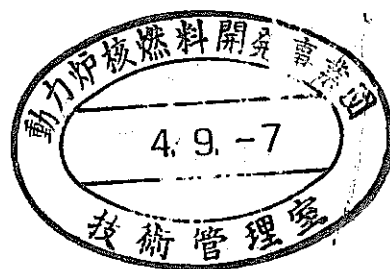


# TRU廃棄物処分システムにおける 固有の現象の摘出および評価手法の検討

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)



1992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。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。

〒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

# 要 旨

## TRU廃棄物処分システムにおける固有の現象の抽出および評価手法の検討

藤田 義夫\*  
山本 幹彦\*  
村上 文啓\*  
寺村 政浩\*

### 要 旨

今後の民間再処理施設等の運開に伴ない、長寿命 $\alpha$ 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、原子力委員会の場においても処分方策の早急な確立を求めた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わ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。

本研究では上記の考え方にに基づき、TRU廃棄物の処分システムに対する全体性能評価手法の構築を目的として実施するものである。このうち平成3年度は以下の項目について調査検討を実施した。

- (1) TRU廃棄物処分システムにおける固有の現象の抽出
- (2) TRU廃棄物処分システムにおける固有の現象の評価手法の調査、検討
- (3) 研究計画に関する検討

本調査検討を通じ、TRU廃棄物の特性を考慮し、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の成果も取込みつつ、TRU廃棄物の処分による公衆の被曝に影響する固有の現象を抽出すると共に、それらを記述する個別モデルの現状を明らかにした。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：030D0244

事業団担当部課室および担当者：東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室

(佐々木 憲明)

\* 原子力・電力事業本部 調査開発部

February, 1992

Identification of Important Phenomena for Performance Assessment of  
Transuranic Waste Isolation System and Investigation of Model Development

Yoshio Fujita\*  
Mikihiko Yamamoto\*  
Tomohiro Murakami\*  
Masahiro Teramura\*

A b s t r a c t

With the progress of nuclear fuel cycle development, it is expected to accumulate large quantity of transuranic wastes ( and long lived  $\beta/\gamma$  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 1992 three subjects listed below were investigated.

- (1) Identification of important phenomena for performance assessment of transuranic waste isolation.
- (2) Investigation of model development of principal phenomena.
- (3) R&D plan for transuranic waste isolation technology.

Based on these investigations, Principal phenomena which influence release and migration of radionuclides from transuranic waste to biosphere were identified and the state of the art on model development was defined. Also the important item that need to research and develop were selected and the framework of R&D plan was constructed.

---

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

PNC Liaison : Geological Isolation Technology Section (Noriaki Sasaki)

\* 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。

近年、低レベル放射性廃棄物の処理に対しては法整備、実施主体の設立が行われ、処分の実現に向けて大きな進展が見られた。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おり、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ている。

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理処分について」をとりまとめ、TRU廃棄物の区分目安値（全 $\alpha$ 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 $\alpha$ 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 $\alpha$ 廃棄物またはILWの処分を実施しているフランス、スイス等の国も多く、我が国においても早急に区分に応じた適切な処分方法を確立する必要性が大きい。

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、処分対象廃棄物特性と処分概念を設定することにより、ニアフィールドにおける性能評価上重要な現象の抽出整理を行った。又、これらの現象に対する評価手法のうち、特に研究の進展している分野について調査、検討を行い、総合安全評価手法確立のための研究開発計画に反映した。

# 目 次

## 目 次

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 1. T R U廃棄物処分システムにおける固有の現象の抽出 .....              | 1   |
| 1.1 T R U廃棄物の特性と処分概念の設定 .....                    | 1   |
| 1.1.1 T R U廃棄物の特性 .....                          | 1   |
| 1.1.2 T R U廃棄物の処分概念 .....                        | 21  |
| 1.2 核種移行に係わる現象の抽出 .....                          | 32  |
| 1.2.1 最近の研究例における評価対象シナリオの調査 .....                | 32  |
| 1.2.2 現象の抽出 .....                                | 50  |
| <br>2. T R U廃棄物処分システムにおける固有の現象の評価手法の調査, 検討 ..... | 67  |
| 2.1 評価すべき現象の抽出 .....                             | 67  |
| 2.1.1 性能評価試算 .....                               | 67  |
| 2.1.2 現象の抽出 .....                                | 89  |
| 2.2 諸現象のモデル化に関する調査 .....                         | 98  |
| 2.2.1 ガスの発生及び蓄積・移行 .....                         | 98  |
| 2.2.2 廃棄体からの放射性核種の浸出 .....                       | 126 |
| 2.2.3 微生物活動による現象 .....                           | 142 |
| 2.2.4 有機物の影響 .....                               | 169 |
| <br>3. 研究計画に関する検討 .....                          | 179 |
| 3.1 研究開発課題の整理 .....                              | 179 |
| 3.1.1 高レベル放射性廃棄物処分に対する開発課題体系 .....               | 179 |
| 3.1.2 T R U廃棄物処分に対する研究開発課題の整理 .....              | 189 |
| 3.2 研究開発内容の検討 .....                              | 205 |
| <br>参 考 文 献 .....                                | 231 |
| 添 付 資 料 .....                                    | 243 |

## 図 リ ス ト

|           |                                                        |    |
|-----------|--------------------------------------------------------|----|
| 図 1. 1-1  | ベルギーにおける高中レベル廃棄物処分概念                                   | 30 |
| 図 1. 1-2  | スイスにおける低中レベル廃棄物処分概念                                    | 30 |
| 図 1. 1-3  | スウェーデンにおける低中レベル廃棄物処分概念                                 | 30 |
| 図 1. 1-4  | ドイツにおける低中レベル廃棄物処分概念                                    | 31 |
| 図 1. 1-5  | イギリスにおける将来低中レベル廃棄物処分概念                                 | 31 |
| 図 1. 2-1  | 処分場において考慮すべきプロセスとその相互関係                                | 44 |
| 図 1. 2-2  | 水文学的プロセスとそのパラメータ                                       | 44 |
| 図 1. 2-3  | 熱的プロセスとそのパラメータ                                         | 45 |
| 図 1. 2-4  | 機械的プロセスとそのパラメータ                                        | 46 |
| 図 1. 2-5  | 化学的プロセスとそのパラメータ                                        | 47 |
| 図 1. 2-6  | 移行プロセスとそのパラメータ                                         | 48 |
| 図 1. 2-7  | 容器寿命, 人工バリアからの放出率, 核種閉込め,<br>個人の防護, 地下水の防護に関係する現象とプロセス | 49 |
| 図 1. 2-8  | シナリオ解析手順 (OECD/NEA)                                    | 53 |
| 図 1. 2-9  | 性能評価上考慮すべき事象の相関図作成例                                    | 54 |
| 図 1. 2-10 | TRU廃棄物処分に係るニアフィールド内現象の相互関係                             | 65 |
| 図 2. 1-1  | 粘土鉱物への吸着に対するヨウ素の pH 依存性                                | 70 |
| 図 2. 1-2  | バーミキュライトに対する $K_d$ と pH                                | 70 |
| 図 2. 1-3  | アクチノイドの岩石・鉱物に対する分配係数                                   | 70 |
| 図 2. 1-4  | 二相流におけるガスと水の相対透過係数                                     | 75 |
| 図 2. 1-5  | Brooks & Corey と Sandia の含水率と<br>水/ガスの相対透過係数の関係        | 75 |
| 図 2. 1-6  | 地下水流速を 10 倍にした場合の被曝線量経年変化<br>(MA 固化体, 4N+1 系列)         | 78 |
| 図 2. 1-7  | 有機物存在下の溶解度を考慮した人工バリア出口<br>フラックス経年変化 (MA 固化体)           | 80 |

|           |                                                                |     |
|-----------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 図 2. 1-8  | K d を 100 倍, 1000 倍にした場合の被曝線量経年変化<br>(ハル・エンドピース) .....         | 82  |
| 図 2. 1-9  | p H 及び E h を考慮した K d 変化による人工バリア出口<br>フラックス経年変化 (M A 固化体) ..... | 84  |
| 図 2. 1-10 | 有機物を考慮した K d 変化による人工バリア出口<br>フラックス経年変化 (M A 固化体) .....         | 85  |
| 図 2-2-1   | 諸外国のガス発生量 .....                                                | 101 |
| 図 2-2-2   | 均一球状粒子の最密充填構造 .....                                            | 111 |
| 図 2-2-3   | 金属の腐食と p H の影響 .....                                           | 113 |
| 図 2. 2-4  | H L W パッケージ処分孔周辺解析モデル .....                                    | 117 |
| 図 2. 2-5  | Sandia function による毛管圧力:<br>P <sub>SVS</sub> と水の相対透過係数 .....   | 118 |
| 図 2. 2-6  | Corey 法による相対透過係数 .....                                         | 119 |
| 図 2. 2-7  | フィンランドの I L W サイロのガスロック .....                                  | 120 |
| 図 2. 2-8  | 3 平面拡散モデルの拡散による核種放出量の比較 .....                                  | 131 |
| 図 2. 2-9  | ペレット/ドラム断面 .....                                               | 133 |
| 図 2-2-10  | 固化材/ペレット部分の N a <sub>2</sub> S O <sub>4</sub> と C o の浸出率 ..... | 136 |
| 図 2-2-11  | C s の固化材/ペレット部分の浸出率 .....                                      | 136 |
| 図 2-2-12  | S r の固化材/ペレット部分の浸出率 .....                                      | 136 |
| 図 2. 2-13 | C s を対象とした P I C バリアの浸出率 .....                                 | 136 |
| 図 2. 2-14 | 不均質廃棄体タイプ 1 .....                                              | 137 |
| 図 2. 2-15 | 不均質廃棄体タイプ 2 .....                                              | 138 |
| 図 2. 2-16 | 不均質廃棄体タイプ 3 .....                                              | 138 |
| 図 2. 2-17 | NAGRA における微生物影響評価対象 .....                                      | 144 |
| 図 2. 2-18 | 微生物によって生じ得る現象と影響 .....                                         | 145 |
| 図 2. 2-19 | 微生物分解による成分組成の変化 .....                                          | 151 |
| 図 2. 2-20 | アスファルト成分の劣化特性 .....                                            | 151 |
| 図 2. 2-21 | アスファルトの種類による劣化特性 .....                                         | 152 |

|           |                                             |     |
|-----------|---------------------------------------------|-----|
| 図 2. 2-22 | アスファルト成分の分類 .....                           | 152 |
| 図 2. 2-23 | アスファルテンの化学構造例 .....                         | 153 |
| 図 2. 2-24 | NAGRA で考慮される微生物活動モデル概念<br>(低／中レベル廃棄物) ..... | 155 |
| 図 2. 2-25 | Groganらによる微生物活動モデル .....                    | 157 |
| 図 2. 2-26 | 評価対象処分場概念 .....                             | 158 |
| 図 2. 2-27 | Arter らによる微生物活動モデル .....                    | 164 |
| 図 2. 2-28 | Arter による微生物活動評価 .....                      | 165 |
| 図 2. 2-29 | NIREX の微生物活動モデル概念 .....                     | 166 |
| 図 2. 2-30 | NIREX による微生物活動予測例 .....                     | 167 |
| 図 2. 2-31 | N a C l 飽和セメント浸出液中での溶解度 .....               | 177 |

## 表 リ ス ト

|          |                                  |       |    |
|----------|----------------------------------|-------|----|
| 表 1. 1-1 | 動燃事業団において発生する T R U 核種を含む廃棄物特性-1 | ...   | 5  |
| 表 1. 1-2 | 動燃事業団において発生する T R U 核種を含む廃棄物特性-2 | ...   | 6  |
| 表 1. 1-3 | 海外委託再処理において発生する廃棄物特性-1           | ..... | 12 |
| 表 1. 1-4 | 海外委託再処理において発生する廃棄物特性-2           | ..... | 13 |
| 表 1. 1-5 | 今後採用の可能性のあるその他の処理技術と廃棄体特性        | ..... | 14 |
| 表 1. 1-6 | 処分対象廃棄体                          | ..... | 18 |
| 表 1. 1-7 | 主要処分対象物質                         | ..... | 20 |
| 表 1. 1-8 | 各国の T R U 廃棄物処分に係る現状             | ..... | 23 |
| 表 1. 1-9 | 海外における T R U 廃棄物処分概念             | ..... | 29 |
| 表 1. 2-1 | W I P P に対する安全性評価シナリオ            | ..... | 33 |
| 表 1. 2-2 | 安全評価において考慮すべき現象                  | ..... | 39 |
| 表 1. 2-3 | 固有現象と相互関係 (1 次プロセス)              | ..... | 55 |
|          | (2 次プロセス)                        | ..... | 58 |
|          | (3 次プロセス, 性能に対する影響)              | ..... | 62 |
| 表 2. 1-1 | 平成 2 年度までに用いたパラメータ値と環境条件         | ..... | 69 |
| 表 2. 1-2 | p H = 1 2, E h = -410mV での K a   | ..... | 71 |
| 表 2. 1-3 | 有機物 (セルロース) 存在下の溶解度と K d         | ..... | 71 |
| 表 2. 1-4 | 人工バリアの K d の設定値                  | ..... | 72 |
| 表 2. 1-5 | p H = 1 2, E h = -410mV での溶解度    | ..... | 73 |
| 表 2. 1-6 | 核種の溶解度設定値                        | ..... | 72 |
| 表 2. 1-7 | 環境条件によるパラメータ値の変化                 |       |    |
|          | (M A 固化体, I -129 はハル・エンドピース)     | ..... | 76 |
| 表 2. 1-8 | 人工/天然バリア出口での最大フラックス及び年数          |       |    |
|          | (M A, 4 N + 1, 地下水流速 1 0 倍)      | ..... | 77 |
| 表 2. 1-9 | 人工バリア出口での最大フラックス及び年数             |       |    |
|          | (M A, 4 N + 1, 有機物存在下の溶解度)       | ..... | 79 |

|           |                                                                   |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 表 2. 1-10 | 人工／天然バリア出口の最大フラックス及び年数<br>(I-129, ハル・エンドピース, $K_d = 100, 1000$ 倍) | 81  |
| 表 2. 1-11 | 人工バリア出口での最大フラックス及び年数<br>(MA, $4N+1$ , pH/Ehを考慮した $K_d$ )          | 83  |
| 表 2. 1-12 | 環境条件によるフラックピーク値の変化<br>(MA固化体, I-129 はハル・エンドピース)                   | 88  |
| 表 2. 1-13 | HLWとの比較の上でのTRU廃棄物の特徴                                              | 91  |
| 表 2. 1-14 | 主な性能評価関係研究開発課題                                                    | 92  |
| 表 2. 2-1  | 各国のガス発生メカニズム                                                      | 100 |
| 表 2. 2-2  | STPTにおけるガス発生対象物の量                                                 | 103 |
| 表 2. 2-3  | 躯体内部ガス圧経年変化に及ぼす透過係数(K)の影響                                         | 107 |
| 表 2. 2-4  | 気体の溶存量                                                            | 108 |
| 表 2. 2-5  | ガス圧, 毛管圧力, コンクリート引張強度                                             | 120 |
| 表 2. 2-6  | ガス移行対策                                                            | 121 |
| 表 2. 2-7  | OECD/NEAワークショップ発表論文の概要                                            | 123 |
| 表 2. 2-8  | OECD/NEAワークショップ発表論文の概要                                            | 124 |
| 表 2. 2-9  | OECD/NEAワークショップ発表論文の概要                                            | 125 |
| 表 2. 2-10 | パラメータリスト                                                          | 134 |
| 表 2. 2-11 | TRU/ILWに適用されている浸出モデル                                              | 140 |
| 表 2. 2-12 | バリアの破損と核種移行に対する微生物の影響                                             | 143 |
| 表 2. 2-13 | 嫌気性雰囲気下における電子受容体の影響                                               | 149 |
| 表 2. 2-14 | 微生物分解による元素組成の変化                                                   | 151 |
| 表 2. 2-15 | 栄養素供給量の評価結果                                                       | 159 |
| 表 2. 2-16 | 考慮した酸化還元反応の自由エネルギー変化(例)                                           | 160 |
| 表 2. 2-17 | エネルギー供給源/供給量                                                      | 161 |
| 表 2. 2-18 | 反応物質と供給エネルギー量, 対応する微生物量                                           | 161 |
| 表 2. 2-19 | 無機錯体との影響の比較                                                       | 162 |
| 表 2. 2-20 | スウェーデンにおける地下水中の有機物                                                | 170 |

|           |                                                    |     |
|-----------|----------------------------------------------------|-----|
| 表 2. 2-21 | 浅地中処分場からの浸出液中有機物 .....                             | 171 |
| 表 2. 2-22 | 浸出液の微生物分解による効果 .....                               | 171 |
| 表 2. 2-23 | 化学的劣化生成物による溶解度への影響 .....                           | 172 |
| 表 2. 2-24 | 微生物分解生成物による P u 溶解度への影響 .....                      | 174 |
| 表 2. 2-25 | 化学的劣化生成物による収着性の変化 .....                            | 175 |
| 表 3. 1-1  | 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発体系 .....                         | 181 |
| 表 3. 2-1  | T R U 廃棄物の地層処分に関する研究開発課題<br>(ソースターム／ニアフィールド) ..... | 222 |
| 表 3. 2-2  | T R U 廃棄物処分研究開発課題 .....                            | 225 |

# 1. T R U 廃棄物処分システムにおける 固有の現象の抽出

## 1. T R U廃棄物処分システムにおける固有の現象の抽出

T R U廃棄物は長半減期の $\alpha$ 核種を有意に含む他、種々の物質によって構成され、その放射能濃度も廃棄物の種類により広い範囲に分布する等の特徴を有している。そこで、これらの特徴に対応した処分概念、及び評価モデルの適用が必要となる。

そのため、本章ではこれまでの研究例から廃棄物特性及びその特性に応じた処分概念を検討、設定し、内外の安全評価例等を参考にしながら、処分されたT R U廃棄物から放射性核種が生活圏に到達するまでの経路において生じ得る現象を抽出、整理する。

### 1.1 T R U廃棄物の特性と処分概念の設定

検討対象とする廃棄物としては、再処理施設、及びM O X燃料加工施設等から発生する放射性廃棄物のうち、原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会がT R U核種を含む放射性廃棄物のうち区分目安値と設定した全 $\alpha$ 核種濃度、約1 GBq/t<sup>1)</sup>を超えるものが主体となるが、これらの所謂T R U廃棄物の他、C-14、I-129等の長半減期 $\beta$   $\gamma$ 核種を有意に含み、長期の隔離の必要があると考えられる再処理廃棄物についても検討対象に加えることとする。

これらの廃棄物を対象として現在既知のデータより各種特徴・特性を整理した上、安全評価上考慮すべき現象の抽出に資する。又、諸外国におけるT R U廃棄物、あるいはそれに相当する放射性廃棄物の処分概念の検討例を参考として、次節で性能評価対象とすべき現象の抽出を行う上で前提となる代表的な処分概念を大概設定する。

#### 1.1.1 T R U廃棄物の特性

ここでは再処理施設、M O X燃料加工施設から発生する放射性廃棄物について、その種類、処理方法、固化媒体材質、容器材質等について、東海再処理工場、P W T F、海外委託再処理返還廃棄物で適用されている技術の他、現在研究開発が行われている技術を対象として調査を行う。この調査結果より、処分場に埋設され得る廃棄物の主要な構成物質を把握することができると考えられる。

なお、全放射性廃棄物について核種インベントリ、将来採用される処理技術が必ずしも明確でないことから、調査対象廃棄物は前述のT R U廃棄物の下限値を超えるものばかりでなく、ここではより広く上記2施設から発生する全放射性廃棄物について調査を行うこととした。

(1) 動燃事業団において発生する廃棄物

動燃事業団の東海再処理施設、M O X燃料加工施設から発生する放射性廃棄物について、その主要構成物質、放射能濃度、処理技術、固化媒体、及び廃棄物が充填されている容器等の内容を以下に示す。

(i) 構成物質と処理技術

動燃事業団の東海再処理工場、P W T Fにおいて採用されている処理技術について表 1.1-1に整理した。

表 1.1-1より明らかなように、再処理施設から発生している放射性廃棄物については、濃縮廃液系についてのみ減容・安定化処理が行われており、他はほぼ発生形態で貯蔵されているのが現状である。また、濃縮廃液系についても将来は異なる減容技術の採用が予定されている。

一方、M O X燃料加工施設より発生する放射性廃棄物については、金属以外の不燃性雑固体を除きほとんどの雑固体廃棄物がP W T Fにおいて減容処理を受けることになっている。特に可燃性雑固体の焼却灰、高融点金属廃棄物に対しては溶融による安定化処理が行われており、相対的により廃棄体に近い形態まで処理が進められているといえる。

廃棄物を構成する物質を把握しておくことは、処分後長期の安全性を評価する際に評価対象とすべき現象を摘出する上で重要な因子であるが、上記のような状況から現時点での知見は以下に示す範囲に止まる。

◦可燃性雑固体

； 現在焼却が行われており、貯蔵中のものについても今後焼却予定である。焼却灰の含有物質は Si , Al, Fe等の酸化物が主体になると考えられるが、さらに焼却灰の溶融固化も考慮されており、その場合も焼却灰と同様にセメント等の充填固化材との相互作用等の検討のため、溶融固化体の組成、物性の測定が必要である。

◦難燃性雑固体

； 将来は焼却、溶融固化を行う方向で検討が進められており、廃棄物は無機酸化物、塩の形態に処理され则认为られるが、可燃性雑固体と同様に溶融固化体の組成、物性の測定が必要である。

◦ 不燃性雑固体

； 金属廃棄物については熔融固化が検討されており，熔融固化体の組成，物性について処理時組成の制御あるいは処理後の測定による把握が必要である。

その他の不燃物については高圧縮処理が検討されているところから，コンクリート，ガラス等の主要構成物以外についても，コロイド形成・錯体形成物質等の微量影響物質の混入について確認すべきと考えられる。

◦ 濃縮廃液

； 現在製造されている廃棄体は硝酸塩等の塩類と有機物であるアスファルトによって構成されており，その組成，量に対する知見は多い。しかしながら，将来ペレット化による固化媒体の変更，あるいは核種除去，塩の分解除去とその再利用が実現すれば廃棄物特性は大きく異なると予測できる。

◦ 廃溶媒，廃希釈剤

； 現在これらの廃棄物はプラスチックマトリクスによりに固化されており，処分場への有機物の供給源となるが，廃棄物の組成は製造時に制御，把握されている。なお，今後酸化分解，核種除去処理が適用される場合には，二次廃棄物特性を明らかにする必要がある。

◦ 化学スラッジ，廃砂

； 化学スラッジ，廃砂，活性炭が同一貯槽中に貯蔵されており，発生時の組成は比較的明らかであるが，貯蔵中の化学変化等による組成の変化とそれらによる核種溶解度等への影響を確認する必要がある。

◦ ハル・エンドピース

； 将来的には圧縮による減容等が行われるが，混入しているゴム，プラスチック類等の物質を把握しておく必要がある。

◦ 廃ヨウ素吸着剤

； 銀交換ゼオライト以外の混入物について確認しておく必要がある。

◦ MOX加工可燃物

； 焼却灰の元素組成はSi，Al，Ca，Mg等が主成分であることが概に把握されているが，熔融固化体の組成，物性の測定が必要と考えられる。

◦ MOX加工難燃物

； 焼却灰の組成，及び熔融固化体の組成，物性の測定が必要と考えられる。

◦ MOX加工不燃物

； 金属鑄塊の組成，物性の把握，及びその他の不燃物の構成について情報が必要である。

(ii) 放射能及びその他の特性

現在，動燃事業団において再処理施設，及びMOX燃料加工施設から発生する放射性廃棄物については，全廃棄物について容器の表面線量率測定が行われているが，定常作業として放射能濃度及びその他の物理的特性に対する測定は実施されていない。僅かに再処理廃棄物のうち，極低レベル／低レベル濃縮廃液のアスファルト固化体，及び廃溶媒，廃希釈剤のプラスチック固化体についてCo-60，Cs-137の定量，及び廃棄物重量の測定が行われているが，定常的なものではない。また，MOX燃料加工施設からの廃棄物については可燃物の焼却灰を熔融固化した人工鉱物について，必要に応じてPu，U，Amの定量と廃棄物重量の測定が行われており，核種組成に対する基本的データが得られている。

このような現状から核種インベントリ等の特性値については実測データがほとんど存在しないが，これまでの測定値等より得られた放射能濃度の範囲は表 1.1-2に示すものとなる。

現時点では，核種インベントリについてハル・エンドピースについては，高レベル廃液の核種組成とIAEAにより設定された核種の移行率等より算定するか，ハルモニタによって計測されたCs-137，あるいはPr-144の濃度よりスケーリングファクタ法により各核種濃度を推定している。また，低レベル濃縮廃液についてもCo-60，Cs-137の実測値と使用済燃料の核種組成より，スケーリングファクタ法によりインベントリを推定している。

