から流れてくる地下水は、施設の透水性に応じ一部が施設を貫流し、施設の下流において施設を迂回した流れと合流する。施設に侵入した地下水には、放出係数モデル或いは溶解度モデル

で与えられる濃度の核種が含まれており、それは流れの合流が起こる施設の下流において施設を迂回してきた地下水により希釈されると考えた。このような状況を二次元有限要素法を用いて解析した。

岩盤の透水係数を  $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$ 、処分施設の透水係数を  $10^{-14} \sim 10^{-4} \text{ m/s}$  の範囲で変化させたときの、希釈効果の例を図1-1に示す。図に示したのは、施設の断面が円形の場合である。施設の透水係数が岩盤の透水係数よりも大きい場合に、希釈率を次式で表すことにすると、

$$\text{希釈率} = F \times (\text{岩盤の透水係数}) / (\text{施設の透水係数})$$

Fは、施設の断面が円形の場合に0.5、長方形のときには、0.2程度の値をとる。

### 5.3 各廃棄物の処分に要求される水理バリア特性

アスファルト固化体MA系とプラスチック固化体を処分する深地中処分施設及びプルトニウム廃棄物を処分する準地層処分施設のそれぞれに要求される透水性を明らかにするためには、施設周囲の岩盤の透水性を想定することが必要である。ここでは、岩盤の透水性を以下のように設定した。

- ・ 深地中処分  $10^{-7} \text{ m/s}$
- ・ 準地層処分  $10^{-9} \text{ m/s}$

5.1での検討から、各処分方式において必要なマクロ透水係数は、次のようになる。

- ・ 深地中処分に必要な希釈率は  $10^3$  とする。プラスチック固化体はこの希釈率で全期間において十分な安全性が確保される。アスファルト固化体MA系では、この希釈率で安全が確保できるのは200年経過後以降である。それ以前の期間に問題となる核種はSr-90であり、容器の健全性維持及び充填材への収着による閉じ込めを行うことが、実際的と考えられる。したがって、施設のマクロ透水係数として、 $5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ が必要である。
- ・ 準地層処分に付されるプルトニウム廃棄物は、処分上周辺の化学的環境が好適であれば、地下水による希釈にほとんど頼らずに、核種の溶解度により基準以下の濃度が維持される。但し、溶解度による今回の評価には、不確定な因子が含まれているため、安全マージンを

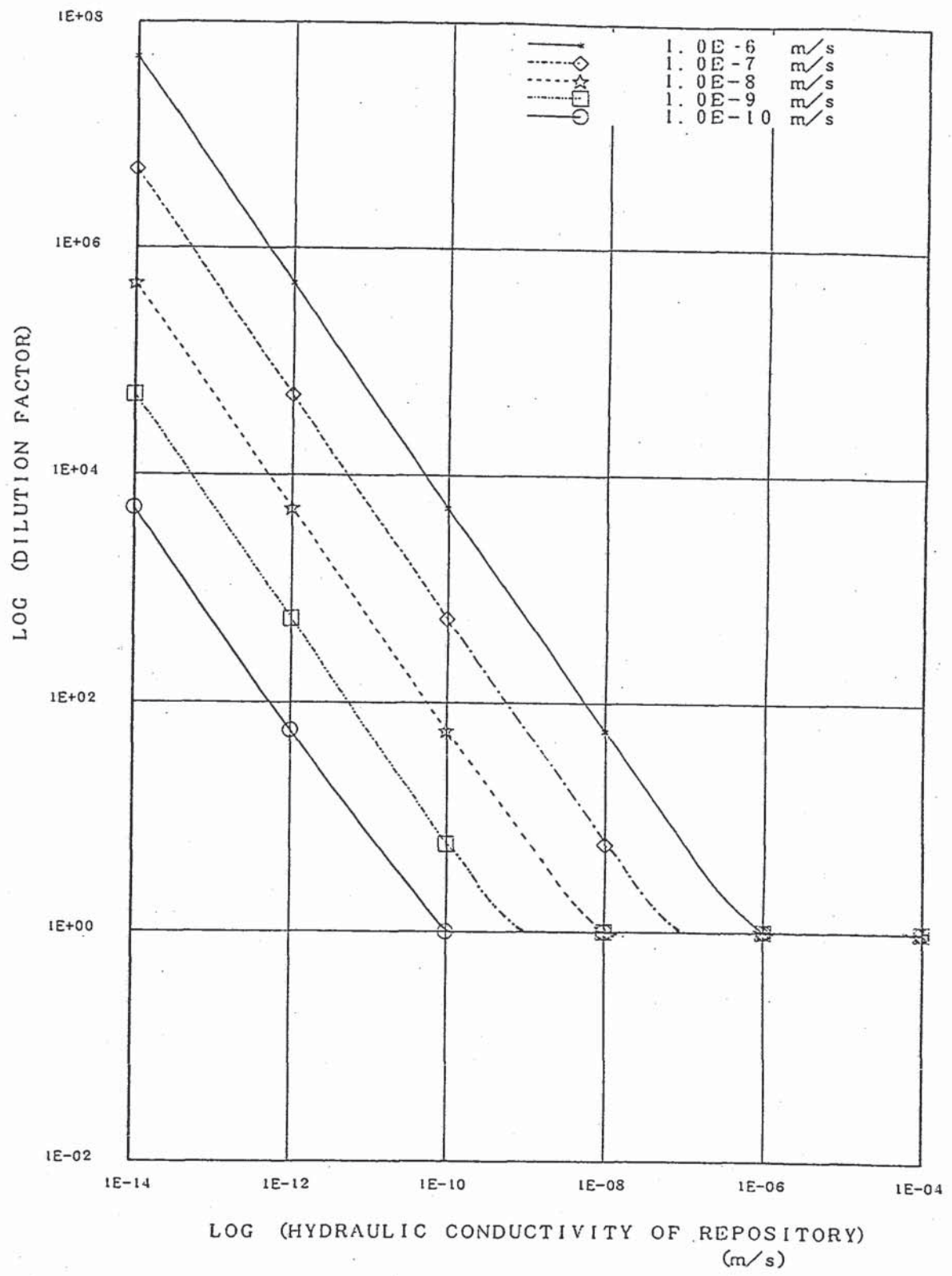


Fig. 1 - 1 Effect of hydraulic conductivities on dilution of leachate from repository