動燃事業団では現在，アスファルト固化体，人工鉱物について各種の物理的・化学的特性を測定する計画であるが，必要に応じ他の生廃棄物についても放射能濃度，核種組成についてデータを取得する他，開発中の各種処理技術を適用した場合の廃棄体特性についても適宜測定，評価を実施すべきであると考えられる。

表 1.1-1 動燃事業団において発生するTRU核種を含む廃棄物特性-1

(1/2)

| 発生元                             | 廃棄物種類                | 含有物質                                                                                         | 減容処理技術                                        | 安定化処理技術         | 固化媒体            | 容器/材質                            |
|---------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|
| 東<br>海<br>再<br>処<br>理<br>工<br>場 | 可燃性雑固体<br>(極低放射性)    | 紙、布等天然繊維<br>ポリエチレン<br>酢酸ビニル<br>(ゴム、アクリル)等                                                    | 焼却                                            | 未処理<br>[灰; 溶融]  | 未処理             | 200 ℓドラム缶<br>/炭素鋼                |
|                                 | 難燃性雑固体<br>(極低放射性)    | 塩化ビニル<br>ネオプレンゴム<br>等                                                                        | 未処理<br>[焼却]                                   | 未処理<br>[灰; 溶融]  | 未処理             | 200 ℓドラム缶<br>/炭素鋼                |
|                                 | 不燃性雑固体<br>(極低放射性)    | 金属、ガラス<br>コンクリート、フィルタ<br>断熱材等                                                                | 未処理<br>[高圧縮]                                  | 未処理             | 未処理             | 200 ℓドラム缶<br>/炭素鋼                |
|                                 | 可燃性雑固体<br>(低放射性)     | 極低放射性に<br>同じ                                                                                 | 未処理<br>[焼却]                                   | 未処理<br>[灰; 溶融]  | 未処理             | 200 ℓドラム缶<br>/炭素鋼                |
|                                 | 難燃性雑固体<br>(低放射性)     | 極低放射性に<br>同じ                                                                                 | 未処理<br>[焼却]                                   | 未処理<br>[灰; 溶融]  | 未処理             | 200 ℓドラム缶<br>/炭素鋼                |
|                                 | 不燃性雑固体<br>(低放射性)     | 極低放射性に<br>同じ                                                                                 | 未処理<br>[高圧縮]                                  | 未処理<br>[金属; 溶融] | 未処理             | 200 ℓドラム缶、<br>コンテナ<br>/炭素鋼、ステンレス |
|                                 | 極低レベル濃縮廃液            | $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NaNO}_2$ 、<br>$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 等                            | アスファルト固化<br>[蒸発乾燥ペレット化]<br>[塩分解再利用]<br>[核種除去] | アスファルト固化        | アスファルト          | 200 ℓドラム缶<br>/炭素鋼                |
|                                 | 低レベル濃縮廃液             | $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NaNO}_2$<br>$\text{Na}_2\text{CO}_3$<br>$\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 等 | アスファルト固化<br>[蒸発乾燥ペレット化]<br>[塩分解再利用]<br>[核種除去] | アスファルト固化        | アスファルト          | 200 ℓドラム缶<br>/炭素鋼                |
|                                 | 廃溶媒、廃希釈材             | TBP<br>ドデカン                                                                                  | プラスチック固化<br>[酸化分解]<br>[核種除去]                  | プラスチック固化        | 塩化ビニル<br>エポキシ樹脂 | 100 ℓドラム缶<br>/炭素鋼                |
| 場                               | 化学スラッジ、廃砂            | 砂、活性炭<br>$\text{NaNO}_3$ 、 $\text{CaCO}_3$<br>$\text{Fe}(\text{OH})_3$                       | 未処理                                           | 未処理             | 未処理             | 未充填                              |
|                                 | ハル・エンドピース<br>廃ヨウ素吸着剤 | ジルカロイ、ステンレス<br>鋼等(塩化ビニル、布等)<br>銀交換ゼオライト<br>容器材料                                              | 未処理<br>未処理                                    | 未処理<br>未処理      | 未処理<br>未処理      | 350 ℓドラム缶<br>/ステンレス鋼             |

[ ] 内: 技術開発中/将来計画

(2/2)

| 発生元                           | 廃棄物種類 | 含有物質                             | 減容処理技術                              | 安定化処理技術        | 固化媒体 | 容器/材質                       |
|-------------------------------|-------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------|------|-----------------------------|
| M<br>O<br>X<br>燃料<br>加工<br>施設 | 可燃物   | 紙、布等天然繊維<br>HEPAフィルタ、<br>ポリエチレン等 | 焼却<br>(酸: Al、Si、Ca、Mg、<br>K等の酸化物など) | 溶融             | 未処理  | 200 ℓドラム缶、<br>キャニスタ<br>/炭素鋼 |
|                               | 難燃物   | 塩化ビニル<br>ネオプレンゴム<br>ゴムテープ等       | 焼却                                  | 未処理<br>[灰: 溶融] | 未処理  | 200 ℓドラム缶<br>/炭素鋼           |
|                               | 不燃物   | 金属、ガラス<br>耐火物                    | 未処理<br>金属; 溶融<br>(鉄系金属主体)           | 未処理<br>金属; 溶融  | 未処理  | 200 ℓドラム缶<br>/炭素鋼           |

表 1.1-2 動燃事業団において発生するTRU核種を含む廃棄物特性-2

| 発生元                             | 廃棄物種類             | 放射能濃度（処理前）[Bq/g]                 |                                  | 処理技術       | 減重率           | 放射能濃度（処理後）[Bq/g]                   |                                  |
|---------------------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|---------------|------------------------------------|----------------------------------|
|                                 |                   | $\alpha$                         | $\beta\gamma$                    |            |               | $\alpha$                           | $\beta\gamma$                    |
| 再<br>処<br>理<br>施<br>設           | 可燃性雑固体<br>（極低放射性） | —                                | —                                | 焼却、[溶融]    | (1/10~1/20) * | ~10~(Pu)                           | 10~10 <sup>3</sup>               |
|                                 | 難燃性雑固体<br>（極低放射性） | ~10 <sup>3</sup>                 | —                                | 焼却、[溶融]    | (1/10~1/20) * | ~10 <sup>4</sup>                   | —                                |
|                                 | 不燃性雑固体<br>（極低放射性） | 同上                               | —                                | [高圧縮]      | 1             | ~10 <sup>3</sup>                   | —                                |
|                                 | 可燃性雑固体<br>（低放射性）  | ~10 <sup>3</sup>                 | —                                | [焼却、溶融]    | (1/10~1/20) * | ~10 <sup>4</sup>                   | —                                |
|                                 | 難燃性雑固体<br>（低放射性）  | 同上                               | —                                | 同上         | 同上            | 同上                                 | —                                |
|                                 | 不燃性雑固体<br>（低放射性）  | 同上                               | —                                | [高圧縮/溶融]   | 1             | ~10 <sup>3</sup>                   | —                                |
|                                 | 極低レベル濃縮廃液         | ~10 <sup>3</sup>                 | 1~10 <sup>2</sup>                | アスファルト固化   | ~1~           | ~10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>3</sup> | 1~10 <sup>2</sup>                |
|                                 | 低レベル濃縮廃液          | 10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup> | 10 <sup>2</sup> ~10 <sup>5</sup> | アスファルト固化   | ~1~           | 10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup>   | 10 <sup>2</sup> ~10 <sup>5</sup> |
|                                 | 廃溶媒、廃希釈剤          | ~10 <sup>4</sup>                 | ~10 <sup>4</sup>                 | プラスチック固化   | ~1~           | ~10 <sup>4</sup>                   | ~10 <sup>4</sup>                 |
|                                 | 化学スラッジ、廃砂         | ≒0                               | ~1~                              | —          | —             | —                                  | —                                |
| M<br>O<br>X<br>燃<br>料<br>加<br>工 | ハル・エンドピース         | ~10 <sup>6</sup> ~               | ~10 <sup>8</sup>                 | [高圧縮]      | 1             | ~10 <sup>6</sup> ~                 | ~10 <sup>8</sup>                 |
|                                 | 廃ヨウ素吸着剤           | —                                | —                                | —          | —             | —                                  | —                                |
|                                 | 可燃物               | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>6</sup> | —                                | 焼却、溶融      | 1/17          | 10 <sup>4</sup> ~10 <sup>7</sup>   | —                                |
|                                 | 難燃物               | 同上                               | —                                | 焼却、[溶融]    | (1/10~1/20) * | 同上                                 | —                                |
|                                 | 不燃物               | 同上                               | —                                | —<br>金属；溶融 | —<br>1        | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>6</sup>   | —                                |

[ ] 内：将来計画／研究開発中

\*：MOX燃料製造不燃物に等しいとした場合

## (2) 海外委託再処理によって発生する廃棄物

我が国の電力会社は使用済のマグノックス炉及び軽水炉燃料を、英国BNFL、フランスCOGEMAに委託して再処理を実施している。このうち約5,000 Mt HMの再処理量に対応する放射性廃棄物が返還される予定である。

これらの廃棄物については返還に先立って仕様の提示を行う必要があり、これまでに数回に分けて仕様書の提示、改訂が行われており、これらの仕様書あるいは追加発行資料に放射能濃度、主要核種組成、処理方法、内容物、容器仕様、物理的・化学的特性が示されている。再処理委託先、廃棄物の種類によりその記載内容の精粗は大きく異なる模様であり、その内容は必ずしも明確ではないが、既往の情報よりその概要を以下に示す。

### (i) 構成物質と処理技術

英国及びフランスの再処理施設において採用されている処理技術と廃棄体を構成する主要物質を表 1.1-3に示した。

表 1.1-3より明らかなように、返還廃棄物はCOGEMAにおいて中低レベル廃液を処理した化学処理スラッジの固化にアスファルトが用いられている他は、総べて固化媒体としてセメントを用いることになっている。また、雑固体廃棄物については焼却等の減容処理は施されておらず、したがって各種の有機物、金属等が一定の制限はあるものの混合された状態で固化されたものとなっている。

我が国におけるTRU核種を含む放射性廃棄物の発生量は、2010年時点において200 ㍔ドラム缶換算で約30万本とされているが、この内、返還廃棄物の占める量は相当の割合となるものと考えられ、その特性の把握は重要である。上記のように返還廃棄物については処理技術が決定されており、各廃棄物の構成物質についても主要内容物に対する情報は電力会社により取得されているものと考えられる。

各廃棄物の主な構成物質は以下のものと考えられる。

#### ・雑固体 (BNFL, COGEMA)

； 主要な含有物としては、紙、布、木材等の天然セルロース系材料、塩化ビニル、ゴム、ポリエチレン等の難燃・可燃性のプラスチック類、金属、ガラス等の不燃物、及び固化媒体としてのセメントより構成される。

BNFLからの廃棄物についてはドリッグ処理場の受入基準、COGEMA

からの廃棄物についてはラ・マンシュ処理場の受入基準を参考とすれば、爆発、発熱、引火性を有する化学的に反応性の高い物質の混入はないものと考えられるが、キレート剤等の混入についての確認が必要と考えられる。

◦ マグノックスワーフ (BNFL)

; マグノックス炉の燃料被覆材であるMg合金が主成分であり、この他に固化媒体としてのセメントから構成される。その他の混入物についても知見が必要である。

◦ MEBクラッド、炭酸バリウムスラリ (BNFL)

; 燃料棒に付着した金属酸化物クラッド，珪藻土， $\text{BaCO}_3$ ， $\text{NaNO}_3$ が主な成分であり，固化材としてセメントが用いられている。化学スラッジのその他の成分についても確認が必要であろう。

◦ 遠心分離ケーキ (BNFL)

; Mo, Zr, Ru等の不溶性FPを主成分として，燃料被覆管の切断により発生するファイン，燃料棒に付着したクラッド等の金属酸化物より構成される。固化媒体としてセメントが加えられる。

◦ ハル・エンドピース (BNFL, COGEMA)

; Zr合金の燃料被覆管，ステンレス鋼製の燃料集合体エンドピース部より構成され，セメントによる固化が施されている。その他の混入物の有無について確認が必要である。

◦ 化学処理スラッジ (COGEMA)

;  $\text{NaNO}_3$ ， $\text{BaSO}_4$ が主成分であると考えられるが，他の成分についても確認の必要があろう。固化媒体はアスファルトであり有機物の供給源となる。

(ii) 放射能及びその他の特性

放射能濃度については， $\alpha$ 及び $\beta/\gamma$ 放射能濃度の最大値，表面汚染密度，及び主要核種に対する放射能濃度，その他の特性としては，重量，発熱量，間隙率，圧縮強度，熱的安定性，浸出特性などについて情報が得られている模様であるが，廃棄物の種類により把握されていないデータも多い。

したがって，今後処分の安全性を評価する上では，実的な核種濃度に係わるデ

ータが必要となると考えられることから、主要核種に対する放射能測定評価、核種組成の確認を行うことが求められる場合もあろう。

表 1.1-4に海外再処理返還固化体の最大放射能濃度の概略値を示した。

### (3) その他の処理技術と廃棄体特性

ここではこれまでに示した動燃事業団及びBNFL、COGEMAにおいて採用されている処理技術の他に、我が国の民間再処理工場を初めとして研究開発が実施されている技術、あるいはTRU廃棄物の処理に対する適用が考慮されている技術を摘出し、製作される廃棄体の構成物質について検討した。

以下に将来、TRU廃棄物の処理に適用される可能性のある技術を示す。

#### i) 可燃性雑固体

##### ◦ 焼却+焼却灰水熱固化

Si, Al, Fe, 等の酸化物よりなる可燃物の焼却灰を、ケイ酸塩を添加しアルカリ溶液中で水熱高温加圧することにより固形化する技術であり、固化体はケイ酸塩多孔質にアルカリを含んだものとなる。

##### ◦ 高温焼却溶融

焼却灰が溶融する高温域において焼却と溶融を同一炉内で行うもの。

したがって廃棄物はケイ酸塩の固形物と考えられる。別途セメント等により容器内に固形化されものと思われる。

#### ii) 難燃性雑固体

##### ◦ 高温焼却溶融

可燃性雑固体と混合して焼却溶融することが考えられている。したがって構成物質は上記に同様。

#### iii) 不燃性雑固体

##### ◦ 粉碎+水熱固化（金属を除く不燃性固体）

可燃性雑固体と同様にケイ酸塩の固形物と考えられる。

#### iv) 低／極低レベル濃縮廃液

##### ◦ 乾燥ペレット化+水熱固化

$\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{NaCO}_3$  を主成分とする粉末にケイ酸塩を添加し、アルカリ溶液中において水熱高温加圧することにより固形化する。硝酸塩

と固化媒体との水熱反応、相互作用について確認の必要がある。

- 塩分解再利用＋水熱固化／ガラス固化

核種除去後の濃縮廃液に含まれる硝酸塩を分解、回収再利用することにより廃棄物中の塩類を除染し、残留スラッジのみを水熱固化またはガラス固化するもの。残留スラッジの組成について確認が必要である。

#### V) 廃溶媒

- 乾留＋水熱固化

T B P に C a 塩を加えて乾留することにより、安定なリン酸塩である  $C a_2 P_2 O_7$  を得て、これをケイ酸塩と共に水熱固化処理を行うものであり、主成分はケイ酸塩となる。

- 焼却＋（セメント）固化

残留物としての焼却灰について組成を確認する必要がある。

#### VI) 廃樹脂

- 焼却＋水熱固化／熔融固化又は高温焼却

イオン交換樹脂の焼却灰組成について確認が必要であるが、焼却灰の水熱固化を行う場合にはケイ酸塩が主成分になるものと考えられる。

#### VII) ハル・エンドピース

- H I P

熱間当方圧加圧法（H I P）により高圧縮することによって結晶組織レベルで圧着しようとするものであり、添加材を必要としないことから構成物質はジルカロイ、ステンレス鋼と極く僅かなクラッドとなる。

- 熔融固化

高温でジルカロイ等を熔融固化しようとするものであり、固化体金属組成の確認が必要である。

#### VIII) 廃ヨウ素吸着剤

- 水熱固化

銀交換ゼオライト自体もケイ酸塩であり添加物組成にもよるが、主成分は固化処理後も変化はないと考えられる。

ix) チャンネルボックス

◦ H I P／溶融固化

チャンネルボックスはジルカロイ、ステンレス鋼、僅かなインコネルより構成されており、H I Pあるいは溶融固化を行う場合には、廃棄体の金属組成について確認の必要がある。

x) バーナブルポイズン

◦ 溶融固化

バーナブルポイズンは被覆管、構造物としてのジルカロイ、ステンレス鋼、インコネル、及び中性子吸収材としてのホウケイ酸ガラスより構成されるているが、溶融固化を行う場合には、ガラス、金属相の組成について確認しておく必要がある。

現時点において検討されている主な廃棄物処理技術は以上に示した通りであるが、これらの内、水熱固化体、溶融固化体、H I Pについては、さらにセメント等を用い容器内に固形化することがあるものと考えられる。

以上に記した構成物質をまとめて表 1.1-5に示す。

表 1.1-3 海外委託再処理において発生する廃棄物特性－1

| 発生元                                            | 廃棄物種類                | 含有物質                                                    | 減容処理技術   | 安定化処理技術      | 固化媒体                      | 容器／材質                    |
|------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------|----------|--------------|---------------------------|--------------------------|
| B<br><br><br>N<br><br>F<br><br>L               | マグノックス雑固体            | 紙、布等繊維物質、ゴム<br>コンクリート、配管、<br>ケーブル等                      | 切断、圧縮    | セメント固化       | セメント                      | ISOコンテナ<br>／炭素鋼          |
|                                                | マグノックス<br>スワーフ       | マグノックス等                                                 | —        | セメント固化       | セメント                      | 500 ℓドラム缶<br>／ステンレス鋼     |
|                                                | THORP雑固体             | マグノックス雑固体<br>に同じ                                        | 切断、圧縮    | セメント固化       | セメント                      | ISOコンテナ<br>／炭素鋼          |
|                                                | MEBクラッド<br>炭酸バリウムスラリ | 燃料棒クラッド<br>濾過助材等<br>$\text{BaCO}_3$ 、 $\text{NaNO}_3$ 等 | —        | セメント固化       | セメント                      | 500 ℓドラム缶<br>／ステンレス鋼     |
|                                                | 遠心分離ケーキ              | Mo、Ru、Zr等<br>不溶性FP、クラッド等                                | —        | セメント固化       | セメント                      | 500 ℓドラム缶<br>／ステンレス鋼     |
|                                                | ハル・エンドピース            | ジルカロイ、<br>ステンレス鋼等                                       | —        | セメント固化       | セメント                      | 500 ℓドラム缶<br>／ステンレス鋼     |
| C<br><br>O<br><br>G<br><br>E<br><br>M<br><br>A | 雑固体                  | 紙、布等繊維物質、ゴム<br>ビニル類、配管、<br>フィルタ等                        | 一部圧縮     | セメント固化       | ファイバーコンクリート<br>(コンクリート、鋼) | 700 ℓ容器<br>／コンクリート、鋼     |
|                                                | 雑固体高汚染               | 紙、布等繊維物質、ゴム<br>ビニル、配管、<br>機器等                           | —        | セメント固化       | セメント                      | 1,200 ℓ容器<br>／セメント、アスベスト |
|                                                | 化学処理スラッジ             | $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{BaSO}_4$<br>等                  | アスファルト固化 | アスファルト<br>固化 | アスファルト                    | 200 ℓドラム缶<br>／ステンレス鋼     |
|                                                | ハル・エンドピース            | ジルカロイ、<br>ステンレス鋼等                                       | —        | セメント固化       | セメント                      | 1,300 ℓドラム缶<br>／ステンレス鋼   |

表 1.1-4 海外委託再処理において発生する廃棄物特性 - 2

| 発生元                        | 廃棄物種類                | 減容, 安定化<br>処理技術  | 減重率   | 放射能濃度 (処理後) [Bq/g]   |                      |
|----------------------------|----------------------|------------------|-------|----------------------|----------------------|
|                            |                      |                  |       | $\alpha$             | $\beta \gamma$       |
| B<br>N<br>F<br>L           | マグノックス雑固体            | 切断、圧縮、<br>セメント固化 | 7     | $\sim 10^4$          | $\sim 3 \times 10^4$ |
|                            | マグノックス<br>スワーフ       | セメント固化           |       | $\sim 4 \times 10^6$ | $\sim 6 \times 10^8$ |
|                            | THORP 雑固体            | 切断、圧縮<br>セメント固化  | 10~50 | $\sim 10^4$          | $\sim 3 \times 10^4$ |
|                            | MEBクラッド<br>炭酸バリウムスラリ | セメント固化           |       | $\sim 2 \times 10^4$ | $\sim 7 \times 10^6$ |
|                            | 遠心分離ケーキ              | 同上               |       | $\sim 7 \times 10^5$ | $\sim 4 \times 10^8$ |
| C<br>O<br>G<br>E<br>M<br>A | ハル・エンドピース            | 同上               | 2~3   | $\sim 7 \times 10^5$ | —                    |
|                            | 雑 固 体                | セメント固化           |       | $\sim 5 \times 10^3$ | $\sim 10^6$          |
|                            | 雑固体高汚染               | 同上               |       | $\sim 3 \times 10^5$ | $\sim 2 \times 10^6$ |
|                            | 化学処理スラッジ             | アスファルト固化         | ~1~   | —                    | —                    |
|                            | ハル・エンドピース            | セメント固化           | ~5    | $\sim 3 \times 10^5$ | —                    |

表 1.1-5 今後採用の可能性のあるその他の処理技術と廃棄体特性

| 発生元                   | 廃棄物種類         | 含有物質                                                            | 減容処理技術                    | 安定化処理技術               | 固化媒体                                                                               |
|-----------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 再<br>処<br>理<br>施<br>設 | 可燃性雑固体        | 紙、布等繊維物質、<br>ポリエチレン、ゴム等                                         | 焼却<br>高温焼却溶融              | 水熱固化<br>同左            | 廃棄体中 $\text{SiO}_2$ 、<br>$\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$<br>等 同上 |
|                       | 難燃性雑固体        | 塩化ビニル<br>ネオプレン等                                                 | 高温焼却溶融                    | 同左                    | 同上                                                                                 |
|                       | 不燃性雑固体        | 金属以外の無機物                                                        | 高温焼却溶融<br>粉 碎             | 同左<br>水熱固化<br>セメント固化  | 同上<br>同上<br>セメント                                                                   |
|                       | 極低レベル<br>濃縮廃液 | $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NaNO}_2$<br>$\text{NaCO}_3$ 等          | 乾燥ペレット化<br>塩分解再利用<br>核種除去 | 水熱固化<br>水熱固化<br>ガラス固化 | ケイ酸塩<br>同上<br>ホウケイ酸ガラス                                                             |
|                       | 低レベル濃縮<br>廃液  | $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NaNO}_2$<br>$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 等 | 極低レベル濃縮<br>廃液と同様          | 同左                    | 同左                                                                                 |
|                       | 廃 溶 媒         | TBP、ドデカン                                                        | 乾 留<br><br>焼 却            | 水熱固化<br><br>セメント固化    | ケイ酸塩<br>( $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 等)<br>セメント                             |
|                       | 廃 樹 脂         |                                                                 | 焼 却                       | 水熱固化<br>溶融固化          | ケイ酸塩                                                                               |
|                       | ハル・エンド<br>ピース | ジルカロイ、ステンレス鋼                                                    | 高圧縮<br>HIP<br>溶融固化        | セメント固化<br>同左<br>同左    | セメント<br>—<br>—                                                                     |
|                       | 廃ヨウ素吸着<br>剤   | 銀交換ゼオライト、他                                                      |                           | セメント固化<br>水熱固化        | セメント<br>ケイ酸塩                                                                       |
|                       | チャンネル<br>ボックス | ジルカロイ、ステンレス鋼<br>インコネル                                           | 切 断<br>HIP<br>溶融固化        | セメント固化<br>同左<br>同左    | セメント<br>—<br>—                                                                     |
|                       | バーナブル<br>ポイズン | ジルカロイ、ステンレス鋼<br>インコネル                                           | 切 断<br>溶融固化               | セメント固化<br>同左          | セメント<br>—                                                                          |

#### (4) 処分対象として考慮しておくべき廃棄体

##### (i) 処分対象廃棄物種類

前述のようにTRU廃棄物として浅地中処分以外の地下埋設処分を実施すべき廃棄体の区分目安値は、原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会により約1 GBq /t とされている。<sup>1)</sup> これまでの測定実績より、この区分目安値を超える可能性の大きい廃棄物は以下に示す種類となる。

- ・低放射性雑固体
  - 可燃物焼却 & 熔融固化体
  - 難燃物焼却 & 熔融固化体
  - 不燃物高圧縮 or 熔融固化体
- ・低レベル濃縮廃液
  - アスファルト固化体
  - 核種除去二次廃棄物
- ・廃溶媒, 廃希釈剤
  - プラスチック固化体
  - 焼却, 乾留, 核種除去二次廃棄物
- ・ハル・エンドピース (全処理技術)
- ・MOX燃料製造施設からの固体廃棄物
- ・返還固化体
  - 雑固体 (容器単位では相当数が区分目安値を下回る可能性あり)
  - 化学スラッジ類
  - ハル・エンドピース, スワーフ, 不溶解残渣類

また、長寿命 $\beta$   $\gamma$ 核種を有意に含み、浅地中処分の濃度上限値を超える等のため浅地中処分対象とならない可能性の大きい廃棄物としては以下に示すものがある。

- ・チャンネルボックス (長寿命 $\beta$   $\gamma$ 核種: Ni-59, (-63), Zr-93)
- ・バーナブルポイズン (長寿命 $\beta$   $\gamma$ 核種: Ni-59, (-63))
- ・廃ヨウ素吸着剤
- ・核種除去二次廃棄物
  - { Cs 吸着廃イオン交換体
  - { C-14含有スラッジ
  - { etc.