持たせて、必要な希釈率を $10^2$ 倍に設定しておく。これから、施設のマクロ透水係数は $5 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ が必要である。

## 6. TRU廃棄物処分システムの設計研究

TRU廃棄物処分システムの人工バリアとして、廃棄物ブロック、充填材、シール、施設を想定し、検討を行った。

### 6.1 廃棄物ブロック

廃棄物特性を考慮し、廃棄体を2グループに分けて検討を行った。

- ・アスファルト固化体MA系とプルトニウム廃棄物
- ・アスファルト固化体LA系とプラスチック固化体

#### (1) アスファルト固化体MA系とプルトニウム廃棄物のブロック化

これらの廃棄物は輸送、搬入に伴うハンドリング時にブロックを遮蔽材として機能させることが要求されるので、処分施設への搬入時には、すでにブロック化されていることが必要である。したがって、いずれかの地上施設においてブロック化が行われるため、通常のコングリート打設と施工方法そのものに大きな違いは無い。但し、次の点を考慮することが必要である。

- ・型枠には、型枠とブロックを一体化するものとブロック作成後型枠を取り外すものがある。現行工程に大幅な変更を加えないことを前提とすれば、放射線下の作業となるのは、主に、後者の型枠の撤去作業となる。
- ・取り外しを前提とした型枠を使用する場合には、剥離剤の放射線分解生成物の影響、及び、型枠の機械的支持力を増加させるための補強工程に操作性の改善が必要である。

以上から、これら廃棄物については、次のような施工法が考えられる。

コンクリート製型枠を使用し、廃棄物をその中に納めコンクリート充填後、型枠と一体となるようなコンクリートブロックを作成する。廃棄物周囲のコンクリート厚さを、50 cm程度とれば、廃棄物表面の線量率を2桁減少させることができる<sup>2)</sup>。作業の遠隔化は現状技術で充分対応可能であり、技術開発の中心は経済的工法の決定にある。なお、ブロック一体当たりの廃棄体本数は、輸送方法、処分施設の諸元等に依存するため、今後の検討課題である。

## (2) アスファルト固化体L A系とプラスチック固化体のブロック化

これらの廃棄物では、ブロック化の時期や場所を決定する技術的要件は無い。輸送の面からは、廃棄物の重量及び体積が少なくすむ処分施設内IN SUTUでのブロック化が有利と考えられる。但し、この方式ではブロック体の品質検査における制約が生ずる。OFF SITEブロック作成は、アスファルト固化体MA系とプルトニウム廃棄物の場合と同様であり、 $\gamma$ 線強度が弱い分だけ更に容易である。以下に、IN SUTUでのブロック化の施工法について記すが、OFF SITE、IN SUTUいずれの方式が有利であるかの判断を行うことは、現時点では困難である。

廃棄体はOFF SITEの場合と同様コンクリート製の型枠を兼ねたパレットに入れられて、施設に搬入、定置されるとする。一度にブロック化可能な大きさは、一般建築物の施工では、水和熱の発生と周囲温度の変動による膨張、応力の影響を許容範囲に納めるため、通常水平方向20 m程度が最大とされている。また、垂直方向の最大打設高さは、型枠の強度に依存するが、一般の施工では2 m程度とされている。水平方向に更に大きな一体物の製作には、千鳥格子状の打設等応力を緩和させるための工夫をこらした施工法が必要とされている。一度に大きなブロックを作成することの積極的な意義は、これら廃棄物の処分においては見出せないので、施工が簡便となる大きさにブロックの形状を区切ることが有利と考えられる。その際、地下施設では周辺温度の変動は地上より小さいと予想されるが、これは本質的にサイト・スペシフィックな特性であるので、ここでは、地上施設と同様な基準を採用することが妥当と思われる。すなわち、20 m程度の大きさを単位としてブロック化を行うことが適当である。

施設に廃棄物を適当量搬入したら、コンクリート壁を設け、その内側にコンクリートを流し込む。数10 mのコンクリート移送には現状技術での対応が特に困難な課題は無いと思われる。10 m程度まではフレキシブル・ブーム、それ以上の距離は配管により、更に場合によっては流動化剤を併用することなどにより施工可能である。

但し、この場合には、施工後の品質管理が困難であるため、パイプレータの適切な使用並びにそのための遠隔化等の技術開発が必要である。

## 6.2 充填材

5.で行った性能評価から導かれたマクロ透水係数を実現できるような充填材の透水係数について、検討を行った。検討に当たり、次の前提条件を設定した。

- ① 廃棄物固化体は事実上不透水性とする。
- ② したがって、透水領域は廃棄物の周りのコンクリートと充填材の2元系とする。
- ③ コンクリートは長期間経過後には土壌と同じようなものとなる。