なお、これらの廃棄物については核種濃度の測定データが不足すること、今後発生が予測される民間再処理施設からの廃棄物は東海再処理施設等既存の再処理施設からの廃棄物と核種濃度が異なることもあり得ること、また、廃棄物自体の放射能濃度も広く分布するものがあることなどから、核種濃度の実態及びTRU廃棄物として区分される廃棄物については、今後の測定結果に基づき詳細に評価する必要がある。

(ii) 処分対象となる物質

処分場に定置、処分される廃棄体を構成する物質を把握することは、処分場のバリア機能に影響を及ぼす現象を摘出する上で不可欠である。

以上に示した動燃事業団、海外再処理施設、民間再処理会社において採用あるいは研究開発中の処理技術より、処分対象となるTRU廃棄物あるいは長半減期 $\beta/\gamma$ 核種を有意に含む低レベル放射性廃棄物の廃棄体形態、及びその主要構成物質として考慮しておくべきものは表 1.1-6に整理された範囲になると考えられる。

現在発生あるいは海外から返還予定の廃棄物については、雑固体の減容処理が実施されていないもの等があり、固化媒体もプラスチック、アスファルト、セメントが用いられている。このように、廃棄体を構成する物質は将来の処理技術も考慮に入れば鉄を初めとする各種金属、 $\text{NaNO}_3$ 等の中和塩、セメント、ガラス等その他の無機物、セルロース等の天然有機物、塩化ビニル、ポリエチレン等のプラスチック類、 $\text{BaSO}_4$ 、 $\text{CaCO}_3$ 等の化学処理添加成分が主要成分として含まれることが明らかである。また、これらの主要成分の他にも、除染剤に用いられるキレート剤等微量に存在することで核種の移行特性に影響する物質の混入も考えられ、構成物質は多種多様を極める。

一方、将来適用が予想される処理技術によって発生する廃棄体については、可燃物、難燃物の焼却、固化媒体の開発が実施されることから、分別が完全であれば有機物の含有量は著しく低下するものと予測できる。また、新たに適用が予想される処理技術としては、焼却灰の熔融固化、水熱固化などがあり、これらは組成の制御によりケイ酸塩系の安定な固化体の製作が期待できると共に、水熱固化体及び容器内の充填物として考慮されているセメントはアルカリ性を

維持する機能があるところから、良好な処分場環境を保持する効果も期待できる。

さらに、金属廃棄物については溶融固化、HIP等が開発中であり、これらを総合すると将来の廃棄物形態としては、金属（切断片、圧縮体、HIP、鋳塊）、金属酸化物（焼却灰）、ケイ酸塩類（溶融固化、セメント等）が主要になる可能性が大きいと考えられる。

処分対象となる主要物質を表 1.1-7にまとめた。今後はこれらの物質の含有量を明らかにする他、キレート剤等の微量影響物質についても含有量を明らかにして行く必要がある。

表 1.1-6 処 分 対 象 廃 棄 体

(1/2)

| 発生元                   | 廃 棄 物 種 類                        | 減 容 処 理 技 術      | 安定化処理技術            | 主 要 含 有 物 質                                                 | 容 器                   | 備 考                       |
|-----------------------|----------------------------------|------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 再<br>処<br>理<br>施<br>設 | 雑 固 体                            | 切断 and/or 圧縮     | セメント固化             | セルロース、ゴム類、ビニル類、<br>コンクリート、SUS、CS、<br>銅、他の金属、その他             | CS<br>コンクリート<br>アスベスト | キレート剤等の微量成分は要確認           |
|                       | 可燃物                              | 焼 却              | 熔融固化               | $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $Fe_2O_3$ 等<br>によるケイ酸塩                | (CS)                  | 組成確認の必要                   |
|                       |                                  | 高温焼却熔融           | ←                  | 同 上                                                         | (CS)                  | 同 上                       |
|                       | 難燃物                              | 可燃物に同じ           | 可燃物に同じ             | 可燃物に類似                                                      | (CS)                  | 同 上                       |
|                       | 不燃物、金属                           | 溶 融              | ←                  | Fe、Cr、Ni、Cu等<br>の合金                                         | (CS)                  | 同 上                       |
|                       | その他                              | 高圧縮              | セメント固化             | コンクリート、ガラス、<br>断熱材、他                                        | (CS)                  | 同 上<br>微量成分確認の必要          |
|                       |                                  | 粉 砕              | セメント固化、<br>水熱固化    | 同 上<br>ケイ酸塩                                                 | (CS)<br>(CS)          | 同 上<br>組成確認の必要            |
|                       |                                  | 高温焼却熔融           | ←                  | 同 上                                                         | (CS)                  | 同 上                       |
|                       | 濃縮廃液                             | アスファルト固化         | ←                  | $NaNO_3$ 、 $NaNO_2$ 、 $Na_2HPO_4$ 、<br>$Na_2CO_3$ 、アスファルト等  | CS                    | 微量成分存在形態の確認の必要性           |
|                       |                                  | 蒸発乾燥、ペレット化       | —                  | $NaNO_3$ 、 $NaNO_2$ 、 $Na_2HPO_4$ 、<br>$Na_2CO_3$ 、他 ケイ酸塩、他 | (CS)                  | 固化媒体の設定<br>が必要            |
|                       |                                  |                  | 水熱固化               | —                                                           | (CS)                  | 組成確認の必要                   |
|                       |                                  | 塩分解再利用           | —<br>水熱固化<br>ガラス固化 | 残留塩、スラッジ<br>ケイ酸塩<br>ホウケイ酸ガラス                                | (CS)<br>(CS)          | 同 上<br>組成確認の必要<br>同 上     |
|                       | 核種除去                             | —                | —                  | 残留塩、スラッジ                                                    | (CS)                  | 同 上                       |
|                       | 化学処理スラッジ<br>(COGEMA)             | アスファルト固化         | ←                  | $NaNO_3$ 、 $BaSO_4$ 、アスファルト等                                | SS                    | 微量成分確認の必要                 |
|                       | WEB クラッド、 $BaCO_3$ スラリ<br>(BNFL) | —                | セメント固化             | $NaNO_3$ 、 $BaCO_3$ 、珪藻土、金属酸<br>化物、セメント等                    | SS                    | 同 上                       |
|                       | 化学スラッジ、廃砂                        | —                | —                  | 砂、 $NaNO_3$ 、 $CaCO_3$ 、 $Fe(OH)_3$ 、<br>活性炭                | (CS)                  | 処理技術の設定が必要                |
|                       | 廃樹脂                              | 焼 却              | 水熱固化<br>熔融固化       | ケイ酸塩<br>同 上                                                 | (CS)<br>(CS)          | 組成確認の必要<br>同 上            |
|                       | 廃溶媒、廃希釈剤                         | —                | プラスチック固化           | TBP、ドデカン、塩化ビニル、<br>エポキシ樹脂                                   | CS                    | 組成確認の必要                   |
|                       |                                  | 乾 留              | 水熱固化               | $(Ca_2P_{207}+)$<br>ケイ酸塩                                    | (CS)                  | 同 上                       |
|                       |                                  | 焼 却<br>酸化分解、核種除去 | 熔融固化<br>—          | 同 上<br>共沈剤 $La(NO_3)_3$                                     | (CS)<br>(CS)          | 同 上<br>組成確認、固化媒体<br>設定の必要 |

| 発生元                                       | 廃棄物種類                | 減容処理技術 | 安定化処理技術 | 主要含有物質                                                                                          | 容器   | 備考              |
|-------------------------------------------|----------------------|--------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------|
| 再<br>処<br>理<br>設<br>施                     | マグノックススワーフ<br>(BNFL) | —      | セメント固化  | マグノックス, セメント                                                                                    | SS   | 混入物の確認が必要       |
|                                           | 遠心距離ケーキ<br>(BNFL)    | —      | セメント固化  | Mo, Ru, Zr等不溶性FP,<br>CP金属酸化物, セメント                                                              | SS   | 組成確認の必要         |
|                                           | ハル・エンドピース            | —      | セメント固化  | ジルカロイ, ステンレス鋼,<br>(場合により, 布, プラスチック)<br>クの有機物を含む<br>セメント                                        | SS   | 混入物の確認が必要       |
|                                           |                      | 高圧縮    | セメント固化  | 同上                                                                                              | (SS) |                 |
|                                           |                      | HIP    |         | 同上(有機物無し)                                                                                       | (SS) | 組成確認の必要         |
|                                           |                      | 熔融固化   |         | 同上(有機物無し)                                                                                       | (SS) | 同上              |
|                                           | 廃ヨウ素吸着材              | —      | セメント固化  | 銀交換ゼオライト,<br>セメント                                                                               | (CS) | 混入物の確認が必要       |
|                                           |                      |        | 水熱固化    | ケイ酸塩                                                                                            | (CS) | 組成確認の必要         |
|                                           | チャンネルボックス            | 切断     | セメント固化  | ジルカロイ, ステンレス鋼,<br>インコネル, セメント等                                                                  | (CS) | 混入物の確認が必要       |
|                                           |                      | HIP    |         | ジルカロイ, ステンレス鋼,<br>インコネル                                                                         | (CS) | 組成確認の必要         |
|                                           |                      | 熔融固化   |         | 同上                                                                                              | (CS) | 同上              |
|                                           | バーナブルポイズン            | 切断     | セメント固化  | ジルカロイ, ステンレス鋼,<br>インコネル, ホウケイ酸ガラス,<br>セメント等                                                     | (CS) | 混入物の確認必要        |
|                                           |                      | 熔融固化   |         | ジルカロイ, ステンレス鋼,<br>インコネル, ホウケイ酸ガラス等                                                              | (CS) | 組成確認の必要         |
| M<br>O<br>X<br>燃<br>料<br>製<br>造<br>設<br>施 | 雑固体<br>可燃物           | 焼却     | 熔融固化    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 等<br>によるケイ酸塩 | (CS) | 組成確認の必要         |
|                                           |                      | 高温焼却熔融 |         | 同上                                                                                              | (CS) | 同上              |
|                                           | 難燃物                  | 焼却     | 熔融固化    | 可燃物に類似                                                                                          | (CS) | 同上              |
|                                           |                      | 高温焼却熔融 |         | 同上                                                                                              | (CS) | 同上              |
|                                           | 不燃物 金属               | 溶融     |         | Fe, Cr, Ni, Cu等の合金                                                                              | (CS) | 同上              |
|                                           | その他                  | 高圧縮    | セメント固化  | コンクリート, ガラス, 断熱材,<br>他                                                                          | (CS) | 同上<br>微量成分確認の必要 |
|                                           |                      | 粉碎     | セメント固化  | 同上                                                                                              | (CS) | 同上              |
|                                           |                      |        | 水熱固化    | ケイ酸塩                                                                                            | (CS) | 組成確認の必要         |
|                                           |                      | 高温焼却熔融 |         | 同上                                                                                              | (CS) | 同上              |

注) ・“容器”欄のCSは炭素鋼, SSはステンレス鋼を表わす。また, ( )内は実績無く, 予測。

・熔融固化, 水熱固化についてはさらにセメント等による容器内充填固化が必要になると考えられる。

表 1.1-7 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<br>・収着特性への影響                                               |
|     | 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<br>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                                                            |
| 無機物 | 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<br>・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                                               |                                                                 |
|     | 酸化物                | $Al_2O_3$ , $SiO_2$ , $Fe_2O_3$ 等金属酸化物                          | 焼却灰                                                   |                                                                 |
|     |                    | Mo, Ru, Zr, Co等FP, CP酸化物                                        | 返還遠心分離ケーキ<br>MEBクラッド                                  |                                                                 |
|     | プロセス添加剤<br>(及び中和塩) | $NaNO_3$ , $NaNO_2$ , $Na_3PO_4$ , $Na_2HPO_4$ 等中和塩類            | 返還化学処理スラッジ<br>濃縮廃液固化体<br>廃溶媒核種除去                      | ・水に可溶性<br>・微生物の活動源となり地球化学的条件下に影響を及ぼす可能性<br>・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<br>PNC 化学スラッジ<br>廃溶媒核種除去<br>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                               | マグノックスワーフ<br>ハル・エンドピース<br>チャンネルボックス<br>バーナブルポイズン      | ・各合金組成により腐食性が異なる<br>・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<br>雑固体<br>ハル・エンドピース<br>チャンネルボックス<br>バーナブルポイズン | ・合金組成により腐食性が異なる                                                 |

#### (5) 評価すべき現象抽出上の留意点

TRU廃棄物の処分の長期安全性を評価する上で留意すべき廃棄物特性は、上記の調査結果より以下のようにまとめられる。

①TRU廃棄物として区分される可能性の高い放射性廃棄物は、廃棄体を構成する物質が多種多様であることから、性能評価上考慮すべき影響因子も多岐にわたる。

- ・多種類の有機物を含むことから、微生物活動による分解生成物の影響、地球化学的条件の変化について考慮する必要がある。
- ・金属類を多種多量に含むことから、これらの腐食による腐食生成物の影響、地球化学的条件の変化について考慮する必要がある。
- ・化学的緩衝効果を有するセメント系材料が多用される可能性が高く、これによる処分場環境条件の影響を考慮する必要がある。
- ・プロセス内で使用される酸の中和生成物としての $\text{NaNO}_3$ 、化学処理生成物等の化学物質が多量に含まれることから、これらによる核種の溶解、移行特性、あるいは微生物活動に対する影響を考慮する必要がある。

②長寿命 $\beta$   $\gamma$ 核種を有意に含む廃棄物も処分対象とする場合、I-129、C-14といった、高レベル放射性廃棄物に含有されない核種が評価上クリティカルとなることが予想され、これらの核種に対する評価を実施する必要がある。

#### 1.1.2 TRU廃棄物の処分概念

既述したようにTRU廃棄物の処分方法について原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会は、「TRU廃棄物として『浅地中以外の地下埋設処分』が適切であると考えられるものについては、今後具体的な処分方策を検討していく必要がある。」<sup>1)</sup>とし、現在処分方法の検討は緒に就いたところである。そのため我が国においては、TRU廃棄物の処分について定まった処分概念が存在しない。

そこで、本項では次節で検討を行う性能評価の対象とすべき現象の抽出を行う前提とすべく、諸外国におけるTRU廃棄物、あるいは $\alpha$ 廃棄物、中レベル廃棄物の処分概念の検討例を参考として、処分施設の形状・規模、廃棄体定置方法、人工バリア構成、大略の深度について想定し代表的な処分概念を大概設定する。

処分概念設定の基礎とする諸外国における処分の現状を表 1.1-8にまとめて示す。ここで $\alpha$ ／中レベル廃棄物の処分に対して参考となす国は処分方策を示し、研究開発を実施しているアメリカ、スイス、フランス、ベルギー、ドイツ、イギリス、スウェーデンの代表的7ヶ国である。

表 1.1 - 8 各国の T R U 廃棄物処分に係る現状

( 1 / 2 )

| 国 名        |                       | ア メ リ カ 合 衆 国                                                                                       |                                                                    | ス イ ス                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                   | フ ラ ン ス                                                                                              | ベ ル ギ ー                                                                                    | ド イ ツ                                                     |                                                                                  | 英 国                                                                                              |
|------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 区 分        | 名 称<br>区 分 値          | EPA, DOE ; TRU 廃棄物<br>NRC ; GTCCLLW<br>100nCi/g (3.7kBq/g)<br>40CFR191, DOE Order 5820.2<br>10CFR61 |                                                                    | TRU 含有廃棄物<br>定量的区分値はない                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                   | カテゴリ B (アルファ廃棄物)<br>3.7GBq/t<br>RFS No I-2                                                           | カテゴリ B (アルファ廃棄物)<br>(SAFIR ではフランスの区分を使用)<br>定量的区分値はない                                      | 最終処分の観点から<br>発熱性廃棄物<br>非発熱性廃棄物<br>処分場母岩の温度上昇限度 3℃         |                                                                                  | ILW (中レベル廃棄物)<br>$\alpha$ 放射能 $\geq 4 \text{ GBq/t}$<br>貯蔵又は処分施設に発熱の効果を<br>考慮する必要のないもの<br>DOE 設定 |
| サイト<br>候補地 | 所 在 地<br><br>地 質, 深 度 | GTCCLLW<br>ネバダ州<br>ユッカマウンテン                                                                         | DOE TRUW<br>ニューメキシコ州<br>ロスメダノス地区<br>(WIPP)<br>岩塩層, 約 660m          | タイプ B 処分場<br>Bois de la Glaive<br>無水石膏<br>Piz Pian Grand<br>結晶質岩<br>Oberbauenstock<br>泥灰岩<br>Wellenberg<br>泥灰岩<br>深度 400~1200m                            | タイプ C 処分場<br>結晶質岩<br>Böttstein<br>Weiach<br>Riniken<br>Kaisten<br>Schafisheim<br>Leuggern<br>Siblingen<br>堆積岩 (粘土層)<br>Zürich Weinland<br>Lägern 北方<br>Limmatt 東方 | Aisne ; 粘土層<br>Deux-Sèvres ; 花崗岩<br>Main-et-Loire ; 片 岩<br>Ain ; 岩塩層<br><br>(1991 年 撤回)              | モル/デッセル地区<br>Boom 粘土層, 約 230m                                                              | 非 発 熱 性<br>ニーダーザクセン州<br>コンラッド<br><br>石灰岩,<br>1,100~1,300m | 発熱性・非発熱性<br>ニーダーザクセン州<br>ゴアレーベン<br><br>岩塩, 約 870m                                | カンブリア郡 セラフィールド<br>火山岩, 550m 以深<br>ハイランド地域 ドーンレイ<br>閃緑岩, 約 500m                                   |
| 処分概念       | 定置方法                  | GTCCLLW は<br>未定<br>'89 ~ '92 で設計                                                                    | CHTRU<br>・坑道内定置<br>200ℓ ドラム缶は<br>15 列 × 3 段積<br>RHTRU<br>・水平処分孔内定置 | ・坑道内定置<br>200ℓ ドラム缶収納の<br>コンクリートコンテ<br>ナ 5 段積<br>・200ℓ ドラム缶 10 段<br>俵積                                                                                    | ・結晶質岩<br>サイロ内に積上<br>・堆積岩<br>未定                                                                                                                                    | ・岩洞処分概念<br>岩洞内コンクリートビット内に縦積<br>・サイロ内処分概念<br>サイロ内に俵積, 又はサイロ内<br>コンクリートビット内に縦積<br>・坑道処分概念<br>垂直処分孔内に縦積 | ・坑道内定置 (BELGIAN 概念)<br>円形断面坑道下部にコンクリート固化<br>体を俵積みし, その上部に HLW を定<br>置<br>アスファルト固化体は別坑道に俵積み | ・坑道内定置<br>円筒形容器は俵積み<br>角形コンテナは 3 段<br>積み                  | ・岩洞内俵積み<br>(埋立方式, 遠隔吊<br>下)<br>・岩洞内縦積み<br>・垂直処分孔定置<br>300m の垂直処分孔<br>内に縦積み (HLW) | 岩洞型処分<br>200ℓ 又は 500ℓ ドラム缶,<br>3 m <sup>3</sup> 又は 12 m <sup>3</sup> コンクリートボ<br>ックスを岩洞内に積上げる     |
|            | バリア構成                 | 廃棄体<br>凝灰岩埋戻し材                                                                                      | 廃棄体<br>岩塩/ベントナイト,<br>又は岩塩埋戻し材                                      | 廃棄体<br>コンクリートコンテナ<br>コンクリート充填材<br>コンクリート坑道ライ<br>ナ                                                                                                         | 廃棄体<br>コンクリート構造物<br>ベントナイト充填材                                                                                                                                     | 廃棄体<br>コンクリート構造物<br>コンクリート又はベントナイト充填材                                                                | 廃棄体<br>粘土物質等充填材<br>(コンクリート坑道ライナ)                                                           | 廃棄体<br>石灰岩埋戻し材                                            | 廃棄体<br>岩塩埋戻し材                                                                    | 廃棄体<br>コンクリート充填材                                                                                 |
|            | 規 模                   | GTCCLLW は<br>未定                                                                                     | CHTRU; 176,000 m <sup>3</sup><br>RHTRU; 7,100 m <sup>3</sup>       | TRU 含有廃棄物 20,000 m <sup>3</sup><br>( ILW 60,000 m <sup>3</sup> )                                                                                          |                                                                                                                                                                   | 350,000 m <sup>3</sup>                                                                               | 30,000 m <sup>3</sup>                                                                      | 650,000 m <sup>3</sup><br>最大 1,000,000 m <sup>3</sup>     | 4,100,000 m <sup>3</sup>                                                         | 1,400,000 m <sup>3</sup> (LLW)<br>600,000 m <sup>3</sup> (ILW)                                   |
| 安全性評価      | シナリオ                  | 1999 年 10 月発表<br>予定の EIS に向<br>け R & D 実施中                                                          | 処分場健全ケース<br>IA~IC<br>ボアホール掘削ケ<br>ース II A~II D<br>(FSEIS)           | タイプ B 処分場<br>ニアフィールド放出シナリオ × 7<br>(ガス発生, バリア劣化含む)<br>ファーフールド移行シナリオ × 10<br>(石灰岩, 泥灰岩, Kd, 流速変化等)<br>生物圏シナリオ × 3<br>(気候, 土壌 Kd の変化)<br>その他・ボアホール掘削, 浸食シナリオ |                                                                                                                                                                   | PACOMA での評価 (TRU)<br>通常シナリオ<br>立坑密封性欠除シナリオ                                                           | PACOMA での評価 (TRU)<br>通常シナリオ<br>降水量減少シナリオ<br>断層発生シナリオ<br>人間侵入シナリオ                           | 通常シナリオ                                                    | PSE での評価<br>処分場閉鎖直後に塩水<br>浸入                                                     | 予備の評価<br>ボアホール掘削, 跡地利用<br>地下水移行経路<br>気候の変化を考慮<br>(不確実性解析)                                        |
|            | 評価モデル                 | —                                                                                                   | 溶解度限度<br>1 次元移流分散<br>2 次元移流分散<br>(二重間隙モデル)                         | ニアフィールド内 2 次元拡散, 又は移流分散<br>ファーフールド内 1 次元移流分散                                                                                                              |                                                                                                                                                                   | ニアフィールド;<br>溶解度限度, 浸出率<br>2 次元拡散<br>ファーフールド;<br>2 次元移流分散<br>確率論的評価<br>(PACOMA)                       | ニアフィールド;<br>溶解度限度<br>2 次元拡散<br>ファーフールド;<br>1 次元分散, 移流分散<br>確率論的評価<br>(PACOMA)              | ニアフィールド<br>浸出率<br>溶解度限度<br>ファーフールド<br>1 次元移流分散            | ニアフィールド<br>浸出率<br>溶解度限度<br>コンベンションに<br>よる汚染水の追出し<br>ファーフールド<br>3 次元移流拡散          | ニアフィールド<br>溶解度限度<br>ファーフールド<br>1 ~ 3 次元移流分散                                                      |
|            | 重要核種                  | —                                                                                                   | Pu-238, Ra-<br>226, Pb-210,<br>U-234, Np-<br>237                   | I-129, Cs-135,<br>Sn-126, Np-237                                                                                                                          | —                                                                                                                                                                 | PACOMA<br>Np-237, Th-229, U-233<br>I-129                                                             | PACOMA<br>I-129, Tc-99, Np-237<br>U-238 系列                                                 | I-129, Ra-226,<br>U-234, U-238,<br>Po-210                 | Tc-99, Cs-135,<br>U-234, I-129                                                   | Ce-36, I-129, Cs-135<br>U-238 系列                                                                 |
| 処分スケジュール   |                       | 2001 年: 建設申請<br>2004 年: 着 工<br>2010 年: 着 工<br>2010 年: 運 開                                           | 1983 年: 着 工<br>1992 年: 実証試験<br>1997 年以降<br>SEIS<br>運開              | 1990 年: サイト選定<br>1995 年: 着 工<br>1998 年: 運 開                                                                                                               | 1993 年: サイト選定<br>2010 年: 着 工<br>2020 年: 運 開                                                                                                                       | 1991 年: 放射性廃棄物法成立<br>1992 年: 地下実験場サイト選定<br>2007 年以降: 処分場サイト選定                                        | 1995 年: SAFIR II 作成<br>2020 年: 着 工<br>2030 ~ 2035 年: 運 開                                   | 1982 年: 許認可申請<br>1990 年: 運開予定<br>1994 年以降に遅延              | 2000 年頃,<br>許認可申請<br>2003 年: 着 工<br>2008 年以降運開                                   | 1992 年: 許認可申請<br>1994 年: 着 工<br>2005 年: 運 開                                                      |

| 国 名        |              | ス ウ ェ ー デ ン                                                                                            |                                                               |
|------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 区 分        | 名 称<br>区 分 値 | α汚染廃棄物<br>スタズビク研究センター等から発生する<br>低中レベル長半減期核種を含む<br>定量的区分値はない                                            |                                                               |
| サイト<br>候補地 | 所 在 地        | 低・中レベル廃棄物                                                                                              | α汚染廃棄物                                                        |
|            | 地質、深度        | SFR-1<br>オスタマ市 フォッシュマルク<br>花崗岩、バルト海海洋底下<br>約60m                                                        | SFL-3<br>1997年に14箇所に絞り込まれ<br>現地調査実施中<br>先カンブリア紀の結晶質岩<br>約500m |
| 処分概念       | 定 値 方 法      | サイロ1基、岩洞5基<br>200ℓドラム缶<br>コンクリート容器、輸送コンテナをサイロ、岩洞内に積上げる                                                 | 岩洞型処分<br>岩洞内のコンクリートビット内に定置                                    |
|            | バリア構成        | 廃棄体、コンクリート壁<br>充填コンクリート<br>ベントナイト層<br>(施設により異なる)                                                       | グラウト、コンクリート壁、<br>ベントナイト(又は砂混合)充填材                             |
|            | 規 模          | 第1期工事分; 60,000m <sup>3</sup><br>第2期工事分; 30,000m <sup>3</sup>                                           | 6,600m <sup>3</sup>                                           |
| 安全性評価      | シナリオ         | 安全審査実施(第1期分)<br>条件付運転許可<br><br>閉鎖後2,500年迄の“塩水期”<br>閉鎖後2,500年以後の“内陸期”<br>に分けて評価,<br>通常シナリオ,<br>気体発生メナリオ | SFL-3単独あるいはSFL全体としての評価は行われていない。                               |
|            | 評価モデル        | ニアフィールド(サイロ)<br>分配平衡<br>1次元拡散、移流拡散<br>ファーフールド<br>チャンネル内移行<br>(無収着、無崩壊)                                 | —                                                             |
|            | 重要核種         | 塩水期: Cs-137<br>内陸期: C-14,<br>Pu-239, 240                                                               | —                                                             |
| 処分スケジュール   |              | 1983年 建設認可, 着工<br>1988年 運転認可, 運開<br>2000年頃第2期分運開                                                       | 2001年 許認可準備開始<br>2010年頃着工<br>2020年 運開                         |

## (1) 処分施設概念

処分後長期の安全性を評価する際には、処分場内の構成物質を考慮して核種移行の機構、影響評価対象とすべき物理的、化学的現象を摘出する必要がある。したがって、人工バリアの構成は評価対象とすべき現象の選択を行う上で重要である。また、処分深度についても人間侵入、あるいは直接放出シナリオを検討する上で重要な条件となる他、E h 等地質環境条件の概略を想定する上での目安ともなる。さらに、施設形態及びその規模は性能評価を行う際のモデル化の前提として重要である。

表 1.1-8に示した各国の処分概念を基に、“処分施設形状” “定置方法” “処分施設深度” “人工バリア構成” に分類して再構成したものを表 1.1-9に示すと共に、主な処分施設概念図を図 1.1-1～5 に示す。

なお、人工バリア構成、地質条件、廃棄体定置方法については、1990年～1991年にかけて実施した「TRU廃棄物の処分に関する調査研究」<sup>2, 3)</sup>に詳しい。

### (i) 処分施設形態

表 1.1-8より、調査対象7ヶ国のうちアメリカ、ベルギーを除く5ヶ国が比較的大断面の空洞（岩洞）タイプを、またスイス、フランス、スウェーデンの3ヶ国がサイロタイプの施設形態を適用対象としており、過半数を超える国が岩洞、又はサイロタイプの処分施設について検討、評価を行っている。本来処分施設の形態は、地質環境条件を反映した空洞安定性、経済性、建設技術、作業性等より決定されるべきものである。しかしながらここでは性能評価影響因子の摘出のための前提条件を示すことが目的であることから、概略的に検討し、TRU廃棄物の多くが非発熱性で、熱による定置密度上の制限がないことから処分空間の効率的利用がなされるものと考え、我が国においてもボールド（岩洞）タイプ、サイロタイプの2形態が適用される可能性が高いものとした。そこで以降では上記2種類の施設形態を前提として検討を行う。

なお、処分施設の大きさについては必ずしも性能評価対象シナリオの摘出上重要ではないものの、次章において性能評価試算を行う関係から、ここでは断面積約 110㎡の岩洞型施設に廃棄体コンテナを積上げる概念を設定する。

### (ii) 人工バリア構成

TRU廃棄物の処分施設に設置される人工バリアについては、原子力委員会放

放射性廃棄物対策専門部会が示した考え方に従うならば、各種廃棄物の特性を反映した個別の処分概念を検討した後、次段階でそれらを統合化する等の研究課程で決定されるべきものと考えられる。又、さらに詳細な検討を進めていくためには処分場サイト条件を反映した性能評価研究に基づいて人工バリアの設計が実施されるものと考えられるが、ここでは上記のように処分の安全評価上対象とすべき現象を摘出する前提として、現時点で考慮しておくべき人工バリアの種類を想定することが目的である。そこで、諸外国において設置が考慮されている人工バリアを参考にしながら検討すべき範囲を網羅的に示すものとする。

表 1.1-9より、諸外国において設置が考慮されている人工バリアは容器、固化媒体を含む廃棄体パッケージ、廃棄体パッケージを複数個収納するコンテナ、コンテナ内の空隙に充填する充填材、さらに廃棄体定置後処分空洞を閉鎖する充填材、埋戻し材等がある。なお、現時点ではこれらのバリアは長期性能評価手法が未確立である等の理由により、必ずしもその存在が安全評価上反映されていないものもあるが、ここでは処分場環境を明確にし、生じ得る現象摘出の基礎とするためにも総べての人工バリアを摘出することとした。各人工バリア及びその構成物質を以下に示す。

- 廃棄体パッケージ；1.1.1 において対象範囲を設定済
- 廃棄体コンテナ；コンクリート，炭素鋼
- コンテナ充填材；コンクリート
- 空道内充填材；コンクリート，ベントナイト（その他粘土物質），珪砂（構造物内外）
- （埋戻し材）；破碎岩（サイト地層により各種）
- 構造物；コンクリート（坑道ライニング）

このように諸外国では人工バリア材料として、コンクリート、あるいはベントナイト等粘土物質が主要であり、ほぼこの2種類を考慮しておけばよいと考えられる。

### (iii) 処分深度

T R U 廃棄物は長半減期の  $\alpha$  核種を有意に含むことから、長期間人間の生活圏

から隔離する必要がある。このため原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会においても、T R U 廃棄物は浅地中以外の埋設処分を行うべきものとしており、このことは現在原子炉施設から発生している低レベル放射性廃棄物に適用されている地表から数十m以内という処分深度は、原則として対象外であることを意味する。しかしながらT R U 廃棄物が一定以上の毒性を維持する期間、自然の事象、プロセスあるいは人間の活動によって、放射性核種が直接人間の生活圏に放出される事態を考慮する必要のない深度については、定まった値、あるいはその決定方法は諸外国においても存在しない。また、処分深度については各処分サイトの地質水文条件等によって適切な位置を決定すべきものであり、実際、表1.1-9 に示される各国の処分場、及びその候補地で考慮されている深度はサイトの特性に応じて様々である。

各国の地層処分に関する規準にも最低限必要な深度を規定している例はほとんどなく、僅かにアメリカの10 C F R 60<sup>4)</sup>に好ましい条件としての最小深度を300 mとする記述がある他は、フランスの Goguel 報告<sup>5)</sup>において侵食、地震あるいは通常の開発行為による偶発的侵入を防止するための最小深度として、約 150～200mの値を考えているのみである。

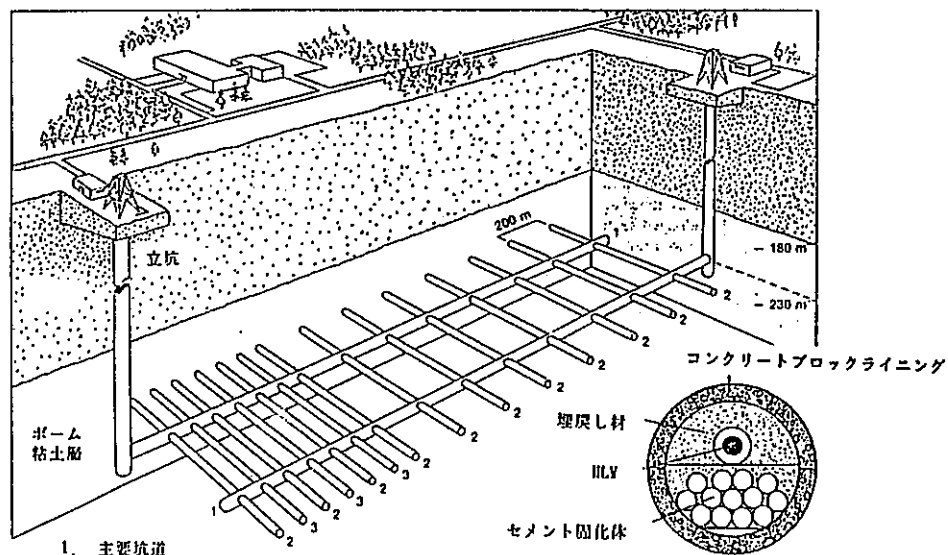
したがって本研究では、これらの研究実績、勧告を参考として、少なくとも100m以深程度の深さに処分場が設けられるものとして以下での検討を行うものとする。

表 1.1-9 海外における T R U 廃棄物処分概念

| 国 名     | 処 分 施 設 形 状                                     | 定 置 方 法                    | 処分施設深度       | 人 工 バ リ ア 構 成                                   |
|---------|-------------------------------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------------------------------|
| アメリカ合衆国 | GTCCLLW 未定                                      | 未 定                        | 300m         | パッケージ、凝灰岩埋戻し材                                   |
|         | CHTRU 坑道タイプ<br>(40㎡)                            | ドラム缶 3 段縦積                 | 660m         | パッケージ                                           |
|         | RHTRU 水平処分孔                                     | キャニスタ水平定置                  |              | 岩塩/ベントナイト、岩塩埋戻し材                                |
| スイス     | タイプB処分場 岩洞 (180 ㎡)                              | コンテナ 5 段積<br>ドラム缶 10 段横積   | 400～ 1,200m  | パッケージ、コンクリートコンテナ<br>コンクリート充填材                   |
|         | タイプC処分場 サイロタイプ<br>(80㎡)                         | ドラム缶 ランダム                  | ～ 1,200m     | パッケージ、コンクリート構造物<br>コンクリート坑道ライナ                  |
| フランス    | 岩洞タイプ<br>(200 ㎡)                                | ドラム缶 縦積                    | —            | パッケージ、コンクリート構造物                                 |
|         | サイロタイプ                                          | ドラム缶 縦積<br>ランダム            |              | コンクリート又はベントナイト充填材                               |
| ベルギー    | 坑道タイプ<br>(10㎡)                                  | ドラム缶 横積                    | 230m         | パッケージ、粘土物質等充填材<br>(コンクリート坑道ライナ)                 |
| ドイツ     | 非発熱性廃棄物 坑道タイプ<br>(40㎡)                          | 円筒容器 横積<br>コンテナ 縦積         | 1,200m       | パッケージ、石灰岩埋戻し材                                   |
|         | 発熱性廃棄物 岩洞タイプ                                    | 各種容器 縦積<br>ランダム            | 870m         | パッケージ、岩塩埋戻し材                                    |
| イギリス    | 岩洞タイプ<br>(800 ㎡)                                | コンテナ 縦積                    | 700m         | パッケージ、コンクリート充填材                                 |
| スウェーデン  | SFR-1 岩洞タイプ<br>(140～320 ㎡)<br>サイロタイプ<br>(700 ㎡) | コンテナ 縦積<br>ドラム缶<br>ドラム缶 縦積 | 60m<br>(海底下) | パッケージ、コンクリート壁<br>充填コンクリート、ベントナイト層<br>(施設により異なる) |
|         | SFL-3 岩洞タイプ<br>(380 ㎡)                          | コンテナ 縦積                    | 500m         | グラウト、コンクリート壁、<br>ベントナイト (又は砂混合) 充填材             |

注) 施設規模: ( ) 内は空洞断面積を示す

- ・坑道タイプ: 断面積数十㎡の比較的小断面の坑道に定置
- ・岩洞タイプ: 断面積150～400㎡以上の大断面坑道内の構造物中に定置
- ・サイロタイプ: 10～70mφ、50～70mHの円筒形構造物内に定置
- ・コンテナ: 廃棄体パッケージを数箇～数十箇収納し、定置する容器
- ・パッケージ: 廃棄物、固化媒体を収納、充填した容器 (廃棄体パッケージ)



1. 主要坑道
2. 処分坑道（発熱性、セメント固化体）
3. 処分坑道（ピッチューメン固化体）

軸方向定置概念（BELGIAN 概念）

図 1.1 - 1 ベルギーにおける高中レベル廃棄物処分概念

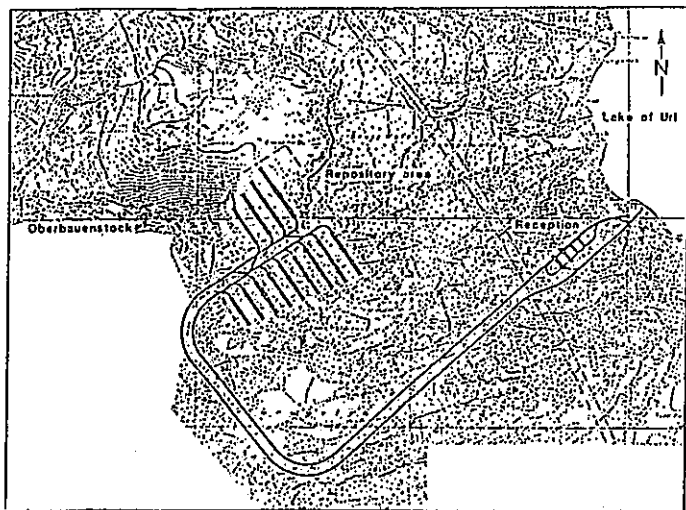


図 1.1 - 2 スイスにおける低中レベル廃棄物処分概念

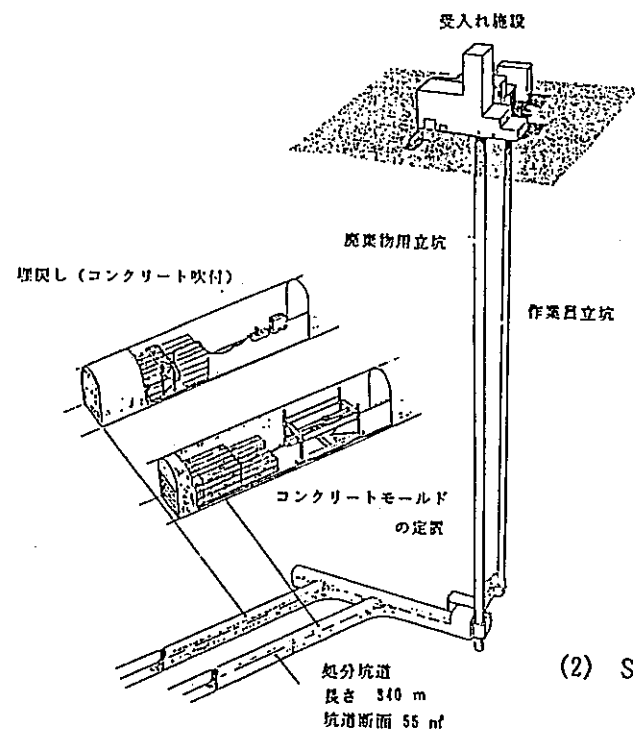
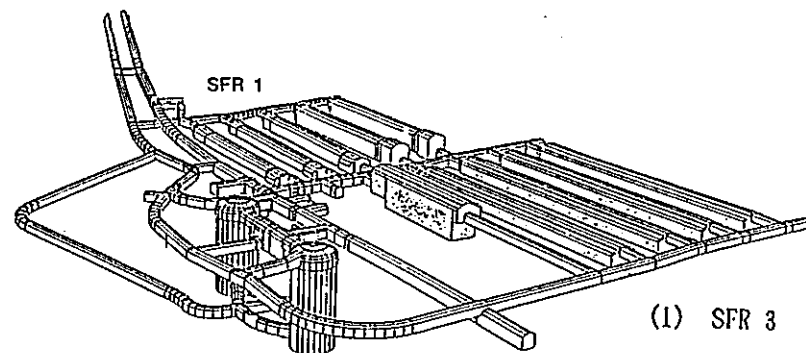
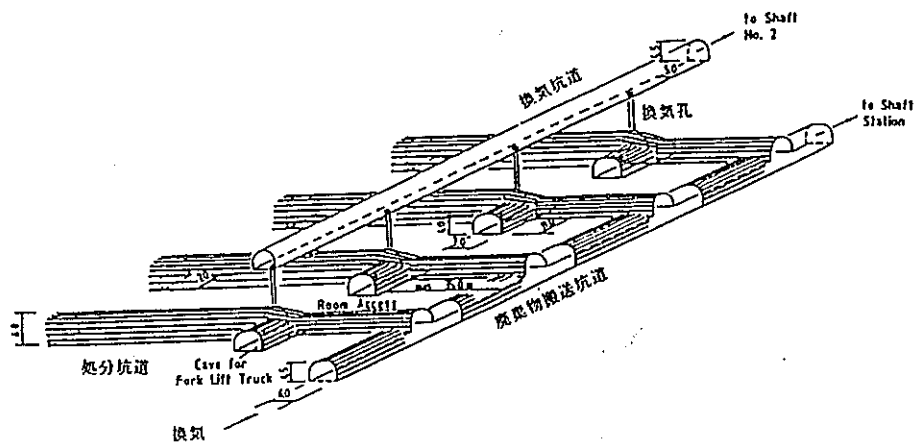
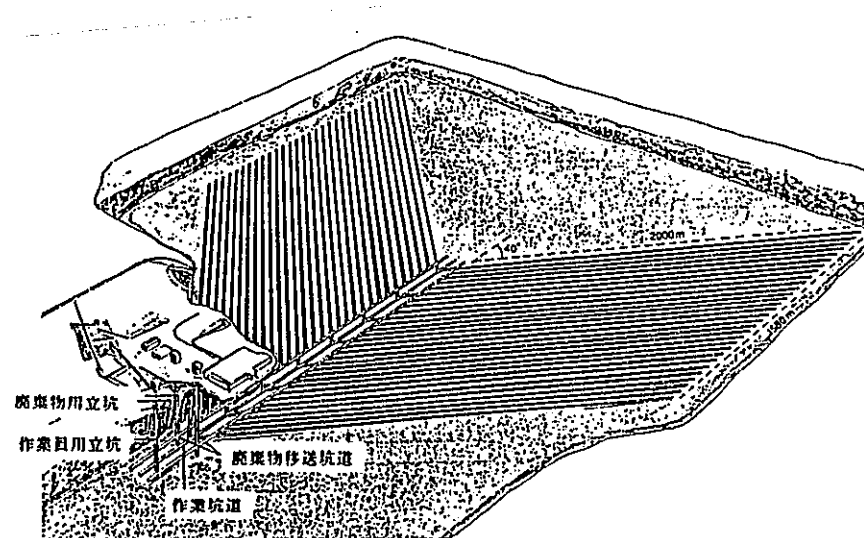


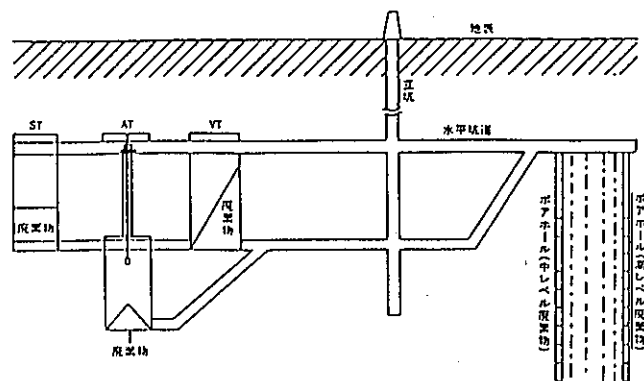
図 1.1 - 3 スウェーデンにおける低中レベル廃棄物処分概念



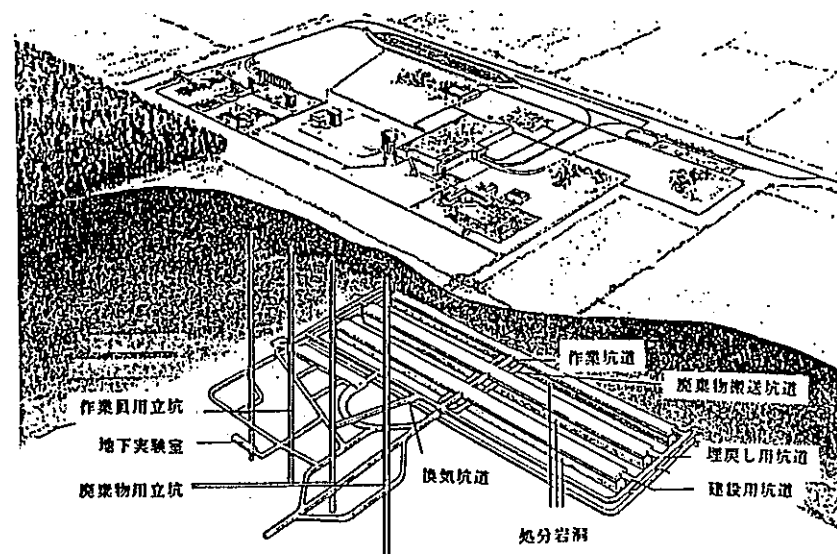
(1) コンラッド



(1) 軟岩サイト



(2) ゴアレベラー



(2) 硬岩サイト

図 1.1 - 4 ドイツにおける低中レベル廃棄物処分概念

図 1.1 - 5 イギリスにおける将来低中レベル廃棄物処分概念

## 1.2 核種移行に係わる現象の抽出

前節で調査検討を行った廃棄体特性、及び処分場概念を前提にして、既往の安全評価研究例を参考にしながら、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現象を抽出、整理する。なお現象の抽出に際しては、TRU廃棄物の処分に特有な、あるいは特に重要な現象を選択することが目的であることから、基本的に高レベル放射性廃棄物の地層処分と共通であると考えられる外部因子による影響については抽出の対象外とする。即ち、地下水を介さない放射性核種の放出に係わる「直接放出シナリオ」、及び気候変動等の天然事象による処分システム性能の変化に係わるシナリオについては検討の対象外とし、主にニアフィールドにおける物理的・化学的現象に関係するシナリオを考慮の対象とする。

### 1.2.1 最近の研究例における評価対象シナリオの調査

まず、我が国及び諸外国において近年実施されたTRU/ $\alpha$ 廃棄物等各種放射性廃棄物に対する安全評価において、評価対象とされた核種放出・移行シナリオについて調査を行うことにより、現状のTRU廃棄物の処分に関する安全性評価において考慮されている現象を把握する。

#### (1) WIPPにおける評価

WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) はアメリカ合衆国において、DOEの軍事廃棄物として1970年以降に発生したTRU廃棄物の処分場として、1974年よりサイト調査、地下実験施設、処分坑道の建設が実施されて来ている。

処分地層は地表下約 600m から 660m の厚さで広がる岩塩層であり、処分対象廃棄物は、ゴム、繊維素、各種プラスチック等の有機物を含む雑固体が主であるCHTRU (Contact Handled TRU) 廃棄物、及び同様の雑固体、濃縮廃液固化体、スラッジ固化体を含む、遠隔での取扱いを要するRHTRU (Remote Handled TRU) 廃棄物からなる。