充填材とコンクリートの透水係数と共に、それらの体積比、空間配置もマクロ透水係数に影響をあたえるが、現在までの検討では、廃棄物の配置方法を決定するに十分な情報は得られていない。それゆえ、Hashinらが提案した地下水流れの仕事を極小とする変分原理から導かれる保守的評価法により検討を行った。

その結果、劣化後のコンクリートの透水係数は $10^{-5} \sim 10^{-9}$  m/sの範囲では、充填材の透水係数に影響を与えず、充填材の体積が廃棄物ブロックのコンクリートと同等以上であれば、充填材透水係数の目標値はマクロ透水係数の20%程度であることが示された。

このような低い透水性を実現するためには、材料としては、ベントナイトのような止水性に優れたものを用いることが必要である。

ベントナイトを充填材に使用する場合、支持力がそれほど必要無い廃棄体上部や側面と支持力が要求される施設床面の施工を分けて考えることが適当である。

施設床面への充填には、機械的支持力を高めるためベントナイトに粉砕岩石を混合した物を用いる。粉砕岩石の混合による透水性の増加は、締め固めの密度を増加させることにより補償する。具体的施工法としては、予め圧密整形した充填材ブロックを敷き詰める、その場で粉体を締め固める、及び、これらを併用するなどの方法が考えられる。

廃棄体上部や側面への充填は、一部圧密ブロックを用いるにしても、遠隔操作性に優れたニューマチックな粉体吹き着けなどを取り入れることが有利である。吹き着けでは機械的圧密程の充填密度を得ることは困難であるため、ベントナイト単体、或いは混合物を用



いる場合にはベントナイト含有量を高めたものを使用することが必要である。

### 6.3 シール

処分施設へのアクセス坑やサイト特性調査のための探査坑は、天然バリアの潜在的なバイパスと成りうる。シールやプラグングは、天然バリアの人為的に乱された部分を本来の特性に回復させるものであり、積極的な意味でのバリアではない。第5章における性能評価では、シール部は未擾乱の天然バリアと区別することは行っていない。したがって、それに関する設計研究では、別途シールへの要件を抽出することから作業を進めることが必要であり、ここでは、一般的な要件及び概念を示すに留める。

シール技術は石油産業において既に開発、実証されており、主にセメント系材料が使用されている。一方、放射性廃棄物の処分施設のシールにおいては、次のような機能、特性が要求されている。

- ①地下水移行の抑制
- ②シール領域の構造的強度の維持
- ③岩体との両立性、化学的安定性

このなかで、③への要求が既存技術に比べ特に高度なものとなっている。

現在提案されているものは、セメント系材料とベントナイトを相互に重ね多層構造としたものである。

### 6.4 施設形状

第5章の水理バリアに関する検討から、施設形状のついて次のことが言える。

- ①地下水流に対する施設断面積が小さい程、施設からの核種漏洩量は減少する。
- ②地下水流に対する施設断面形状が四角形の場合より円形のほうが、施設からの核種漏洩量は減少する。

②の円形施設は、掘削に伴う土水圧がシール効果により軸力に変えられるため構造安定性の面でも有利である。また、廃棄物からの発熱は僅かであり、その影響を考慮する必要は

無いので、廃棄物の配置においては、空間の有効利用の観点から廃棄物定置密度を上げることが重要である。

以上から、施設形状としては、大空洞／サイロタイプが、その掘削が可能であれば、優れている点を多く有すると思われる。但し、掘削可能性は基本的にサイトの地質条件に依存するため、ここでの検討結果に基づき施設形状の優劣を評価することはできない。

施工については、大規模な岩盤掘削技術は地下揚水発電所や石油備蓄において既に実用化されており、施工機械の自動化、精密化など近年の進歩は著しいものがある。廃棄物処分施設の建設に特有の課題として、特に困難なものは無く、安全性や効率を更に改善することが残されている。

## 7. 今後の課題

今後TRU廃棄物の処分システム（人工バリア）の設計研究を、より具体的に進めてゆくために必要な検討課題を、以下にまとめた。

### (1) 性能評価のために必要なデータ

#### ① サイトの化学特性に関するデータ

性能評価計算において、地下水の化学組成によっては、アクチニド核種の溶解度を極めて低い濃度にできることが示された。そのため、サイト特性として、岩盤の力学的・構造的安定性や空間的広がり・位置、水理特性などとともに、アクチニドの溶解度を低減する化学的特性として当面代表的と考えられる範囲を明確にすることが、設計研究を進めるうえで有効である。

#### ② 溶解度評価のための熱力学的データ

溶解度評価にはサイトの化学特性とともに、核種の溶解度積、錯体の安定度定数、標準エンタルピー変化などの熱力学的定数を整備する必要がある。これらのデータは諸々の機関で測定が行われているが、その値の信頼性には必ずしも問題が無いわけではなく、値の選定に当たっては、クリティカル・レビューが要求される。その作業は学問的、科学的色彩の濃いものであり、単独の機関ないしは我が国のみで対応できる

ものではない。国際的な協力のもとで遂行すべきものと考えられる。

### ③ T R U 廃棄物の発生量および処分時期

今年度の設計研究は、主に安全評価からの要件を設計に反映させたものであり、技術的フィージビリティの検討を行った。T R U 廃棄物の処分を実施するに当たっては、さらに、経済性を評価することが必要である。適切な発生量予測に基づき、処分時期を設定することは、今後の研究開発の指針の一つとなるだけでなく、例えば、高レベル廃棄物との一元化した処分方式など、経済性からの処分システムへの要件を抽出するための基礎となる。