WIPPの処分に対する安全性についてDOEは1990年に補足環境影響評価書 (SEIS) が公表され、この中で安全評価が行われている。

SEISで評価対象としたシナリオを表 1.2-1に示す。<sup>1)</sup>

表 1.2-1 W I P P に対する安全性評価シナリオ

(1/2)

| ケース名                   |                       | シナリオ内容                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE I<br>処分場健全<br>ケース | I A<br>(標準)           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分場閉鎖 2,000年後処分パネルより核種漏出開始</li> <li>①微生物によるセルロースの分解, 鉄の腐食によるガスの発生</li> <li>②ガスの蓄積による内圧の上昇</li> <li>③空隙の拡張, 地下水流入の抑制</li> <li>④ガス発生速度の低下, 地下水流入</li> <li>・核種移行経路は以下の2経路を考慮</li> <li>①処分パネル→岩塩層→処分場空洞下の破碎層<br/>(MB 139) →立坑→Rustler 層内のCulebra 白雲石ゾーン→井戸→肉牛→人間</li> <li>②処分パネル→岩塩層→Culebra 白雲石ゾーン→井戸→肉牛→人間</li> <li>・ニアフィールドにおける核種移行影響現象</li> <li>①廃棄体からのキレート剤等の浸出物による地下水組成変化による Kd の変化</li> <li>②微生物分解生成物による Kd の変化</li> <li>③鉄の腐食生成物による Kd の変化<br/>(収着サイトの増加)<br/>(コロイド形成)</li> <li>④微生物活動等による pH 変化, 核種溶解度の変化</li> <li>⑤塩水組成によるイオン強度, 炭酸錯体の Kd への影響</li> </ul> |
|                        | I B<br>(低機能人工<br>バリア) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・核種漏出開始時期は I A に同じ</li> <li>・核種移行経路は I A の①に同じ</li> <li>・核種溶解度, MB 139シール, 及び立坑底部の透水係数を I A の100 倍とした。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                        | I C<br>(破碎帯移行)        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・立坑及び坑道周辺のゆるみ領域の影響を評価するため, F S E I S* で付加されたケース</li> <li>・I B のMB 139の透水係数を10倍, 立坑底部の透水係数を I A の<math>10^4</math> 倍とした。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

\* : Final Supplement Environmental Impact Statement

|                           |                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CASE II<br>ボアホール<br>掘削ケース | II A<br>(標準)                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・原油・天然ガス探査を目的としたドリル孔が処分場を貫通し、より下層に存在する被圧帯水層まで達する。</li> <li>・コアサンプル取出し後、ドリル孔はコンクリート製プラグで密閉されるが、75年後に劣化し始め核種の漏出が加速する。最終的に密閉後150年で礫層程度の透水性まで劣化する。</li> <li>・核種移行経路は以下の経路を考慮               <ol style="list-style-type: none"> <li>①廃棄物を貫通したコアサンプルの検査による外部被曝</li> <li>②放射性核種が混入した掘削泥水→乾燥浮遊→土壌沈着→農産物・畜産物→人間（吸入含む）</li> <li>③プラグ劣化後のドリル孔→Rustler層内のCulebra白雲石ゾーン→井戸→肉牛→人間</li> </ol> </li> </ul> |
|                           | II B<br>(高溶解度<br>低溶出塩水<br>高移行速度) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄体中の塩水の流動を制限するため廃棄物を圧縮した場合を想定、処分パネルの透水係数をII Aの<math>10^{-5}</math>倍</li> <li>・核種溶解度をII Aの10倍、劣化後のドリル孔の透水係数をII Aの10倍</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                           | II C<br>高溶解度<br>高移行速度            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・核種溶解度をII Aの10倍、劣化後のドリル孔の透水係数をII Aの10倍</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                           | II D<br>(極低溶出<br>塩水<br>高移行速度)    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・人工バリアの強化により、Salado層からの流入量を1/13に低減させた場合を想定</li> <li>・処分パネルの透水係数をII Aの<math>10^{-5}</math>倍</li> <li>・劣化後のドリル孔の透水係数をII Aの10倍</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                    |

表 1.2-1に示すように case I が通常時の核種放出に係わるシナリオであり、case II が直接放出に係わるシナリオである。case I Aに示すように WIPP では、特に金属の腐食、有機物の微生物分解によるガスの発生とそれによる核種放出への影響、及び地下水組成、地球化学的条件の変化による収着特性、核種溶解度の変化について検討している。

#### (i) ガスの発生・蓄積・移行

ガスの発生については S E I S 発行以前の段階においても、S N L（サンディア国立研究所）等において炭素鋼の腐食及びセルロースの微生物分解によるガス発生機構について検討が行われており、実験室規模での試験、文献調査よりガス発生量・発生速度を設定しているが、定量的なモデル化は行われていない。また、ガスの蓄積、移行に関しては、亀裂中の移行、拡散、地下水中への溶解が生じ得るとしながらも、これらに関するデータが無いことから、処分場中でのガスの蓄積は処分エリアのクリープによる間隙率の増加により、ガスの発生が終了する2,000年後まで地圧に等しい圧（14.8MPa：岩塩の密度を3t/m<sup>3</sup>、深度500mに相等）を維持して蓄積されとの定性的な検討を行って評価条件を設定している。<sup>2)</sup>

1989年以降、S N L（サンディア国立研究所）を中心に以下の項目について研究開発が継続されている。

- ・鉄の腐食、セルロースの微生物分解によるガス発生試験、モデル化
- ・二相流によるガス蓄積・移行の予備評価
- ・ガス発生モデルと二相流移行モデルとの連成

なお、S N Lにおけるガスの蓄積・移行評価に係わる研究例は、2章において一部内容を解説する。

#### (ii) 収着特性、核種溶解度

S E I S 発行の基礎となった研究では、塩水の流入による地下水化学組成の変化を P H R Q P I T Z コードにより評価している他、粘土物質上への収着特性変化を評価するため、鉄のオキシ水酸化物への収着に対するアルカリ度、pH、共存カチオン濃度、キレート剤濃度による影響について試験を実施している。これを基に分配係数の設定を行っているが、地下水組成の不確実性、及び分配係数実測値、熱力学データの不足のため、精度の高い予測は不可能であるとしている。<sup>2)</sup>

また、アクチニド核種の溶解度についても、影響因子である E h、pH の時間的・空間的变化、炭酸イオンによる錯化、有機錯化剤の作用が不明であり、特に W I P P のような岩塩層処分では、高い塩濃度における熱力学的データ（固相の溶解度積、各種錯体の安定度定数等）がなく、溶解度の予測には数値の不確実性が含まれるとしている。E h の変化要因としては微生物活動、鉄の腐食、放射線分解によるもの

も考慮すべきであるが機構が明確でなく、pHの変化要因としては微生物活動によるCO<sub>2</sub>の発生、廃棄物中のセメントの影響をあげている。

核種の化学形については、Am, Np, Pu, U, Thに対して、3, 4, 6価ではヒドロキシ錯体として、5価では塩化物錯体として存在するものと考えられ、この有機配位子による影響はその低濃度とMg<sup>2+</sup>が錯化の核としてアクチニドと競争するため重要でないと予測しているが、試験による確認が必要であるとも述べている。

### (iii) 微生物活動

微生物活動としては、処分環境中での微生物の存在は否定されるものでなく、特にセルロースの分解により以下の影響が生じるものとして確認が進められている。

- ・ガス及び水の生成
- ・Eh及びpHの変化
- ・錯体形成による溶解度の増加
- ・処分場温度の上昇

微生物活動については、1979年以来模擬廃棄物による試験、実廃棄物ドラム内のガス分析等が実施されており、セルロースの分解によるCO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>と水の生成、硫酸塩還元菌によるH<sub>2</sub>の消費等について試験が行われており、代謝物の蓄積、ガス圧の上昇による微生物活動の低下、放射線分解によるその他の有機物の有用基質への変化等が示唆されている。しかしながら存在微生物の種類、量、廃棄体構成物質、埋戻し材の含有物、地下水組成等について不明である部分が多いため、保守側に想定して評価をせざるを得ない状況である。

これらの検討結果を踏まえて、WIPPでは実廃棄物（CHTRU）による5年間の原位置実証試験を実施する計画である。試験はビンスケール試験とアルコブ試験の2段階からなっており、ビンスケール試験は200ℓドラム缶6本までの廃棄物を収納可能な金属容器中に実廃棄物及び埋戻し材、金属塩水等を充填し、密封後処分空洞中に設置される。なお、この試験では主に以下の目的で試験が行われる。<sup>1)</sup>

・ガス発生量・組成、ガス発生・消費速度について廃棄物種類、時間、地下水及び他の人工バリアとの相互作用の関係を含ま定量化する。

- ・実験室規模での評価を実廃棄物・処分条件に拡張する。
- ・微生物活動，廃棄物の圧縮，地下水による飽和，劣化生成物による相乗効果を評価する。
- ・ガス吸着（消費）材，廃棄体形態等によるガス発生量低減効果の評価
- ・浸出液，気体中の核種，毒性物質の測定

一方，アルコブ試験は約 4 m（H）×7.6 m（W）×30.5m（L）の 6 本の空洞内に，実廃棄物の入った 200 ℓ ドラム缶を 350 ～1,050 本定置し，その内，4 空洞については雰囲気制御することにより以下を目的とした処分を行う予定である。

- ・運転時の条件におけるガス発生量・組成，ガス発生・消費速度を代表的廃棄物から定める。
- ・閉鎖後の条件におけるガス発生量・組成，ガス発生速度・消費速度を埋戻し材料，ガス吸収（消費）材，流入する地下水量との関係より求める。
- ・気体中の揮発性物質，毒性物質の測定
- ・実験室規模及びピンスケールでの試験結果の外挿値をアルコブ試験の結果に関連付ける。

なお，1990年に EPA が原位置試験のための実廃棄物の搬入を許可したものの，実証試験を含む WIPP の運開に必要な WIPP サイトの土地収用（内務省からの所有権の移管）に対して，連邦議会がこれを認めていないこと等から，1991年内には試験は開始されていない。

## (2) SKI / SKB による検討

スウェーデンでは放射性廃棄物処分の実施主体であるスウェーデン核燃料廃棄物管理会社（SKB）と，放射線安全に係わる監督官庁である原子力検査局（SKI）が，高レベル放射性廃棄物の処分に対する安全評価のシナリオ解析について1988年より共同で検討を実施している。このシナリオ解析研究において採用された手法は，アメリカのサンディア国立研究所の提案した方法を基にしたものであるが，ここでは評価すべき対象として抽出された特質，事象，プロセス FEP's を示す。

“PROCESS SYSTEM”として約50種類抽出された FEP's を表1.2-2 にまとめた。ここで“PROCESS SYSTEM”とは，「処分場内でのバリア機能及び放射性核種の挙動を記述するために必要な総ての現象（FEP's）の組合せであり，一組の外部事

象により少なくとも幾分か決定論的に予測できるもの」と定義されている。

S K I / S K B は1989年末にこれらの検討経過を報告しているが、<sup>3)</sup> 各 F E P ` s を組合わせシナリオを設定するまでには至っていない。その理由として絶対的な検討時間の不足のほか以下の項目を挙げており、今後はこれらの点をより明確にした上でシナリオの策定を行っていく必要があるとしている。

- ・選択された F E P ` s の記述が一般的に過ぎる
- ・シナリオ解析手法自体の不確定性

また、摘出された F E P ` s 自体の内容に対する検討についても検討期間の不足を理由に、プロセスの記述、原因とその効果に対する考察が不十分であり、完全なものではないとしている。したがって同プロジェクトの位置付けは、シナリオ解析の第1段階であり、今後数回繰返される検討が完成度を高める上で必要であり、特に氷河作用、断層、密封されない処分孔・立坑等に係る F E P ` s はある程度の影響評価の後、シナリオ構築の検討が可能になると結論している。

表1.2-2 に示すように S K I / S K B によって摘出された現象は、分類された各現象の詳細度に相違が大きく、評価すべき現象の全体像を把握する上では有効であるが、現象間の相互影響等について検討、整理を行う場合には、多くがより詳細な現象の分割、記述を行う必要がある。

表1.2-2 安全評価において考慮すべき現象

|       |                              |                      |     |                                      |
|-------|------------------------------|----------------------|-----|--------------------------------------|
| 評価例   | SKI / SKB シナリオ解析             |                      |     |                                      |
| 対象廃棄物 | 使用済燃料                        |                      |     |                                      |
| 処分概念  | 地層処分（花崗岩、深度； 500m）           |                      |     |                                      |
| 想定バリア | 使用済燃料                        | （UO <sub>2</sub> 焼結） |     |                                      |
|       | キャニスタ                        | （銅）                  | 1.3 | ・ガス発生 → 地下水流の局部的変化<br>→ ガスの移行        |
|       | 緩衝材                          | （粘土物質）               | 1.5 | ・I、Csの燃料表面への移行<br>→ I、Cs放出速度の変化      |
|       | 埋戻し材                         | （粘土、砂）               | 2.  | ・燃料マトリクス中での溶解度<br>→ 核種放出速度の変化        |
|       | ニアフィールド地層                    | （花崗岩）                | 2.1 | ・再結晶 → 核種溶解度<br>→ セメント劣化             |
|       | ファーフィールド地層                   | （花崗岩）                |     | ・燃料マトリクスの溶解<br>→ 核種放出速度の変化           |
| 事象    |                              |                      |     | ・破損、標準外燃料<br>→ 核種放出速度の変化             |
|       |                              |                      |     | ・破損キャニスタからの核種放出<br>→ 核種放出速度、時期       |
| 1.    |                              |                      |     | ・キャニスタの腐食<br>→ 核種放出速度、時期             |
| 1.1   | ・崩壊熱 → 地下水の対流発生<br>→ 地下水化学   |                      |     | ・廃棄物によるキャニスタの腐食<br>→ 核種放出速度、時期       |
|       | ・α崩壊の反跳 → 娘核種の溶解度            |                      |     | ・キャニスタ内外での流路の形成<br>→ 核種放出速度、時期       |
|       | ・Heガス発生 → キャニスタ内の昇圧          |                      |     | ・塩素の存在による腐食<br>→ 核種放出速度、時期           |
| 1.2   | ・放射線分解 → キャニスタの腐食<br>→ 地下水化学 |                      |     | ・Pb / Cu の電気化学反応<br>→ キャニスタ腐食速度      |
|       | ・Pb-I 反応 → ヨウ素放出量            |                      |     | ・地電流による電気化学反応<br>→ キャニスタ腐食速度         |
|       |                              |                      |     | ・孔食 → 核種放出速度、時期                      |
|       |                              |                      |     | ・硫酸塩、酸素等腐食性物質の存在<br>→ キャニスタ腐食速度      |
|       |                              |                      |     | ・埋戻し材、緩衝材のキャニスタ腐食への影響<br>→ 核種放出速度、時期 |

|                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>2.2</p> <p>2.3</p> <p>3.</p> <p>3.1</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・微生物活動 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ ガス発生</li> <li>→ 腐食性物質の生成</li> <li>→ 錯体形成、コロイド形成</li> <li>→ 核種収着</li> </ul> </li> <li>・銅のクリープ → キャニスタの破損</li> <li>・熱による亀裂の発生 → キャニスタの破損</li> <li>・キャニスタ内圧の上昇 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ キャニスタの破損</li> </ul> </li> <li>・化学反応による緩衝材の劣化 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 膨潤性の低下</li> <li>→ 透水係数の増加</li> </ul> </li> <li>・収着サイトの飽和 → 核種移行速度の変化</li> <li>・ベントナイトによる地下水成分への影響 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ キャニスタの腐食速度</li> </ul> </li> <li>・ベントナイト成分によるコロイド生成 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 収着特性への影響</li> </ul> </li> <li>・ベントナイトの凝析 → 緩衝作用への影響</li> <li>・ベントナイトの沈降 → 亀裂の閉塞</li> <li>・セメント間隙水との反応 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 緩衝材の劣化</li> </ul> </li> <li>・腐食生成物との相互作用 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 緩衝材の劣化</li> </ul> </li> <li>・レドックスフロント <ul style="list-style-type: none"> <li>→ キャニスタの腐食速度</li> <li>→ 核種溶解度</li> </ul> </li> <li>・放射線によるベントナイトへの影響 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 透水係数の増加</li> </ul> </li> </ul> | <p>3.2</p> <p>4.</p> <p>4.1</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ベントナイトの膨潤 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 透水係数の増加</li> </ul> </li> <li>・緩衝材、埋戻し材の浸食 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 透水係数の増加</li> <li>→ 膨潤圧の低下</li> <li>→ コロイドの生成</li> </ul> </li> <li>・緩衝材の熱による影響 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 透水係数の増加</li> <li>→ 膨潤圧の低下</li> <li>→ レオロジへの影響</li> </ul> </li> <li>・表面拡散 → 拡散移行速度の変化</li> <li>・腐食生成成分の膨脹 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 構造物の亀裂発生</li> </ul> </li> <li>・リレー効果 → オンサガー効果、電気泳動<br/>(液材中の熱拡散)</li> <li>・酸化雰囲気気の形成 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 核種溶解度</li> <li>→ キャニスタの腐食速度</li> </ul> </li> <li>・pHの変動 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 核種溶解度の変化</li> <li>→ 核種収着性の変化</li> <li>→ 化学形の変化</li> <li>→ コロイド形成</li> <li>→ 表層地層の風化</li> </ul> </li> <li>・収着特性 → 遅延効果への影響</li> <li>・マトリクス拡散 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 遅延効果への影響</li> </ul> </li> <li>・再濃縮 → 核種放出率の変化</li> <li>・熱化学的变化 <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 緩衝材の劣化</li> <li>→ コロイド形成</li> </ul> </li> </ul> |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |           |                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>4.2</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・近傍岩体の地下水化学の変化               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ コンクリートの粘土化</li> </ul> </li> <li>・錯化剤 (フミン等)               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 溶解度の変化 (3 価)</li> <li>→ 収着性の変化 (3 価)</li> </ul> </li> <li>・掘削／埋戻しによる影響               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 透水性の変化</li> </ul> </li> <li>・酸化剤、核種の卓越した流路の形成               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 収着／マトリクス拡散面積の減少</li> </ul> </li> <li>・熱による対流の形成               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 上方への流れの形成</li> </ul> </li> <li>・地下水流の変化</li> <li>・地下水涵養の地球規模での変化</li> <li>・熱、流れ、応力の効果</li> <li>・亀裂の増加               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 地下水流速増加</li> <li>→ 収着／マトリクス拡散面積の変化</li> </ul> </li> <li>・岩体のクリープ               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 地下水流の変化</li> <li>→ 処分施設の破壊</li> </ul> </li> <li>・塩水の流入</li> <li>・再飽和</li> <li>・地表／推積層の浸食               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 地下水流の変化</li> </ul> </li> <li>・溶解度、析出</li> <li>・コロイド生成・移行               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 核種移行速度の変化</li> </ul> </li> <li>・ガスの移行               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 地下水流速の変化</li> </ul> </li> <li>・ファーフィールド水化学 (酸、酸化剤、硝酸塩)               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 酸化雰囲気形成</li> <li>→ pH 変動</li> <li>→ 錯化剤の生成</li> </ul> </li> </ul> | <p>7.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・分散</li> <li>・希釈</li> <li>・地下水流路の風化               <ul style="list-style-type: none"> <li>→ 収着核種の放出</li> </ul> </li> <li>・未知の不連続</li> <li>・地熱による地下水流</li> <li>・同位体希釈</li> <li>・記録の喪失</li> </ul> |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### (3) N R Cによる検討

アメリカ合衆国において放射性廃棄物の処分に係る許認可機関である原子力規制委員会（N R C）は、高レベル放射性廃棄物処分場の性能評価上の規準を示した2種の規則に基づいた審査を実施するため、サンディア国立研究所（S N L）に委託してシナリオ解析、性能評価手法の検討を行い、バリア性能に影響を及ぼす現象とそれに係わるパラメータを抽出している。高レベル放射性廃棄物の処分場性能を規制する連邦規則は、環境保護庁（E P A）の所管する40 C F R 191<sup>4)</sup>及びN R Cの所管する10 C F R 60<sup>5)</sup>であり、各々3種類の定量的性能規準を示している。

#### ① 閉込め機能

- ・ 処分後 10,000 年間にわたり処分システムに影響を及ぼし得る総てのプロセス、事象についての確率の制限。
- ・ 同規則付表 1 に記載の量で核種放出が生じる確率が1/10、同表の10倍を超える放出が生じる確率が1/1,000 を超えないこと。

#### ② 40 C F R 191・15；個人の防護

- ・ 処分場閉鎖後最初の1,000 年間にわたり、年間個人線量当量率を全身について 25 mrem，どの臓器についても 75 mrem/y を超えない。
- ・ この時の線量は管理区域外の重要な地下水源の水を 2 ℓ/day 飲用した場合により評価。
- ・ 重要な地下水源とは、溶解固形分10,000mg/ℓ以下、地表から 762m以浅、透水係数が $9.4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  より大きい地下水源にある、 $2.9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  の透過率を有し、 $4.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  の水量を過去1年で記録しているもの。

#### ③ 40 C F R 191, 16；地下水の防護

- ・ 処分場閉鎖後の最初の1,000 年間にわたり、特定の条件を備えたクラス I 地下水に対し放射性核種の放出を下記の値以下とする。
- ・ R a - 226，228 ； $5 \mu \text{ Ci}/\ell$   
 $\alpha$ 核種（R nを除く）； $15 \mu \text{ Ci}/\ell$   
 $\beta \gamma$ 核種；全身各臓器：4 mrem（2 ℓ/day の飲用）

④ 10 C F R 60・113 ; 廃棄体容器の寿命

- ・処分場の永久閉鎖後300 年以上1,000 年以下の期間, 実質的に閉込めが完全であること。

⑤ 10 C F R 60・113 ; 人工バリアからの放出率

- ・処分場の永久閉鎖後の容器による閉込め期間経過後, 人工バリアからの核種放出率は, 閉鎖後1,000 年時点でのインベントリの $10^{-5}$ /年を超えない。

⑥ 10 C F R 60・113 ; 地下水移行期間

- ・地層処分場は廃棄体定置前の時点で, ゆるみ域から接近可能な環境中への最も早い移行経路に沿った移行時間が少くとも1,000 年, またはN R Cが特定した期間であること。

これらの規制のうち, 40 C F R 191 に関しては高レベル放射性廃棄物, 使用済燃料, T R U廃棄物を同一規準で規制するものであるところから, T R U廃棄物もH L Wと同一の規準が適用されるため, T R U廃棄物の安全性に係る評価対象を検討する上でも参考になるものと考えられる。

S N Lでは処分システムの特性に影響するプロセスを, 熱的, 化学的, 機械的, 水文学的, 移行の5種類に分けて各々に関与するパラメータの抽出を行っており, これら5種類のプロセスの相互影響を図 1.2-1に示す関係にあるものとしている。<sup>6)</sup> 図 1.2-2~6に各プロセスに係るパラメータを整理した。さらに, 図 1.2-7には規制対象となる性能に影響する事象, プロセスの関係を整理した図を示す。

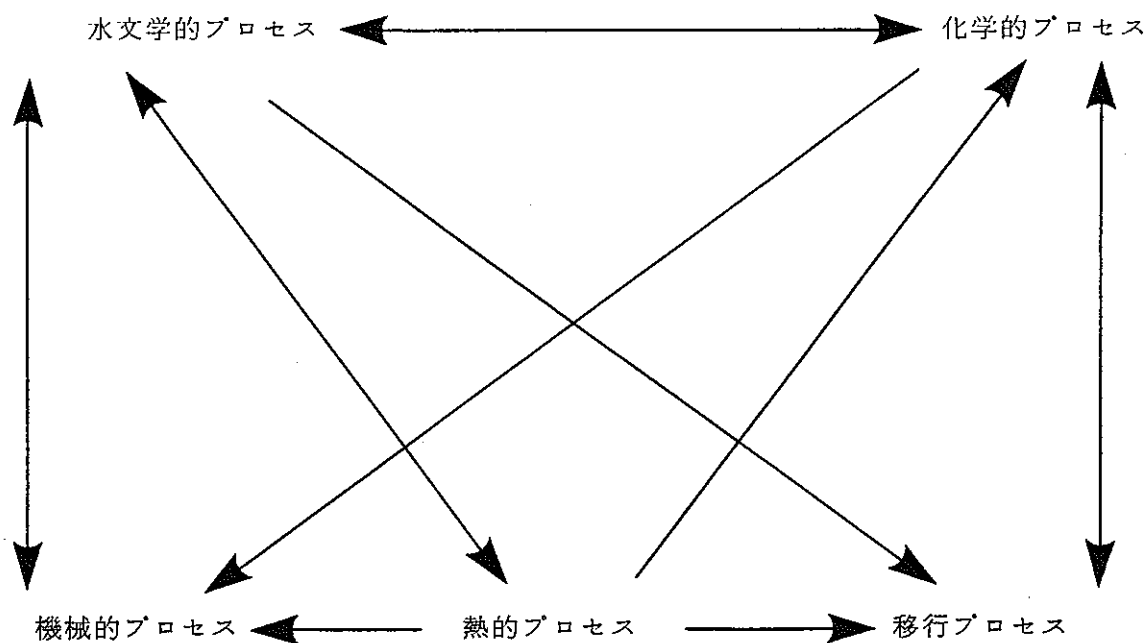


図 1.2-1 処分場において考慮すべきプロセスとその相互関係

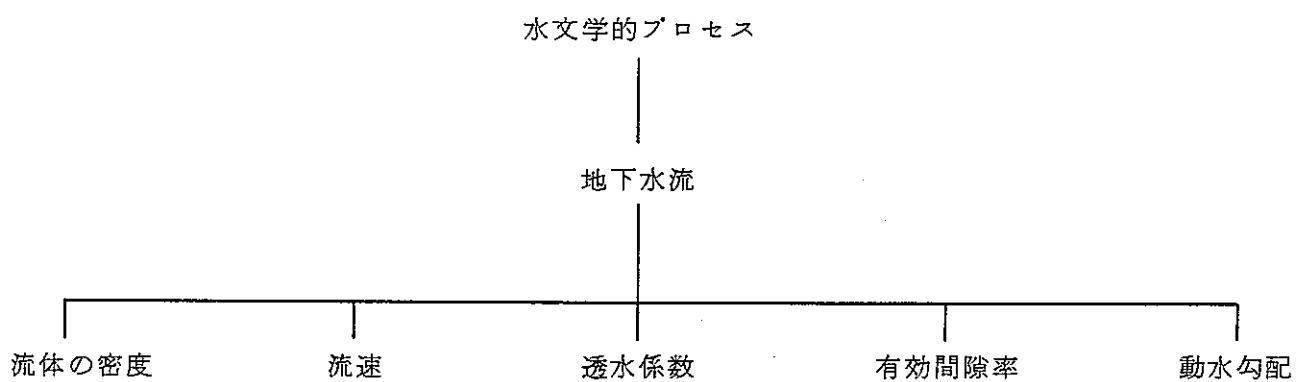


図 1.2-2 水文学的过程とそのパラメータ

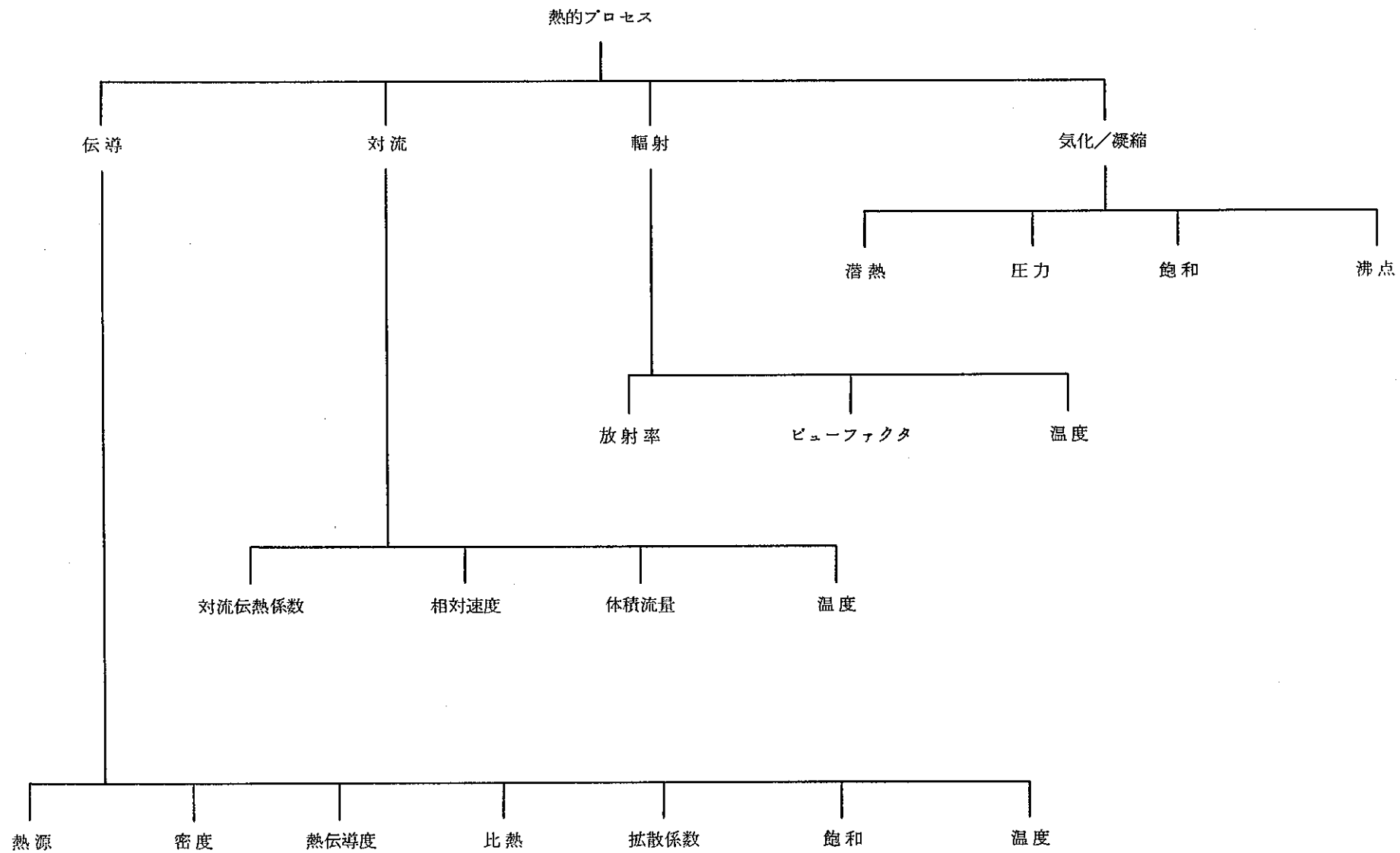


図 1.2 - 3 熱的プロセスとそのパラメータ

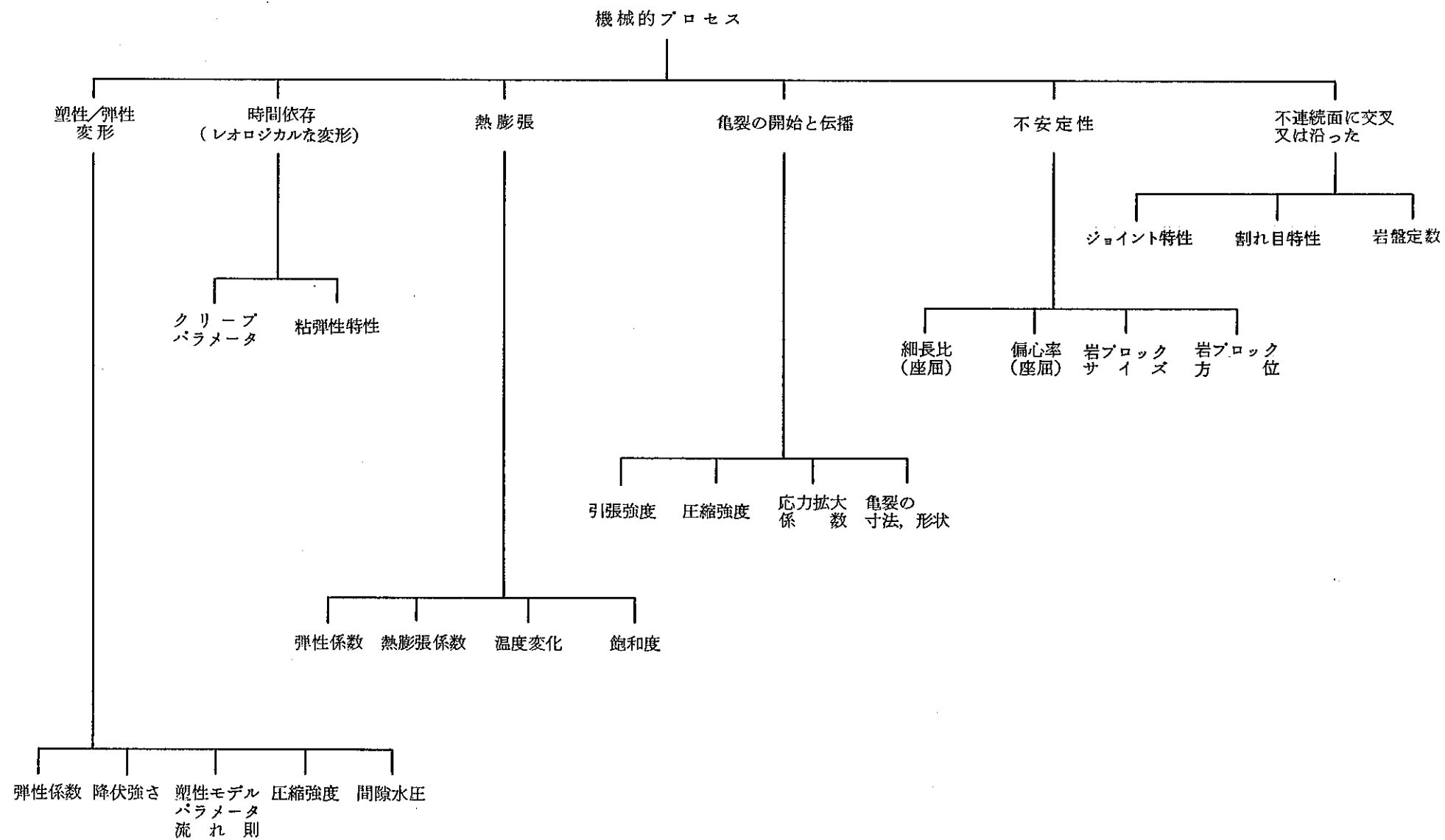


図 1.2 - 4 機械的プロセスとそのパラメータ

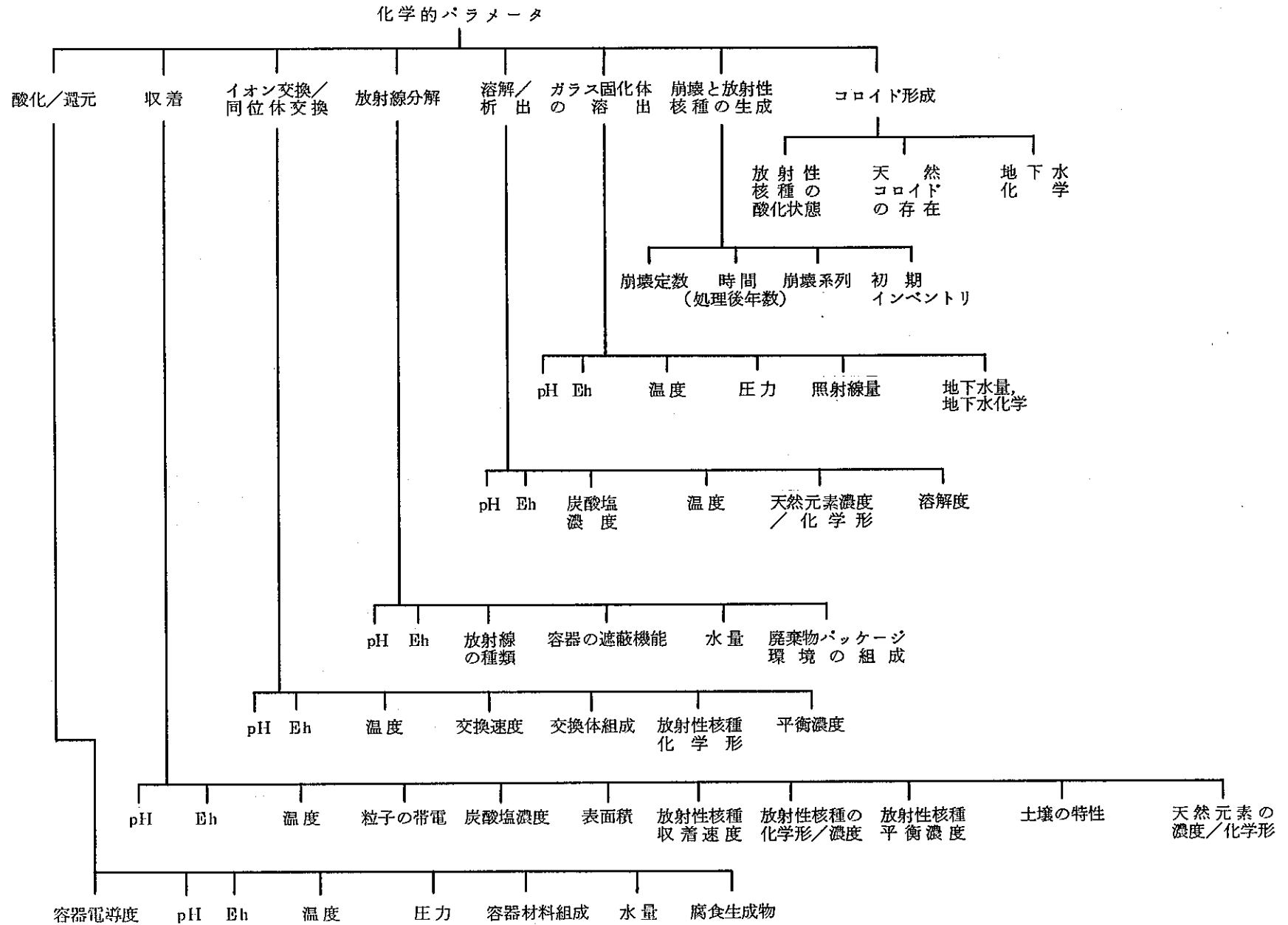


図 1.2-5 化学的プロセスとそのパラメータ

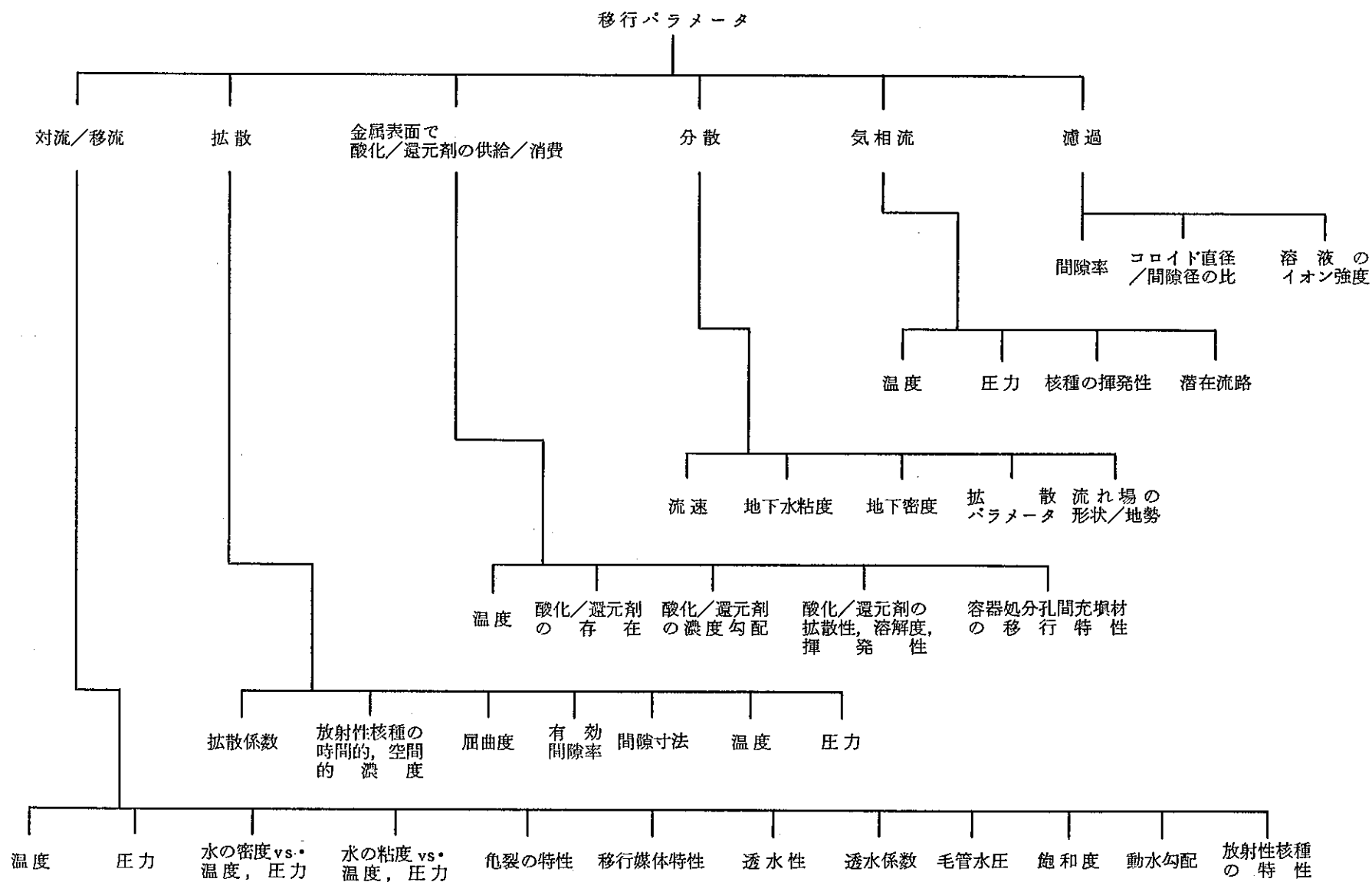


図 1.2 - 6 移行プロセスとそのパラメータ

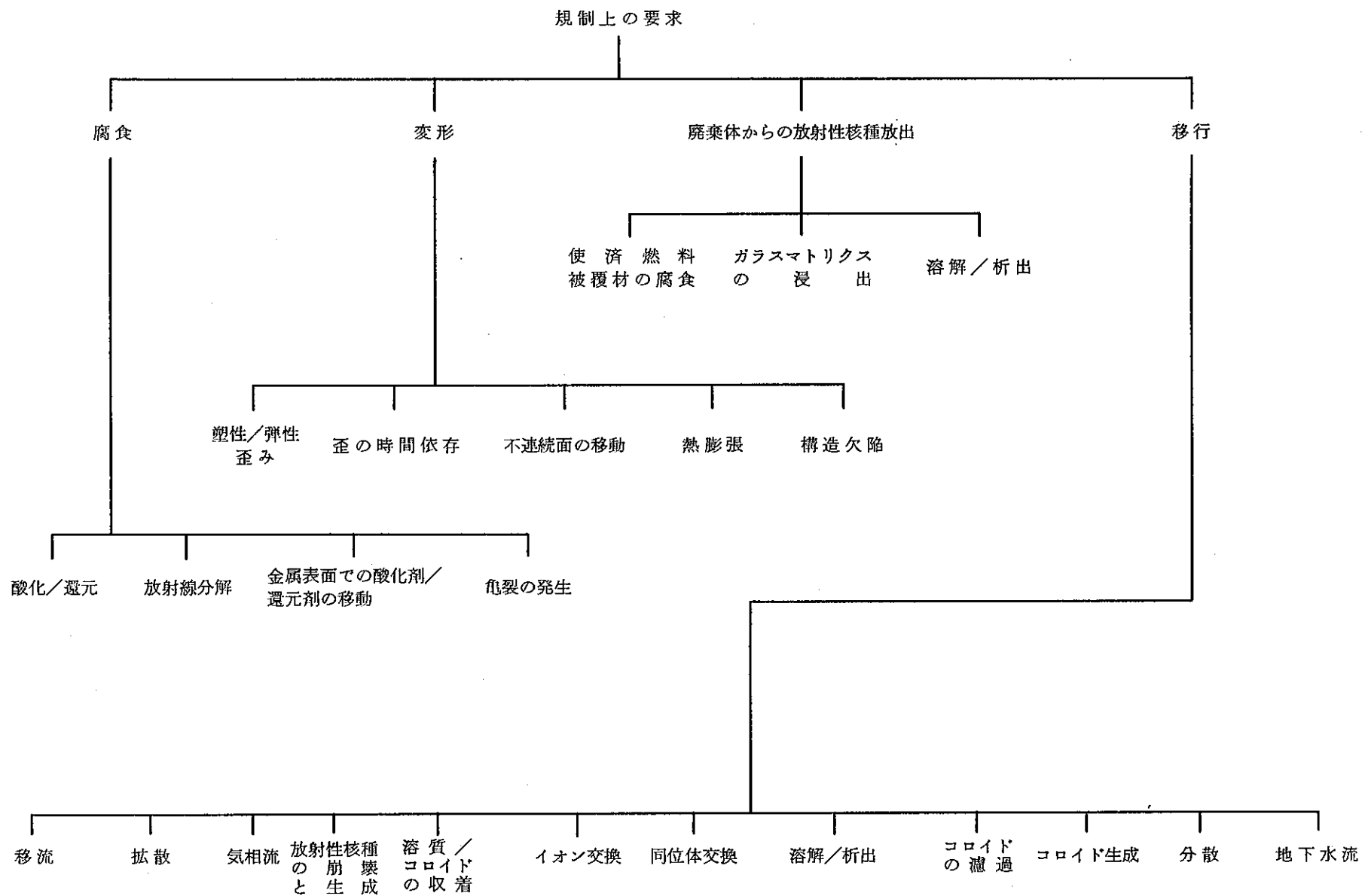


図 1.2-7 容器寿命，人工バリアからの放出率，核種閉込め，個人の防護，地下水の防護に関する現象とプロセス

### 1.2.2 現象の抽出

ここでは高レベル放射性廃棄物等の地層処分に対して考慮されている既往のシナリオを基本として、評価が必要とされる現象の抽出を行い、これに我が国で想定されるTRU廃棄物の諸特性、処分概念によって生じ得る現象を反映すると共に各現象間相互の関係を検討して配列させる。

#### (1) シナリオ解析手順と既往のシナリオ

シナリオ解析手順については考慮すべき現象の範囲が多岐、多分野にわたる他に、評価対象として考慮せねばならない期間が非常に長期に及ぶため、現在までに幾つかの方法が提案され試行されているが、唯一確立された手法というものは今のところ存在しない。

近年OECD/NEAでは、放射性廃棄物の処分に係わる安全評価及びシナリオ解析手順について検討を進めており、それによれば基本的シナリオ解析手順は図1.2-8に従うものとしている。また、それぞれの段階の内容は以下のように説明されている。<sup>7, 8)</sup>

##### 。 現象の明確化

最初のステップは、事象、特性、プロセスの包括的なリストの明確化である。IAEAによりまとめられたリストは、出発点として有効である。この段階ではリストが完全であることが重要なので、処分場の安全性に影響を及ぼす想像されるすべての現象を含むように考慮される必要がある。相互作用を看過しないように、また、現象を排除する理由を文書化しておくために、包括的であることが、第一義として求められる。実際の作業は幅広い専門家の参加と、作業方法の定式化によってなされる必要がある。

##### 。 現象の分類

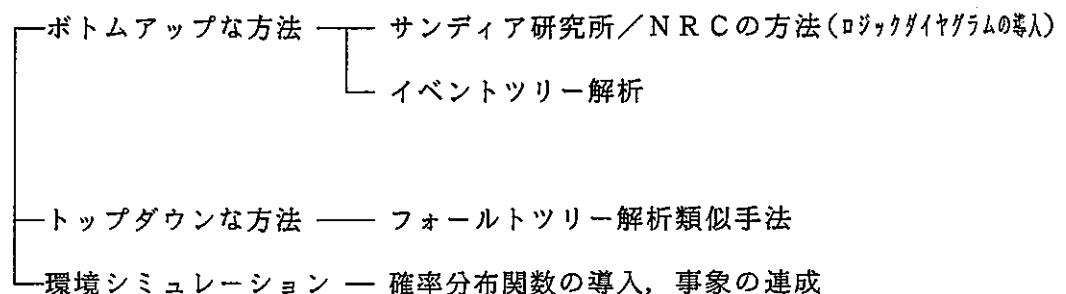
種々の見出しによる現象の分類は、作業を簡略化する点で効果的である。そのため、分類のステップは明確化のステップと緊密な関係にある。できる限り完全なリストが整えられていることを示すことは重要であり、一連の見出しによる分類はシナリオ作成や性能評価を構成するフレームを準備する。

##### 。 現象の選別

現象の明確化、分類のステップを経ることにより、膨大な事象、特性、プロセ

スが抽出されるが、明確に定義され、正当と認められる基準を用いて、重要でない事象をふるい落とすことが必要となる。この段階では、影響解析を原則的には含まないが、選別のための見通しをつけるため簡単な計算を必要とする場合もある。また、現象は一つ一つ個別に考察されるが、それらの間に考えうる相関関係は常に念頭に置いておくことが必要である。

また、“4. シナリオの構築”～“6. シナリオの詳細な設定”については、上述のように幾つかの手法が提案され、検討が進められているところである。代表的手順としては以下のものがある。



現在、我が国においては動燃事業団が高レベル放射性廃棄物についてシナリオ解析を実施しており、56種のFEP'sを摘出し、これらを分類、整理すると共に各事象間因果関係の可逆性、不可逆性、フィードバック性について整理することにより、インフルエンスダイアグラムを作成している。これを図 1.2-9に示す。

## (2) TRU廃棄物の処分に対する評価シナリオ

前項で述べた各種放射性廃棄物に対して考慮されている核種移行・被曝シナリオ、及びシナリオ解析過程において摘出されているFEP'sを参考とし、さらに1.1において調査を行った我が国において発生するTRU廃棄物等の諸特性、考慮すべき処分概念を基礎として、我が国におけるTRU廃棄物（及び長寿命 $\beta/\gamma$ 廃棄物）の処分に対する安全評価において考慮する必要のある現象を摘出した。