## (2) 性能評価モデルの整備

### ① 地球化学コード

(1)で述べたように、ソースタームの評価を現実的なものとするための有力な手段として、地球化学コードの導入・整備を図る。熱力学データベースの大きさ、その拡張性、並びに吸着や反応経路の評価への適用性など、各コードの特徴と評価の目的とを比較検討し、適切なコードを選定することが重要である。

### ② 水理バリアモデル

本研究の性能評価は、施設からの核種の漏洩濃度を指標とするものであった。この方法では、廃棄体からの漏洩濃度が基準濃度を越える分は希釈により無害化するという考え方に基づいている。これは、本研究のように、一般的とはいえある特性で代表させた天然バリアのなかに建設する人工バリアの評価を行う場合には妥当性を有する方法である。この点は、将来行われる処分システム全体の安全評価とは明確に区別されるべきである。つまり、結果のみから、希釈水量が多い天然バリアのほうが処分の安全性をより確実に確保できるという誤解を避けることが必要である。これは、天然バリア、人間環境を含めた系においては、人工バリアの設計基準となる指標を核種の濃度ではなく、漏洩量に変えるべきであることを示唆している。

## 第 2 部

# 地層条件の人工バリアの設計基準に 与る影響の検討

## 目次

まえがき .....	1
1 地層処分の調査対象地層の抽出 .....	2
2 人工バリアシステムに影響を与える地層の諸条件 .....	4
3 地層が人工バリアシステムの設計に与える影響の検討 .....	5
3.1 地層の長期安定性 .....	5
3.2 地下空洞の安定性 .....	5
3.3 地層の化学的性質 .....	6
3.4 地層の熱的安定性 .....	8
3.5 地層の放射線による影響 .....	8
3.6 地下水の物理的・化学的性質 .....	8
3.6.1 地下水の流速 .....	9
3.6.2 調査対象地層における地下水の水質 .....	10
3.7 まとめ .....	12
4 地層条件に応じた性能評価手法の検討 .....	14
あとがき .....	16

## 表 目 次

表 1 - 1	我が国に分布する主要な岩石 .....	3
表 1 - 2	我が国の主な岩石の分布状況 .....	3
表 3 - 1	地下空洞安定性の算定結果 .....	6
表 3 - 2	調査対象地層に含まれる鉱物と化学組成 .....	7
表 3 - 3	調査対象地層における地下水流速の予測 .....	9
表 3 - 4	各岩種における水質的特徴 .....	11
表 3 - 5	対象岩種中の地下水の水質総括表 .....	11

まえがき

昭和60年度に実施した「人工バリアシステムの設計研究〔I〕」においては、海外の人工バリアシステムの性能目標を参考に、

- ・ 1000年以上の放射性核種の閉じ込め期間
- ・  $10^{-5}$ /年以下の漏洩率

を設計基準として、ガラス固化体、250mmの鋳鋼製のオーバーパック、30cmのNa-ベントナイトから成る人工バリアシステムを設計し、その性能を評価した。

性能評価の結果は、充填材を30cmのNa-ベントナイトとした場合は、サイト条件、天然バリア条件や固化体の浸出率、核種の溶解度、容器の腐食率、充填材中での核種の拡散係数、分配係数、等の人工バリアシステムの性能を評価するパラメータが好ましくない値を示しても、設計した人工バリアシステムは、性能目標を十分に達成し得ることが示唆された。

もちろん、本性能評価において用いたガラス固化体の浸出率、核種の溶解度、容器の腐食率、緩衝材中での核種の拡散係数、分配係数、等のパラメータの値は、海外の研究成果ないし現在まで得られたデータから経験的に設定したものであり、その位置づけについては、検討の余地が残されている。

本年度は、我が国の地層を対象に、

- ① 地層処分の調査対象地層の検討
- ② 人工バリアシステムに影響を与える地層条件の検討
- ③ 地層が人工バリアシステムの設計に与える影響の検討
- ④ 地層条件に応じた性能評価手法の検討

を行い、地層の諸条件が人工バリアシステムの性能に及ぼす影響を定性的に考察した。

## 1. 地層処分の調査対象地層の抽出

我が国の地層の特徴を背景に、表1-1に示す我が国に分布する主要な岩石と表1-2に示す岩石の分布状況より調査対象候補地層を抽出し、これらの地層について、海外での調査対象地層、地層処分サイト選定に関するガイドラインに示されている不適格とされる岩体などを参照し、地層処分の調査対象地層を抽出した。その結果をまとめ下記に示す。

なお、抽出された地層は、人工バリアシステムの設計に与える影響を検討するために我が国の代表的な地層を抽出したものであり、本研究で抽出されなかった地層が、地層処分に不敵格な地層であるとするものではない。

変成岩：広域変成岩（片麻岩，結晶片岩，片岩）

堆積岩：頁岩

泥岩

凝灰岩

火成岩：花崗岩

流紋岩

輝緑岩（玄武岩）



表 1 - 1 我が国に分布する主要な岩石

[ ] 内は、貫入岩を示す

岩石区分		主 な 岩 石
変成岩	広域変成岩	片麻岩, 結晶片岩, 千枚岩など
火成岩	超塩基性岩	[橄欖岩], [蛇紋岩] など
	塩基性岩	玄武岩 (輝緑岩), [斑れい岩] など
	中性岩	安山岩, [閃緑岩], [ひん岩] など
	酸性岩	石英安山岩, 流紋岩, [花崗岩類 (花崗岩, 花崗閃緑岩, 花崗斑岩)] など
堆積岩	碎屑岩	泥, 砂, 礫, 泥岩 (頁岩, 粘板岩), 砂岩, 礫岩など
	火山碎屑岩	火山灰 (スコーリア, ローム), 凝灰岩, 凝灰角礫岩など
	その他	石灰岩, 石炭, チャートなど

(注) 平凡社, 地学事典: (1981). 地質査所, 日本地質アトラス: (1982) より作成.

表 1 - 2 我が国の主な岩石の分布状況

岩石区分		面積 (km <sup>2</sup> )	面積率 (%)	
変成岩	広域変成岩	16,900	4.6	
火成岩	超塩基性岩 - 中性岩	5,980	1.6	
	酸性岩	白亜紀 ~ 古第三紀の噴出岩	12,440	3.4
		酸性貫入岩 (花崗岩類)	43,890	11.8
	新第三 ~ 第四紀火成岩	86,250	23.3	
堆積岩	基盤岩類	古生代の堆積岩	44,450	12.0
		中生代の堆積岩	16,439	4.5
	被覆岩類	第三紀の堆積岩	82,390	22.3
		第四紀の堆積岩	60,880	16.5
合 計		369,610	100.0	

(注) 東京天文台, 理科年表: (1985) より作成

## 2. 人工バリアシステムに影響を与える地層の諸条件

人工バリアシステムのバリア性能に影響を与えると考えられる地層の諸条件について、諸外国の性能評価研究を参考に整理した。

諸外国における性能評価（安全研究を含む）研究に関する代表的な文献を対象に、研究の目的、核種漏洩の主要な要因に焦点をあてて調査し、その結果から人工バリアシステムのバリア性能に影響を与えると考えられる地層の諸条件について検討した。その結果を以下に示す。

### 長期的地層の安定性

地層の侵食

断層活動

火山活動

隕石の衝突

隆起・沈降

気象現象による地層の破壊

### 地下空洞の安定性

岩石の圧縮強度

岩石の引張強度

### 地層の化学的特性

化学的組成

収着性

### 地層の熱的安定性

熱伝導率

### 地層の放射線による影響

### 地下水の物理的・化学的特性

地下水の流速

地下水のpH, Eh

### 3. 地層が人工バリアシステムの設計に与える影響の検討

本章においては、1. で選定した我国の地層を対象とし、2. で検討した地層の諸条件のデータを既存の文献を用いて調査するとともに、前年度実施した「人工バリアシステムの設計研究〔I〕」の成果を踏まえ、地層の持つ諸条件の違いが人工バリアシステムの性能に影響を与えるかどうか検討した。

#### 3. 1 地層の長期安定性

地層の長期安定性に関する要因として、

- ① 地層の侵食
- ② 断層活動
- ③ 火山活動
- ④ 隕石の衝突
- ⑤ 隆起・沈降
- ⑥ 気象現象による地層の破壊

があげられた。これらの要因は、サイト選定の段階で充分検討されるべきものであり、また、隕石の衝突をも考慮したとしても、地層の持つ諸条件は人工バリアシステムの設計にはほとんど影響を与えないものと思われる。

#### 3. 2 地下空洞の安定性

地下空洞の安定性と関係する要因として、岩盤の圧縮強度、引張強度があげられた。これらの要因をもとに、処分孔の長期的安定性について検討した。

調査対象地層として選定された地層の地下空洞の安定性の指標となるのトンネル掘削岩盤指数Q値の算定した結果を表3-1に示す。

トンネル掘削岩盤指数Q値の算定結果をみると、堆積岩の値が低く、広域変成岩、火成岩の順に高くなっている。調査の対象とした地層のQ値は1以上であるので、処分孔を掘削しても安定であるということができるが、堆積岩はQ値の値が相対的に低いので、堆積岩を対象として地層処分予定地の選定作業を進める場合、地下空洞の安定性に関する検討が必要と思われる。

表 3-1 地下空洞の安定性の算定結果

岩種	岩石の特性	岩盤 RQD の良好度 %	節理群の数 Jn	節理面の粗係数 Jr		節理変質係 Ja		節理低減の係数に よ Jw	応力低減係数			ト盤ン指数ル掘削値岩	
									$\sigma_c$ — $\sigma_1$	$\sigma_t$ — $\sigma_1$	SRF		
広域変成岩		60	6	A	4	E	4.0	B	0.66	9.2	0.34	2	3.3
堆積岩	頁岩	50	3	B	3	C	2.0	B	0.66	4.9	0.35	6	2.7
	泥岩	30	2	C	2	B	1.0	A	1.0	3.9	0.20	10	3.0
	凝灰岩	70	2	H	1	C	2.0	A	1.0	4.3	0.34	6	3.1
火成岩	花崗岩	50	3	E	1.5	B	1.0	B	0.66	14.3	0.66	2	12.5
	流紋岩	30	6	B	3	B	1.0	B	0.66	21.5	1.08	1	9.9
	輝緑岩	50	6	A	4	E	4.0	B	0.66	12.6	1.10	1	5.5

### 3. 3 地層の化学的特性

地層の化学的特性として、岩石の化学的組成と収着性について検討した。

調査対象地層に含まれる鉱物と化学組成を表 3-2 に示す。岩石の化学的組成は、詳細に判明している。地下水の性質に影響するという点で地層の化学的特性は、人工バリアシステム的设计に関係すると思われる。

我が国においては、放射性核種の地層の収着性に関する公表された研究成果はほとんど無い。「人工バリアシステム的设计研究〔I〕」では、“人工バリアシステム的设计にあたり、現在までの研究成果から地層の収着性を地層条件のパラメータとして表現することは、困難もしくは妥当性を欠くものと考えられる”として、地層の収着性を考慮して人工バリアシステム的设计を行っていない。地層の収着性は地層処分サイト特有のパラメータであり、地層処分サイト予定地が選定され、サイトでの地層の収着性が明らかにされた時点で、人工バリアシステムを変更せねばならないかどうかを検討すべきものと思われる。