なお、ここでは廃棄体特性が放射性核種の移行に対して、より直接的な影響を及ぼすニアフィールドにおける現象についてのみ摘出するものとし、先述のようにニアフィールドにおける現象、及び直接放出シナリオについては対象外としている。

さらに、これらのFEP'sについて対応するバリアの種類ごとに分類すると共

に、現象の生起の時系列に対する前後関係、相互の影響等について整理することにより、整理表を表 1.2-3に示すように作成した。この整理表に基づき T R U 廃棄物（及び長寿命  $\beta / \gamma$  廃棄物）の処分において性能評価上考慮すべき現象を図式化したものが図1.2-10に示すインフルエンスダイアグラムである。

以上に示した工程は図 1.2-8で示すフローにおける“1. 重要な現象の明確化”から“4. シナリオの構築”に相当する。しかしながら、限定的な範囲、即ちニアフィールドにおける地下水移行経路上の現象を考慮の対象とし、且つ現象の理解が不十分なものについてはその相互関係が明確とならないケースもあることから、今回のシナリオ策定は予備的な検討と位置付けられるべき性質のものである。今後はさらに現象の機構に対する R & D 成果を反映し、現象間の関係を繰返し見直すと共に、現象の解析、評価を進め、合理的基準に従って現象、及びシナリオの選別を行う必要がある。

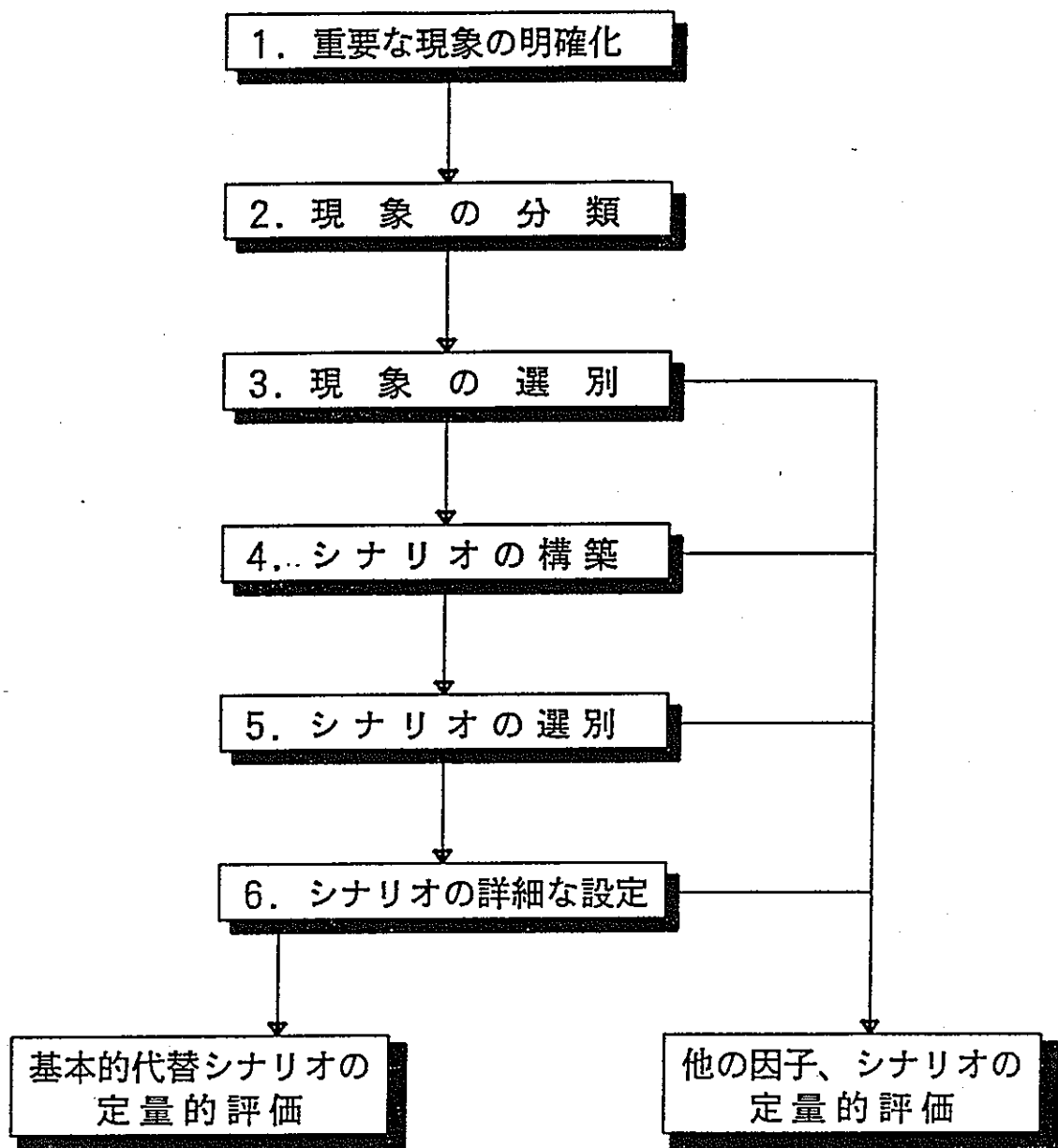


図 1.2 - 8 シナリオ解析手順 (OECD/NEA)<sup>7)</sup>

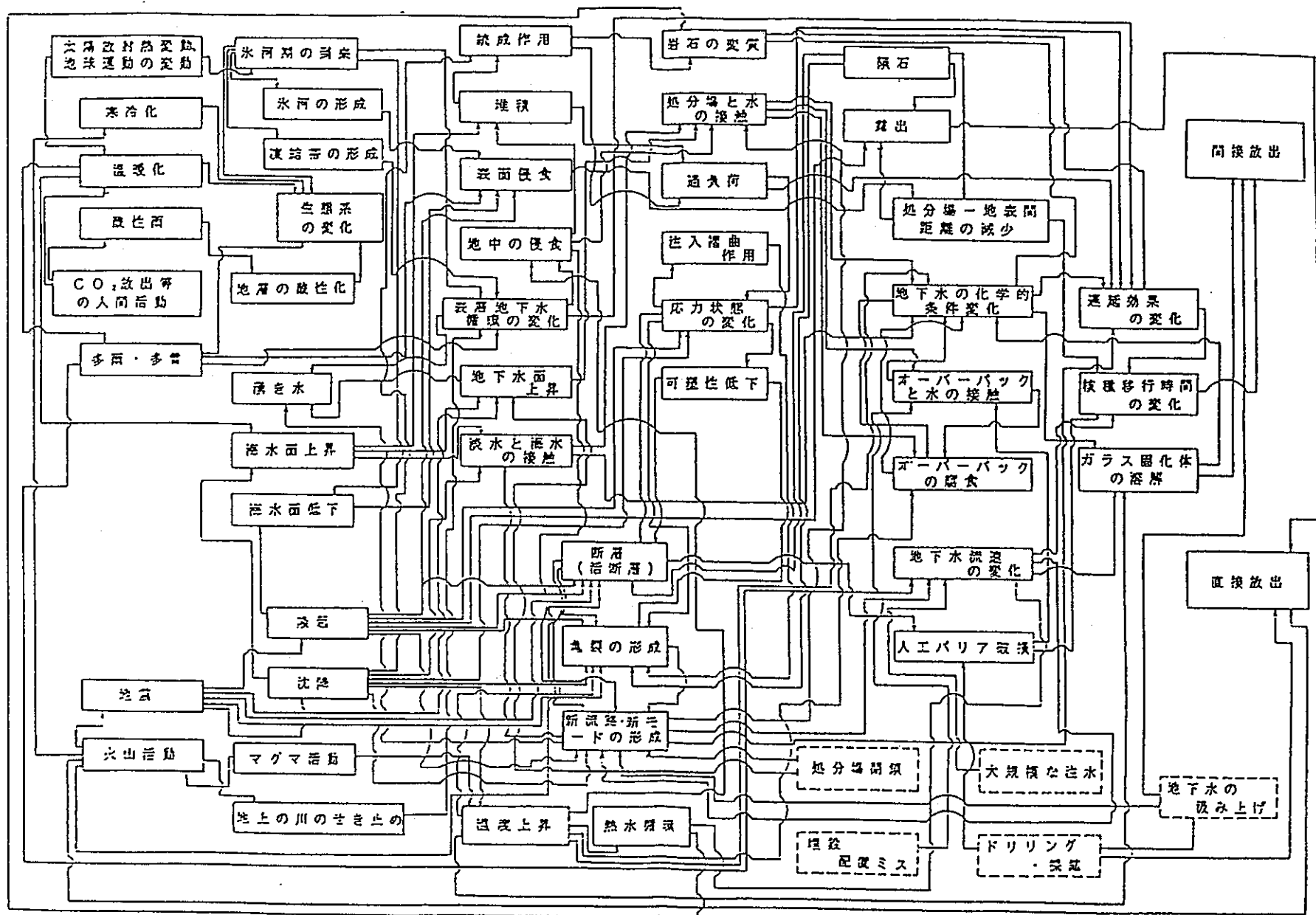


図 1.2 - 9 性能評価上考慮すべき事象の相関図作成例<sup>9)</sup>

表 1.2-3 固有現象と相互関係 (1次プロセス-1)

| 原因事象、プロセス            | 現象                                                                                                      | 現象に含まれる F E P ' s                                                                                                                                                                                                                                 | 影響事象、プロセス                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.<br>・処分場構造物と水との接触  | 1.1<br>・ $\text{Ca}^{2+}$ の溶出<br><br>1.2<br>・ 金属の腐食<br><br>1.3<br>・ その他の無機物の溶出<br><br>1.4<br>・ 溶存物質との反応 | ・ 処分場構造物に用いられるセメント中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、ケイ酸カルシウム水和物等の水和物構造から $\text{Ca}^{2+}$ が溶出する。<br><br>・ 処分場構造物に用いられるコンクリート中の鉄筋が腐食し、酸素、水等を消費して酸化物、水酸化物等の腐食生成物を生じる。<br><br>・ 処分場構造物に用いられるセメント等の Na、Mg 等が溶出する。<br><br>・ 地下水中に溶存する炭酸イオン、有機物等との化学反応による影響。 | 1.1.1<br>・ 間隙水 pH の上昇<br>1.1.2<br>・ セメント間隙率の増加<br>1.1.3<br>・ ベントナイト成分とのイオン交換<br>1.1.4<br>・ $\text{CaCO}_3$ の生成、析出 (セメントの中性化)<br><br>1.2.1<br>・ Eh の低下<br>1.2.2<br>・ 酸化物生成による体積の増加<br>1.2.3<br>・ 無機物コロイドの生成と核種の収着<br>1.2.4<br>・ 水の発生 ( $\text{H}_2$ )<br>1.2.5<br>・ 1.1.3 に同じ<br><br>1.3.1<br>・ 1.1.3 に同じ<br><br>1.4.1<br>・ 1.1.4 に同じ<br>1.4.2<br>・ 錯体 (キレート) の生成 |
| 2.<br>・ 処分場充填材と水との接触 | 2.1<br>・ 1.1 に同じ<br><br>2.2<br>・ $\text{SO}_4^{2-}$ で溶出                                                 | ・ 処分場構造物に用いられるセメントの中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、ケイ酸カルシウム水和物等の水和物構造から $\text{Ca}^{2+}$ が溶出する。<br><br>・ 充填材として用いられるベントナイト中の $\text{SO}_4^{2-}$ が溶出する。                                                                                               | 2.1.1 ~ 2.1.4<br>・ 1.1.1 ~ 1.1.5 に同じ<br><br>2.2.1<br>・ エトリンガイトの生成による体積増加<br>2.2.2<br>・ 微生物活動の活性化                                                                                                                                                                                                                                                                 |

表 1.2-3 固有現象と相互関係 (1次プロセス-2)

| 原因事象、プロセス        | 現象                                                                                  | 現象に含まれる F E P's                                                                                                                                                                                             | 影響事象、プロセス                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | 2.3<br>・その他の無機物の溶出<br><br>2.4<br>・1.4 に同じ                                           | ・処分場構造物に用いられるセメント等の Na、Mg 等が溶出する。<br><br>・地下水中に溶存する炭酸イオン、有機物等との化学反応による影響。                                                                                                                                   | 2.3.1<br>・1.1.3 に同じ<br><br>2.4.1<br>・1.1.4 に同じ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 3.<br>・廃棄体と水との接触 | 3.1<br>・有機物の溶出<br><br>3.2<br>・1.1 に同じ<br><br>3.3<br>・その他無機物の溶出<br><br>3.4<br>・金属の腐食 | ・廃棄体マトリクス構成物質及び有機廃棄物が溶出する。<br><br>・廃棄体マトリクス及び充填材に用いられるセメント中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水和物構造から $\text{Ca}^{2+}$ が溶出する。<br><br>・廃棄体中の硝酸塩等無機塩類が溶出する。<br><br>・廃棄体中及び廃棄体容器を構成する鉄等の金属の腐食により、酸化物、水酸化物等の腐食生成物を生じる。 | 3.1.1<br>・1.4.2 に同じ<br>3.1.2<br>・有機物コロイドの形成<br>3.1.3<br>・2.2.2 に同じ<br><br>3.2.1<br>・1.1.1 に同じ<br>3.2.2<br>・1.1.2 に同じ<br>3.2.3<br>・1.1.3 に同じ<br>3.2.4<br>・1.1.4 に同じ<br><br>3.3.1<br>・Eh の変化<br>3.3.2<br>・核種の化学形の変化<br>3.3.3<br>・1.4.2 に同じ<br>3.3.4<br>・2.2.2 に同じ<br><br>3.4.1<br>・1.2.1 に同じ<br>3.4.2<br>・1.2.2 に同じ<br>3.4.3<br>・1.2.3 に同じ<br>3.4.4<br>・1.2.4 に同じ<br>3.4.5<br>・1.1.3 に同じ |
| 4.<br>・放射性核種の崩壊  | 4.1<br>・放射線分解                                                                       | ・廃棄体中の放射性核種からの放射線の照射によって、炭化水素鎖の切断等によるガス等の分解生成物が生じる。                                                                                                                                                         | 4.1.1<br>・1.2.4 に同じ<br>4.1.2<br>・劣化有機物の生成                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

表 1.2-3 固有現象と相互関係 (1次プロセス-3)

| 原因事象、プロセス | 現象                  | 現象に含まれるFEP's                          | 影響事象、プロセス                                                                       |
|-----------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|           | 4.2<br>・崩壊熱による温度の上昇 | ・廃棄体中の放射性核種の壊変時に発生する熱によって、周囲の温度が上昇する。 | 4.1.3<br>・Ehの上昇<br>4.1.4<br>・1.4.2 に同じ<br>4.2.1<br>・溶解度の変化<br>4.2.2<br>・反応速度の変化 |

表 1.2-3 固有現象と相互関係 (2次プロセス-1)

| 原因事象、プロセス                     | 現象                                           | 現象に含まれるFEP's                                                                                  | 影響事象、プロセス                                                                                                                                                         |
|-------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.1<br>・ $\text{Ca}^{2+}$ の溶出 | 1.1.1<br>・ 間隙水pHの上昇                          | ・ セメント中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水和鉱物の溶解によるpHの上昇。                                           | 1.1.1.1<br>・ 4.2.1 に同じ<br>1.1.1.2<br>・ 収着特性の変化<br>1.1.1.3<br>・ 3.3.2 に同じ<br>1.1.1.4<br>・ 1.2.3、3.1.2 に同じ<br>1.1.1.5<br>・ ベントナイトのゼオライト<br>1.1.1.6<br>・ 腐食の抑制、機構の変化 |
|                               | 1.1.2<br>・ セメント間隙率の増加                        | ・ セメント中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水和鉱物の溶解によりセメント中の空隙が増加する。                                   | 1.1.2.1<br>・ 透水係数の増加<br>1.1.2.2<br>・ 強度の低下                                                                                                                        |
|                               | 1.1.3<br>・ ベントナイト成分とのイオン交換                   | ・ Na ベントナイト中のナトリウムが $\text{Ca}^{2+}$ と置換することにより、粘土物質の特性が変化する。                                 | 1.1.3.1<br>・ 1.1.2.1 に同じ                                                                                                                                          |
|                               | 1.1.4<br>・ $\text{CaCO}_3$ の生成、析出 (セメントの中性化) | ・ セメント成分より溶出した $\text{Ca}^{2+}$ と地下水中に溶出する。 $\text{CO}_3^{2-}$ との反応により $\text{CaCO}_3$ を生成する。 | 1.1.4.1<br>・ 間隙水pHの低下<br>1.1.4.2<br>・ 透水係数の低下<br>1.1.4.3<br>・ 腐食の促進、機構の変化                                                                                         |
| 1.2<br>・ 金属の腐食                | 1.2.1<br>・ Ehの低下                             | ・ 金属の腐食により地下水中の $\text{O}_2$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ を消費し地下水環境を還元側に変化させる。      | 1.2.1.1<br>・ 4.2.1 に同じ<br>1.2.1.2<br>・ 1.1.1.2 に同じ<br>1.2.1.3<br>・ 3.3.2 に同じ<br>1.2.1.4<br>・ 1.2.3、3.1.2 に同じ<br>1.2.1.5<br>・ 1.1.1.6 に同じ                          |
|                               | 1.2.2<br>・ 酸化物生成による体積の増加                     | ・ 腐食生成物として $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 等の低密度酸化物が生成することにより体積が増加する。                                 | 1.2.2.1<br>・ 1.1.2.1 に同じ<br>1.2.2.2<br>・ 応力の発生                                                                                                                    |

表 1.2-3 固有現象と相互関係 (2次プロセス-2)

| 原因事象、プロセス                       | 現象                                                 | 現象に含まれる F E P's                                                                                    | 影響事象、プロセス                                                                                            |
|---------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.3<br>・その他の無機物の溶出              | 1.2.3<br>・無機物コロイドの生成と核種の収着                         | ・鉄の腐食生成物である $\text{FeO}(\text{OH})$ 等がコロイドを形成し、これ放射線核種が収着する。                                       | 1.2.3.1<br>・バリア収着性の低下<br>1.2.3.2<br>・溶解度の増加<br>1.2.3.3<br>・フィルトレーションによる低移行性<br>1.2.3.4<br>・空孔拡散係数の低下 |
|                                 | 1.2.4<br>・ガスの発生 ( $\text{H}_2$ )                   | ・鉄の無酸素条件下での腐食により、 $\text{H}_2$ ガスが発生する。                                                            | 1.2.4.1<br>・気泡の発生による圧力の低下                                                                            |
|                                 | 1.2.5<br>・ベントナイト成分とのイオン交換                          | ・鉄の腐食により溶出する鉄イオンとベントナイト中の $\text{Na}$ イオンが交換される。                                                   | 1.2.5.1<br>・1.2.3.1 に同じ                                                                              |
|                                 | 1.3.1<br>・ベントナイト成分とのイオン交換                          | ・セメントから溶出する $\text{K}$ 、 $\text{Mg}$ 等の成分とベントナイト中の $\text{Na}$ イオンが交換される。                          | 1.3.1.1<br>・1.2.3.1 に同じ<br>1.3.1.2<br>・ベントナイトのイライト化                                                  |
| 1.4<br>・溶存物質との反応                | 1.4.1<br>・1.1.4 に同じ<br>1.4.2<br>・錯体 (キレート) の生成     | ←<br>・地下水中に溶存する炭酸イオン、有機物との錯 (キレート) 化合物の形成。                                                         | ←<br>1.4.2.1<br>・1.2.3.1 に同じ<br>1.4.2.2<br>・1.2.3.2 に同じ<br>1.4.2.3<br>・1.2.3.4 に同じ                   |
| 2.1<br>・ $\text{Ca}^{2+}$ の溶出   | 2.1.1 ~ 2.1.4<br>・1.1.1 ~ 1.1.4 に同じ                | ←                                                                                                  | ←                                                                                                    |
| 2.2<br>・ $\text{SO}_4^{2-}$ の溶出 | 2.2.1<br>・エトリンガイトの生成による体積増加<br>2.2.2<br>・微生物活動の活性化 | ・セメントの主成分であるアルミン酸カルシウムと硫酸カルシウムとの間で比容積の大きい複塩を生成する。<br><br>・ $\text{SO}_4^{2-}$ は一部の微生物活動のエネルギー源となる。 | 2.2.1.1<br>・応力の発生<br><br>2.2.2.1<br>・硫酸イオンの還元による腐食の促進                                                |

表 1.2-3 固有現象と相互関係 (2次プロセス-3)

| 原因事象、プロセス                   | 現 象                                                                        | 現象に含まれる F E P ' s                                                                                 | 影響事象、プロセス                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.3<br>・その他の無機物の溶出          | 2.3.1<br>・1.3.1 に同じ                                                        | ←                                                                                                 | ←                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 2.4<br>・溶存物質との反応            | 2.4.1<br>・1.1.4 に同じ                                                        | ←                                                                                                 | 2.4.1.1 ~2.4.1.4<br>・1.1.4.1 ~<br>1.1.4.4 に同じ                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 3.1<br>・有機物の溶出              | 3.1.1<br>・1.4.2 に同じ<br><br>3.1.2<br>・有機物コロイドの形成<br><br>3.1.3<br>・微生物活動の活性化 | ←<br><br>・廃棄体を構成、含有する有機物が地下水中に浸出し、コロイドを形成する。<br><br>・有機物は微生物の炭素源、エネルギー源として物質代謝に重要であり、微生物活動を活性化する。 | 1.4.2.1 ~1.4.2.2<br>・1.2.3.1 ~<br>1.2.3.2 に同じ<br><br>3.1.2.1 ~3.1.2.3<br>・1.2.3.1 ~<br>1.2.3.3 に同じ<br><br>3.1.3.1<br>・劣化有機物の生成<br>3.2.3.2<br>・ガスの発生<br>(CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、<br>Na 等)<br>3.1.3.3<br>・3.3.1 に同じ<br>3.1.3.4<br>・間隙水pHの変化<br>3.1.3.5<br>・微生物中への核種の取込み<br>3.1.3.6<br>・3.3.2 に同じ |
| 3.2<br>Ca <sup>2+</sup> の溶出 | 3.2.1 ~3.2.4<br>・1.1.1 ~1.1.4 に同じ                                          | ←                                                                                                 | ←                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 3.3<br>その他の無機物の溶出           | 3.3.1<br>・Ehの変化<br><br>3.3.2<br>・核種化学形の変化                                  | ・廃棄体中の含有塩類等が溶出することによる地下水Ehの変化。<br><br>・廃棄体中に含有される塩類等が溶出することによる核種の化学形の変化。                          | 3.3.1.1<br>・4.2.1 に同じ<br>3.3.1.2<br>・1.1.1.2 に同じ<br>3.3.1.3<br>・3.3.2 に同じ<br>3.3.1.4<br>・腐食速度機構の変化<br><br>3.3.2.1<br>・4.2.1 に同じ<br>3.3.2.2<br>・1.1.1.2 に同じ<br>3.3.2.3<br>・1.2.3.4 に同じ                                                                                                                     |

表 1.2-3 固有現象と相互関係 (2次プロセス-4)

| 原因事象、プロセス           | 現象                                                                                             | 現象に含まれる FEP's                                                                                                                                                        | 影響事象、プロセス                                                                                                                                                                             |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | 3.3.3<br>・1.4.2 に同じ<br><br>3.3.4<br>・微生物活動の活性化                                                 | ←<br><br>・廃棄体に含有される塩類は $\text{NO}_3^-$ - $\text{NO}_2^-$ 等一部の微生物活動のエネルギー源となる。                                                                                        | ←<br><br>3.3.4.1 ~ 3.3.4.7<br>・3.1.3.1 ~ 3.1.3.7 に同じ                                                                                                                                  |
| 3.4<br>・金属の腐食       | 3.4.1 ~ 3.4.5<br>・1.2.1 ~ 1.2.5 に同じ                                                            | ←                                                                                                                                                                    | ←                                                                                                                                                                                     |
| 4.1<br>・放射線分解       | 4.1.1<br>・ $\text{H}_2$ の発生 ( $\text{H}_2$ )<br><br>4.1.2<br>・劣化有機物の生成<br><br>4.1.3<br>・Eh の上昇 | ・廃棄体中の水、有機物の放射線分解により $\text{H}_2$ ガスが発生する。<br><br>・廃棄体中の有機物の放射線分解により炭化水素鎖が切断され、低分子量炭化水素が生成する。<br><br>・放射線分解によって生成する $\text{H}_2$ $\text{O}_2$ 等の酸化剤により地下水環境は酸化状態となる。 | 4.1.1.1<br>・1.2.4.1 に同じ<br><br>4.1.2.1<br>・3.1 に同じ<br><br>4.1.3.1<br>・4.2.1 に同じ<br>4.1.3.2<br>・1.1.1.2 に同じ<br>4.1.3.3<br>・3.3.2 に同じ<br>4.1.3.4<br>・コロイドの変化<br>4.1.3.5<br>・腐食の促進、機構の変化 |
| 4.2<br>・崩壊熱による温度の上昇 | 4.2.1<br>・溶解度の変化<br><br>4.2.2<br>・反応速度の変化                                                      | ←<br><br>・温度の上昇により地下水中の各種物質の溶解度が変化する。<br><br>・温度の上昇により、腐食、有機物分解等に係る反応速度が変化する。                                                                                        | ←<br><br>・各物質の溶解<br><br>・各種化学反応                                                                                                                                                       |