表 3 - 2 調査対象地層に含まれる鉱物と化学組成

岩石名		変成岩	泥岩	頁岩	凝灰岩	花崗岩	流紋岩	輝緑岩
含まれる 鉱物	主要構成 鉱物	角閃石	石英 斜長石	石英 斜長石	石英 斜長石	石英 斜長石 黒雲母 カリ長石 角閃石	石英 斜長石 カリ長石 黒雲母 角閃石	角閃石 石英
	その他の 鉱物	緑泥石 白雲母	緑泥石 黄鉄鉱 モンモリ ロナイト	緑泥石 菱鉄鉱 絹雲母	モンモリ ロナイト 沸石	緑泥石		ぶどう石 緑泥石
SiO <sub>2</sub>	44.23	68.18	75.12	52.31	86.80	73.66	49.48	
TiO <sub>2</sub>	1.73	0.53	0.50	1.03	0.08	0.22	0.75	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.70	12.43	11.13	17.96	6.47	13.45	15.76	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.30	2.67	1.01	6.10	0.34	1.25	1.48	
FeO	7.12	0.32	3.04	4.02	0.93	0.75	6.96	
MnO	0.09	0.02	0.09	0.03	0.05	0.03	0.16	
MgO	10.20	1.27	1.42	3.45	0.24	0.32	8.49	
CaO	9.92	0.98	0.39	6.66	0.12	1.13	10.16	
Na <sub>2</sub> O	1.70	0.82	1.28	3.34	1.16	2.99	1.94	
K <sub>2</sub> O	0.20	0.06	2.51	0.75	2.47	5.35	0.55	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.02	0.06	0.03	0.14	0.07	0.06	
S	0.01	0.55	0.14	14ppm	—	—	—	
+ H <sub>2</sub> O	0.08	5.17	1.84	2.48	0.43	0.75	3.87	
- H <sub>2</sub> O	1.70	3.13	0.14	1.57	0.22		0.41	

(注) 流紋岩は、理科年表：丸善(株)，(1986)より作成した。  
 変成岩は角閃変岩を対象とした。  
 各岩石の化学組成は重量%である。

### 3. 4 地層の熱的安定性

「人工バリアシステムの設計研究（I）」において、花崗岩を処分施設の岩盤と仮定して、ガラス固化体の発熱量の経年変化を基に人工バリアシステム近辺の温度変化を評価した。評価の結果は、ガラス固化体の中心部の真横の処分孔壁面で、埋設の15年後、約60℃と算定された。

この結果を地層が異なった場合について考えてみると、調査の対象とした地層の比重や比熱の値と解析に用いた値に大きな差異が無いので、地層が異なっても解析結果に大きな変化は無いものと判断されるが、泥岩や凝灰岩の熱伝導率の値と解析に用いた値が異なるので、今後、これらの地層を地層処分の対象とする場合は、現地で採取された値を用いて熱解析を行い安全性を確認する必要があるものと考えられる。しかし、示差熱分析結果に示された通り、140℃付近において粘土鉱物の付着水ないし吸着水の脱水が生じるが、岩盤に影響を与えると考えられる温度は炭質物の燃焼の始まる約348℃であるので、熱に対する岩盤の安全裕度は高いものと思われる。

なお、KBS レポートにおいて、ベントナイト+石英砂の熱伝導率を測定した際に温度が90℃～250℃に及んだが、数ヶ月の期間ではベントナイトに変質は認められなかった、という報告がある。

### 3. 5 放射線による影響

「人工バリアシステムの設計研究（I）」において、ガラス固化体に含まれる放射線は十分に遮蔽されるように設計した。従って、本研究の対象外とした。

### 3. 6 地下水の物理的・化学的特性

「人工バリアシステムの設計研究（I）」において、地層条件の地下水の物理的・化学的特性として地下水のpH、Eh および動水勾配をパラメータとして性能評価研究を進めた。

地下水の流速は、保守側の値として、 $10^{-3}\text{m/y}$  として用いた。調査対象地層の透水係数のデータを収集し、導水勾配を想定して地下水の流速を算定した。

地下水のpH、Eh は飽和溶解度の値の設定に際して利用し、KBS レポートの花崗岩中のpHとEhの関係が、

$$\text{Eh} = 0.24 - 0.06\text{pH} + 0.06$$

という報告に基づき当式を使用した。しかし、我が国における各地層のpHとEhの関係につ

いてのデータは皆無であり、サイト固有の値と考えられるので、本研究においては、調査対象地層における地下水のデータを収集をするに留めた。

### 3. 6. 1 地下水の流速

地下水の流速は、ダルシー流を仮定すれば、透水係数：Kと導水勾配：dh/dxにより下記のように表される。

$$V = K \cdot dh/dx$$

地下処分施設周辺の動水勾配を充分保守側の値として1/10と仮定し、また、透水係数も大きい方の値を用い、調査対象地層の地下の流速を算定した結果を表3-3に示す。

当表をみると、「人工バリアシステムの設計研究〔I〕」で、地下水の流速を保守側の値として $10^{-3} \text{ m/y}$ を用いたが、調査対象地層の地下の流速は保守側の値よりさらに小さく、地下水の流速をパラメータとして「人工バリアシステムの設計研究〔I〕」の設計の結果を変更する必要はないと判断される。

表3-3 調査対象地層における地下水流速の予測

地層名	V (m/y)	K (cm/s)	dh/dx (m)
広域変成岩体	$3.2 \times 10^{-4}$	$10^{-8} \sim 10^{-12}$	1/10
頁岩	$3.2 \times 10^{-5}$	$10^{-9} \sim 10^{-10}$	"
泥岩	$3.2 \times 10^{-4}$	$10^{-8} \sim 10^{-9}$	"
凝灰岩	$3.2 \times 10^{-5}$	$10^{-9} \sim 10^{-12}$	"
花崗岩	$3.2 \times 10^{-6}$	$10^{-10} \sim 5 \times 10^{-12}$	"
流紋岩	$3.2 \times 10^{-4}$	$10^{-8} \sim 10^{-11}$	"
輝緑岩	$3.2 \times 10^{-5}$	$10^{-9} \sim 10^{-12}$	"

(注) 林正夫, 他, 地盤工学における有限要素解析: 培風館, (1978) を参考にして作成

### 3. 6. 2 調査対象地層中における地下水の水質

各岩種に対するpH, 電導度, および水質の型等の一般的な特徴を表3-4に示す。今回の文献調査で得られた比較的塩類濃度の低い地下水について, 岩質毎の水質の特徴は

花崗岩, 流紋岩	—————	アルカリ炭酸塩型
玄武岩	—————	アルカリ土類炭酸塩型
シルト岩(泥岩)	—————	多様
片岩, 片麻岩	—————	アルカリ土類炭酸塩～アルカリ炭酸塩型

と表現することができる。今回の文献調査で得られた結果と一般的な特徴を比較すると、玄武岩を除いて整合している。この相違については、採水地点が海底トンネルであること、周囲の泥岩や凝灰岩と類似した水質を示すこと、そして玄武岩自身が堆積岩中の貫入岩脈であることから、得られた水質は玄武岩の岩質そのものを反映していない可能性がある。また凝灰岩については比較はできなかったが、今回の文献調査での採水地点も玄武岩と同様海底トンネル内であり、多数の海水起源の異常出水に遭遇しており、凝灰岩の岩質そのものを反映していない可能性がある。国内の凝灰岩の多くは珪長質であることから、凝灰岩中の水質は花崗岩や流紋岩に近いと考えられる。

以上のことから、今回対象とした地層を構成する各岩石種と水質の関係は、表3-5のようにまとめられた。



表 3 - 4 各岩種における水質的特徴

	pH	電導度 (μmho/cm)	水質の型
花崗岩	7.6~8.0	140~167	アルカリ炭酸塩~アルカリ土類炭酸塩
流紋岩	6.2~7.4	—	アルカリ土類炭酸塩~アルカリ炭酸塩
玄武岩類	7.2~10.2	—	アルカリ非炭酸塩
頁岩	6.8~8.9	—	アルカリ非炭酸塩, アルカリ炭酸塩 (温泉)
泥岩	5.5~9.7	63~4960	アルカリ炭酸塩, アルカリ非炭酸塩
凝灰岩	5.9~10.5	—	アルカリ非炭酸塩
片麻岩	7.6~9.5	120~182	アルカリ炭酸塩
緑色片岩	5.8~6.0	308.5~673.5	—

表 3 - 5 対象岩種中の地下水の水質総括表

地層を構成する岩石種		pH	水質の型
堆積岩	頁岩, 泥岩	5.5~9.7	アルカリ非炭酸塩~アルカリ炭酸塩型
	凝灰岩	5.9~10.5	アルカリ炭酸塩~アルカリ土類炭酸塩型
火成岩	花崗岩	7.6~8.0	アルカリ炭酸塩~アルカリ土類炭酸塩型
	流紋岩	6.2~7.4	アルカリ土類炭酸塩~アルカリ炭酸塩型
	輝緑岩 (玄武岩)	6.7~8.5	アルカリ土類炭酸塩型
変成岩	広域変成岩 (片麻岩 結晶片岩等)	5.8~9.5	アルカリ土類炭酸塩~アルカリ炭酸塩型

### 3. 7 まとめ

地層が人工バリアシステムの設計に与える影響の検討として、

地層の長期安定性

地下空洞の安定性

地層の物理的・化学的性質

地層の放射線による影響

地下水の物理的・化学的性質

について検討した。

地層の長期安定性：地層の長期安定性に関係する要因として、地層の侵食、断層活動、火山活動、隕石の衝突、隆起・沈降、気象による地層の破壊について検討した。地層の侵食、断層活動、火山活動、隆起・沈降、気象による地層の破壊などの要因は、サイト選定の段階で充分検討されるべきものであり、また、隕石の衝突を考慮したとしても、地層の持つ諸条件は人工バリアシステムの設計にほとんど影響を与えないものと思われる。

地下空洞の安定性：調査の対象とした地層の安定性について検討したが、極めて定性的ではあるが、地下500mの処分施設に処分孔を掘削しても、安定であることが判明した。

地層の物理的・化学的特性：地層の物理的・化学的特性として、岩石の化学的組成や収着性について検討した。岩石の化学的組成は、詳細に判明しているが、人工バリアシステムの設計に直接関係するものではない。むしろ地下水の性質に係っていると考えられる。収着性については、これまでほとんどデータが採取されておらず、人工バリアシステムの設計に影響するのかどうか不明であった。

地層の熱的安定性：人工バリアシステム近辺の岩盤の温度上昇では、地層は極めて安定であることが判明した。

地層の放射線による影響：「人工バリアシステムの設計研究〔I〕」では、ガラス固化体の放射線は遮蔽されるように設計したので、本研究からは除外した。

地下水の物理的・化学的特性：地下水の物理的・化学的特性に関係する要因として、調査対象地層の地下水の流速、地下水の水質を検討した。地下水の流速を予測したところ、 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{m/y}$ であり、「人工バリアシステムの設計研究〔Ⅰ〕」で用いた値 $10^{-3} \text{m/y}$ より低く安全側であった。

以上に地層が人工バリアシステムの設計に与える影響の検討結果を示したが、現時点では地層や地下水の基礎的データが不足しており、地層の種類により「人工バリアシステムの設計研究〔Ⅰ〕」で設計した人工バリアシステムを積極的に変更するべきであるという結果は得られなかった。

#### 4. 地層条件に応じた性能評価手法の検討

60年度に行った性能評価では、次のような前提条件のもとで、試算を実施した。

(1) 廃棄体に接触する地下水の化学的条件として、一般に想定される地下水のpH, Eh 範囲内で最も好ましくない場合を設定した。

(2) オーバーパックの健全性は、目標性能として最小限の要請である1000年で喪失するとした。

これら保守的前提の基での試算から導かれた人工バリアシステムは、地下環境に関する現状知識の範囲内においては、ジェネリックな性格のものであり、前節までの検討において示されたように地層条件によりその安全性が脅かされることはないと考えられる。したがって、地層条件の人工バリアシステム性能に対する影響の評価は、保守的かつジェネリックに設定された諸条件をより現実的なものに変えるという作業の一環として捉えることができる。

このような考え方により、(1)、(2)の前提を見直すと、次の点が指摘できる。

(1) 地下水の化学的条件として設定したのは、岩体中の未擾乱のものであり、人工バリアとの相互作用が起こった後での性質の変化は考慮されていない。

(2) 人工バリアの性能及び天然バリアの特性については、把握しきれない部分が存在すると考えられるが、このような不確実性は考慮されていない。

したがって、従来の性能評価に次のような改良を施すことが、地層条件に応じた性能評価に必要といえる。

(1) 地層処分サイトに固有の条件、特に、人工バリアの性能に大きな影響を与える地層処分場近傍の地下水の化学的条件を評価し、より現実的な人工バリア性能の評価を行う。この際、人工バリアの構成要素が周辺の地下水の化学的条件に与える影響や、人工バリア要素間の化学的相互作用を評価する。

(2) 人工バリアの性能やサイトに固有な条件に含まれる不確実性が、人工バリアシステム

の性能に与える影響の程度を評価する。

(1)については、近年開発が進められつつある地球化学コードが有力な手段と成りうる。地球化学コードを用いることにより、複雑な系の中の物質の存在状態を定量的に予測することが可能となる。岩体中の未擾乱の地下水が緩衝材、オーバーパック、ガラス固化体と反応し、化学組成が変化した後の核種の溶存状態、固相としての析出を評価することができる。

また、安全評価モデルに組み入れられている分配係数はそれ自身は単純な概念であり、モデルとしての取り扱い上の簡便性を有している一方、その現象には複数の化学的プロセスが含まれる場合があり、更に各プロセスに対する影響因子の関わり方も単純ではないことが多い。地球化学コードはこのような分配係数へ理論的裏付けを与えることができ、更に、一部のコードでは、環境条件の変動に伴う分配係数の変化を予測することも可能である。

ただし、一部核種については、計算の基礎となる核種の溶解度、錯体の安定度定数、標準エンタルピー変化などの信頼性が乏しいという問題点がある。特に、データの取得における取り扱いが困難なアクチニドにおいてこれが顕著である。現在OECD/NEAにおいて、これらの熱力学データのレビューおよびデータ・ベース化が行われている。

(2)については、決定論的方法、統計的方法それぞれにおいて、開発が進められている。開発は、地層処分に限らず、原子炉の事故解析など大規模システムの性能評価全般を対象とし、近年活発に行われている。原理的には、不確実性に対する感度、さらに性能評価結果の有意性をも示すことができる可能性があるが、現状では、それを示すに十分な程度にまでは手法として確立されていない。

以上述べてきた性能評価に関する研究開発の現状及び趨勢から、地層条件に応じた人工バリアシステムの性能評価においては、当面、手法としての完成度が高い地球化学コードを導入し、評価を現実化することが有効と考えられる。ただし、併せて、計算の基礎となる熱力学的データの信頼性を向上させる努力が必要と考えられる。

あとがき

昭和60年度に実施した「人工バリアシステムの設計研究〔I〕」において、海外の人工バリアシステムの性能目標を参考に設計基準を設定し、ガラス固化体、250mmの鋳鋼製のオーバーパック、30cmのNa-ベントナイトから成る人工バリアシステムを設計し、その性能を評価した。

本年度は、我が国の地層を対象に、

- ① 地層処分の対象地層の検討
- ② 人工バリアシステムに与える地層条件の検討
- ③ 地層が人工バリアシステムの設計に与える影響の検討
- ④ 性能評価手法の検討

を行った。

地層が人工バリアシステムの設計に与える影響の要因として、

地層の長期安定性

地下空洞の安定性

地層の物理的・化学的性質

地層の放射線による影響

地下水の物理的・化学的性質

をあげ、我が国で地層処分の研究対象と成ると思われる種々の地層について検討したが、地層や地下水の基礎的データが不足しており、地層の種類により「人工バリアシステムの設計研究〔I〕」で設計した人工バリアシステムを積極的に変更するべきであるという結果は得られなかった。

地層や地下水の基礎的データは、サイト特有のものであり、データの取得にはかなりの労力と時間が必要であろう。

地層条件に応じた人工バリアシステムの性能評価研究を進めるためには、地層や地下水の基礎的データの取得に努めるとともに、完成度が高い地球化学コードを導入し、性能評価研究をより現実化することが望まれる。