表 1.2-3 固有現象と相互関係 (3次プロセス、性能に対する影響-1)

| 原因事象、プロセス                                                         | 現象                                                                                                                                                                             | 現象に含まれるFEP's               | 影響事象、プロセス      |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------|
| 1.1.1.2<br>・収着特性の変化<br>{<br>1.2.3.1<br>1.1.1.2.1<br>・収着特性の向上<br>} |                                                                                                                                                                                | ・核種移行速度の低下<br>・地下水中核種濃度の増加 | N/Fからの核種放出率の低下 |
| 1.1.1.5<br>・ベントナイトのゼオライト化                                         | {<br>1.1.1.2.1<br>・収着特性の向上(陽イオン)<br>1.1.2.1<br>}                                                                                                                               | ・核種移行速度の低下                 | N/Fからの核種放出率の低下 |
| 1.1.1.6<br>・腐食の促進、機構の変化                                           | 1.2                                                                                                                                                                            |                            |                |
| 1.1.2.1<br>・透水係数の増加                                               |                                                                                                                                                                                | ・地下水流速の増加                  | N/Fからの核種放出率の増加 |
| 1.1.2.2<br>・強度の低下                                                 | 亀裂の発生<br>↓<br>1.1.2.1                                                                                                                                                          |                            |                |
| 1.1.4.1<br>・間隙水pHの低下                                              | 4.2.1<br>1.1.1.2<br>3.3.2<br>1.2.3<br>1.1.4.3<br>1.1.4.1.1<br>{<br>・無機物コロイドの消滅/核種の脱着<br>1.1.4.1.2<br>・無機錯体の消滅/核種の脱着<br>}<br>↓<br>{<br>1.1.1.2.1<br>1.1.4.1.1.1<br>・溶解度の低下<br>} | ・地下水中核種濃度の低下               | N/Fからの核種放出率の低下 |
| 1.1.4.2<br>・透水係数の低下                                               |                                                                                                                                                                                | ・地下水流速の減少                  | N/Fからの核種放出率の低下 |

表 1.2-3 固有現象と相互関係 (3次プロセス、性能に対する影響-2)

| 原因事象、プロセス                                                                                                                                                                                                | 現象                                                                                                                                                                          | 現象に含まれるFEP's                                                                | 影響事象、プロセス                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.2.2.2<br>・応力の発生<br><br>1.2.3.1<br>・収着特性の低下<br><br>1.2.3.2<br>・溶解度の増加<br><br>1.2.3.3<br>・フィルトレーション等による低移行性<br><br>1.2.3.4<br>・空孔拡散定数の低下<br><br>1.2.4.1<br>・気泡発生による圧力の上昇<br><br>1.3.1.2<br>・ベントナイトのイライト化 | 亀裂の発生<br>↓<br>1.1.2.1<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>1.2.4.1.1<br>・間隙水のガスによる置換<br><br>1.2.4.1.2<br>気体発生速度の低下<br>↓<br>{1.2.4<br>3.1.3.2}<br><br>{1.1.2.1<br>1.2.3.1} | ・核種移行速度の増加<br>・地下水中核種濃度の増加<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>・地下水流速の増加 | N/Fからの核種放出率の増加<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>N/Fからの核種放出率の増加<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>N/Fからの核種放出率の低下<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>N/Fからの核種放出率の低下<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>N/Fからの核種放出率の増加 |
| 2.2.2.1<br>・硫酸イオンの還元による腐食の促進                                                                                                                                                                             | 1.2                                                                                                                                                                         |                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                        |
| 3.1.3.1<br>・劣化有機物の生成<br><br>3.1.3.2<br>・ガスの発生(CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> 等)                                                                                                        | 3.1<br><br>{1.2.4.1<br>1.4}                                                                                                                                                 |                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                        |

表 1.2-3 固有現象と相互関係 (3次プロセス、性能に対する影響-3)

| 原因事象、プロセス                                                                                                                                                                                                                                                         | 現象                                                                                   | 現象に含まれるFEP's | 影響事象、プロセス |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|
| 3.1.3.4<br><ul style="list-style-type: none"> <li>・間隙水pHの変化               <ul style="list-style-type: none"> <li>{1.1.1</li> <li>{1.1.4.1</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                  | 1.2.3.3                                                                              |              |           |
| 3.1.3.6<br><ul style="list-style-type: none"> <li>・微生物中への核種の取込み</li> </ul>                                                                                                                                                                                        |                                                                                      |              |           |
| 3.3.1.4<br><ul style="list-style-type: none"> <li>・腐食速度、機構の変化               <ul style="list-style-type: none"> <li>{1.1.1.6</li> <li>{3.3.1.4.1                   <ul style="list-style-type: none"> <li>・腐食の抑制、機構の変化</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>          | 1.2                                                                                  |              |           |
| 4.1.3.4<br><ul style="list-style-type: none"> <li>・コロイドの変化               <ul style="list-style-type: none"> <li>{1.2.3</li> <li>{3.1.2                   <ul style="list-style-type: none"> <li>{1.1.4.1.1</li> <li>{1.1.4.1.2</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> |                                                                                      |              |           |
| 4.2.1<br><ul style="list-style-type: none"> <li>・溶解度の変化               <ul style="list-style-type: none"> <li>{1.2.3.2</li> <li>{1.1.4.1.1.1</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                |                                                                                      |              |           |
| 4.2.2<br><ul style="list-style-type: none"> <li>・反応速度の変化</li> </ul>                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>{1.2</li> <li>{1.4</li> <li>{2.2.2</li> </ul> |              |           |

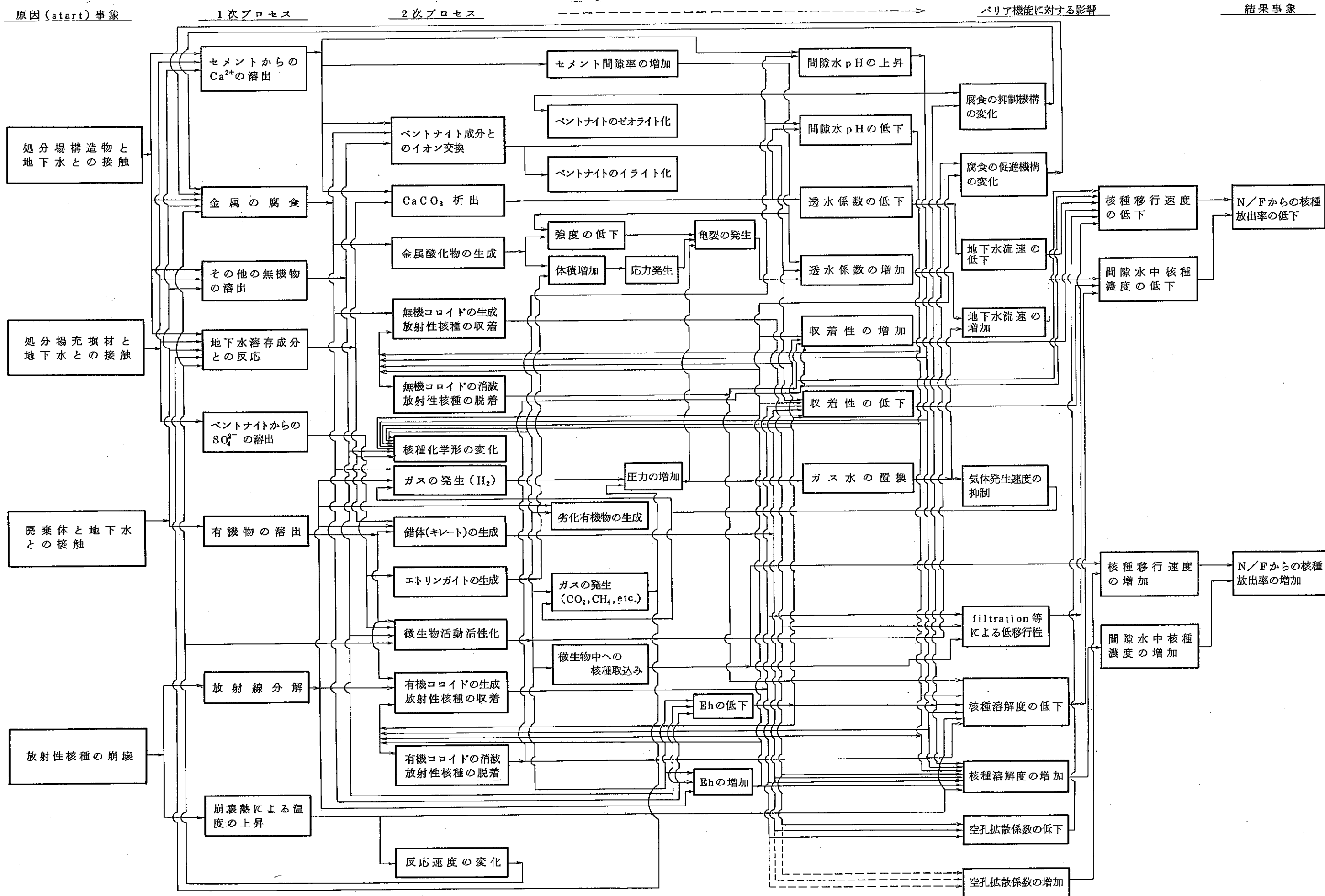


図 1.2-10 TRU 廃棄物処分に係るニアフィールド内現象の相互関係

## 2. T R U 廃棄物処分システムにおける 固有の現象の評価手法の調査，検討

## 2. T R U廃棄物処分システムにおける固有の現象の評価手法の調査、検討

T R U廃棄物の地層処分システム性能を評価するためには、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究等の成果を取込みつつ、ニアフィールド及びファーフィールドにおける核種移行プロセスを記述する個々の事象について、その機構などを整理しながらそれらの現象を評価するため、モデル開発を行ってこれらの個別モデルから重要な現象を選択、整理、統合して、長期安全性の総合的な評価手法を確立する必要がある。

このため、処分環境における各種現象を適切に再現するためのモデル開発を進めるために、考慮すべき現象の検討結果を基にこれに関連する個々の現象を分類し、それぞれの現象の中からT R U廃棄物に特有、顕著なものを抽出する。又、抽出されたこれら各事項に係わる諸現象とそのモデル化について調査、検討を行う。

### 2.1 評価すべき現象の抽出

#### 2.1.1 性能評価試算

1.2において抽出された評価対象とすべき現象から、T R U廃棄物特性、処分概念に起因し、T R U廃棄物の処分に特有な、あるいは核種の移行に顕著な影響を及ぼすと考えられる現象を抽出、整理する。これら現象のうち代表的と考えられるものについて、その影響を概略的に評価するため、予備的な性能評価試算を行い、現象の重要度を把握することにより 2.2節以後の固有現象の詳細検討の方向性を明確にする必要があると考えられる。

#### (1) 従来の試算で用いたパラメータ値の環境

平成2年度までに実施している性能評価試算対象パラメータ値は、主としてH L Wを対象とした文献値を採用した。これらの値はT R U廃棄物処分の際の固有現象と考えられているガス発生、錯化、微生物の影響、高p H等を考慮しない場合の核種移行試算に対しては、妥当な値と推定されるが、T R U廃棄物に特有な現象を対象とした場合、移流分散評価モデルに用いるパラメータのうち主として人工バリアのK d、核種の溶解度、天然バリアの透水係数等が変化する可能性が高い。

そこで、これらのパラメータがどのように変化するかを検討する前に、平成2年度までの一次元移流分散コードによる試算で用いた上記パラメータの環境条件について表 2.1-1にまとめた。

検討対象核種は、平成元年度において被曝線量試算上決定核種と評価され、その中で特に重要であるC-14、I-129、4N+1系列とした。

表 2.1-1 平成2年度までに用いたパラメータ値と環境条件

(a) 人工バリアのKd

|        | K d<br>(m l / g) | 出 典                 | 環 境 条 件                                                                                                |
|--------|------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C-14   | 0                | N G B (85-09)       | ・ Conserv 値, H L W処分条件下のベントナイト中                                                                        |
| I-129  | 1                | KBS Rep.<br>(83-34) | ・ 圧密Na- ベントナイト MX-80 ( $\rho=2000$ kg/m <sup>3</sup> , $\varepsilon=0.35$ ) の実測値<br>・ 地下水は模擬深部花崗岩中水を使用 |
| Am-241 | 6600             |                     |                                                                                                        |
| Np-237 | 120              |                     |                                                                                                        |
| U-233  | 93               |                     |                                                                                                        |

(b) 溶解度

|        | 溶 解 度<br>(M)          | 出 典                   | 環 境 条 件                                                                           |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| C-14   | 可 溶                   | Pigford Rep. を<br>参考に | ・ Most Probable 条件下<br>ただし p H=9 E h=0.2でも同様                                      |
| I-129  | 可 溶                   | Pigford Rep.          | ・ Pigford Rep. での H L W処分における<br>最も可能性のある環境での値<br>・ N p は H L WのNear-field データ使用。 |
| Am-241 | $4.1 \times 10^{-10}$ | Pigford Rep.          |                                                                                   |
| Np-237 | $1.0 \times 10^{-8}$  | N G B (85-09)         |                                                                                   |
| U-233  | $4.3 \times 10^{-9}$  | Pigford Rep.          |                                                                                   |

(c) 天然バリアの透水係数

| 天然バリアの透水係数<br>(m / s) | 出 典           | 環 境 条 件                 |
|-----------------------|---------------|-------------------------|
| $1 \times 10^{-8}$    | N G B (85-08) | ・ 泥灰岩 (等方) 「緩みゾーンの透水係数」 |

注) 本パラメータは下記研究において性能評価試算で用いられた。

“T R U廃棄物の処分に関する調査研究”, (1989.1990)

## (2) T R U廃棄物に特有な現象を考慮したパラメータ値の検討

上記(1)のパラメータ値 ( $K_d$ , 透水係数, 溶解度) について, いくつかの文献値を引用してT R U処分環境に近い条件を推定して下記のように検討設定した。

### (i) 人工バリアの $K_d$

$K_d$ は移行モデル上核種移行における遅延係数を支配する係数であるが, 環境条件により大きく変化することが従来の研究で示されている。中でも地下水の  $pH$ <sup>1), 2)</sup>, 共存イオン<sup>3)</sup>, 錯体<sup>4)</sup>, コロイド<sup>4)</sup>, 核種濃度<sup>5)</sup> により大きく影響を受けると考えられている。これらのうち, 比較的入手可能な資料が多い  $pH$ ,  $E_h$  が及ぼす影響及び有機物の存在による影響について調査した。

英国などにおいては処分場内の  $pH$  は, 処分場の人工構築物の主材料がコンクリートで構成されることが予想されることから,  $Ca^{2+}$  溶出等に起因して (10<sup>6</sup> 年近くにわたり  $pH=10$  以上になると言われている<sup>6), 7)</sup>。  $pH-K_d$  の関係については, 正, 負の依存性があるもの, 又は中性領域でピークを示すものがあるが, 本検討の対象核種についての粘土中での  $K_d$  は図 2.1-1~3 のように I-129 については負の依存性を示し  $pH=10$  付近で 0, Np については正の依存性を示す<sup>2)</sup>。一方, 文献<sup>8)</sup> によれば, セメント系環境条件下 ( $pH=12$ ,  $E_h=-410mV$ ) での C, I, Am, Np, U の最小収着量はバッチ試験からそれぞれ 2, 0, 2, 50, 2 [ml/g] と報告している (表2.1-2)。また, 普通ポルトランドセメント/微粉フライアッシュ浸出液下で, 有機物 (セルロース) 含有下では有機物がない場合に比較して Am, Np, U について 1/100 となるとしている (表2.1-3)。存在下本試験では,  $K_d$  値が最も小さい値に変化した場合の人工バリアからの核種フラックスの変化幅を求めることを主目的とするため, これら両環境における値から設定する。

また, I については, 吸着材の開発動向を考慮して,  $K_d$  を 100 倍及び 1000 倍とした場合を試算する。表2.1-4 に試算用設定値を示す。

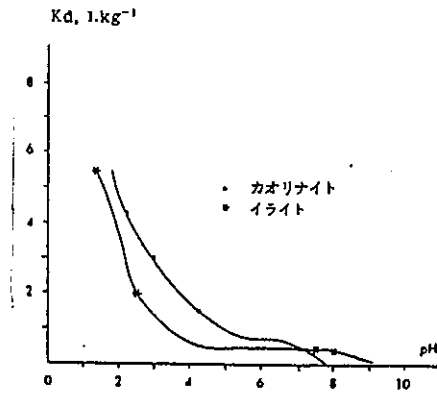


図 2.1-1 粘土鉱物への吸着に対するヨウ素のpH依存性<sup>1)</sup>

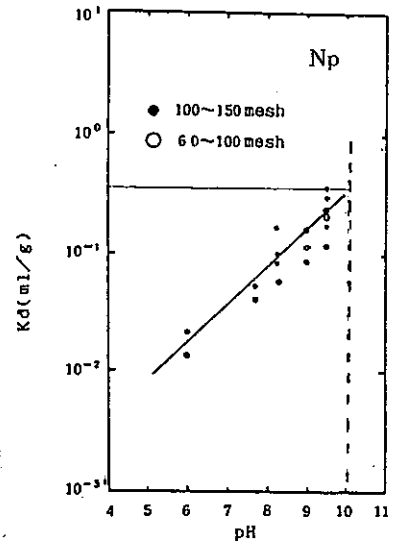
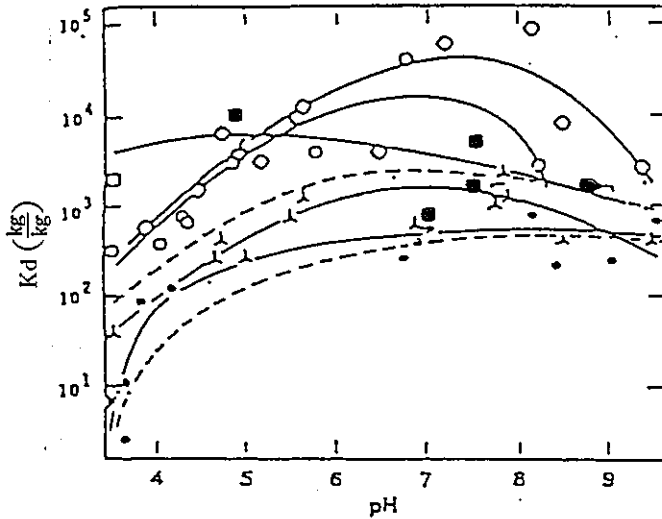
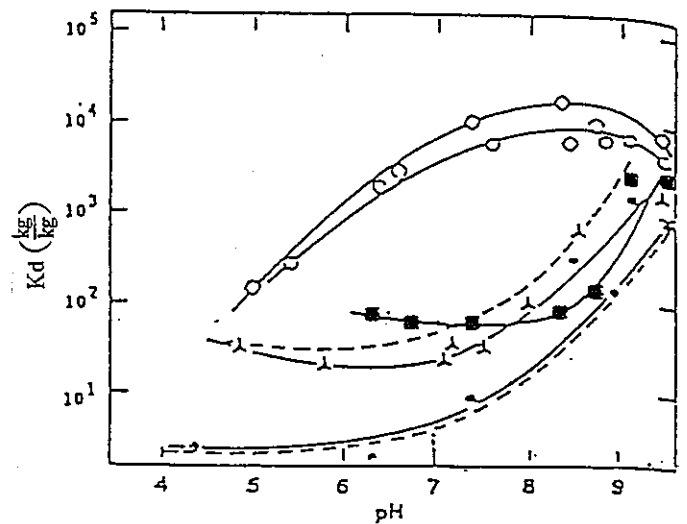


図 2.1-2 パーミキュライトに対するKdとpH<sup>1)</sup>



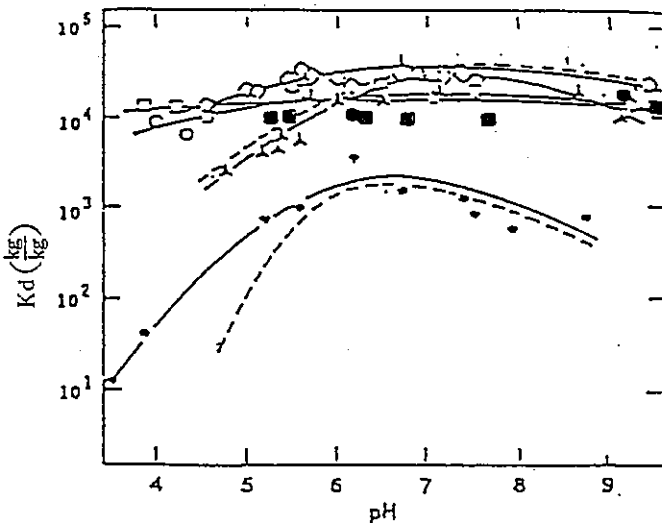
(特徴) pH-Kdの相関なし

(a) UのpHとKd



(特徴) pH=8.5まではKd約100  
それより高いpHはKd急上昇  
pH=10で、Kd=10000となる。

(b) NpのpHとKd



(特徴) pHによらずKdは一定

(c) AmのpHとKd

図 2.1-3 アクチノイドの岩石・鉱物に対する分配係数<sup>2)</sup>

● 石英 ▲ biolite, ○ 燐灰石 ◇ attapulgite, ■ モンモリロナイト

この中でベントナイトの主成分であるモンモリロナイトの分配係数とpHの関係を検討した。

表 2.1 - 2 pH = 12, Eh = -410 mV での  $K_d$

pH = 12  
Eh = -410mV

| Element | Best Estimate<br>m/kg | Maximum<br>m/kg    | Minimum<br>m/kg    |
|---------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| H       | 0                     | 0                  | 0                  |
| C       | 2                     | 10                 | $2 \times 10^{-3}$ |
| Cl      | 0                     | 0                  | 0                  |
| Ca      | 2                     | 10                 | $2 \times 10^{-3}$ |
| Ni      | $10^{-1}$             | 2                  | $10^{-3}$          |
| Se      | $10^{-4}$             | $10^{-3}$          | 0                  |
| Sr      | $5 \times 10^{-3}$    | $2 \times 10^{-2}$ | $10^{-4}$          |
| Zr      | 2                     | $3 \times 10^1$    | $2 \times 10^{-3}$ |
| Nb      | 1                     | $8 \times 10^1$    | $5 \times 10^{-1}$ |
| Tc      | 2                     | $3 \times 10^1$    | $2 \times 10^{-3}$ |
| Pd      | $10^{-1}$             | 2                  | $10^{-3}$          |
| Ag      | $10^{-3}$             | $2 \times 10^{-2}$ | $10^{-4}$          |
| Sn      | 1                     | $6 \times 10^1$    | $10^{-3}$          |
| I       | $10^{-3}$             | $10^{-2}$          | 0                  |
| Cs      | $10^{-3}$             | $2 \times 10^{-2}$ | $10^{-4}$          |
| Sm      | 2                     | $4 \times 10^1$    | $2 \times 10^{-3}$ |
| Pb      | $2 \times 10^2$       | $2 \times 10^2$    | $2 \times 10^{-1}$ |
| Ra      | $2 \times 10^{-1}$    | 2                  | $2 \times 10^{-4}$ |
| Ac      | 2                     | $4 \times 10^1$    | $2 \times 10^{-3}$ |
| Th      | 2                     | $3 \times 10^1$    | $2 \times 10^{-3}$ |
| Pa      | $10^{-2}$             | $10^{-1}$          | $10^{-1}$          |
| U       | 2                     | $3 \times 10^1$    | $2 \times 10^{-3}$ |
| Np      | $5 \times 10^1$       | $2 \times 10^2$    | $5 \times 10^{-2}$ |
| Pu      | 2                     | $3 \times 10^1$    | $2 \times 10^{-3}$ |
| Am      | 2                     | $4 \times 10^1$    | $2 \times 10^{-3}$ |
| Cm      | 2                     | $4 \times 10^1$    | $2 \times 10^{-3}$ |

表 2.1 - 3 有機物（セルロース）存在下の溶解度と  $K_d$

| Element | Solubility (mol/m <sup>3</sup> ) |                    | Sorption (reduction factor) |           |
|---------|----------------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------|
|         | Non-cellulose<br>Organics        | Cellulose          | Non-cellulose<br>Organics   | Cellulose |
| H       |                                  |                    | 注)                          | 注)        |
| C       |                                  |                    |                             |           |
| Cl      |                                  |                    |                             |           |
| Ca      |                                  |                    |                             |           |
| Ni      |                                  | $10^{-3}$          | 10                          | 10        |
| Se      |                                  |                    |                             |           |
| Sr      |                                  |                    |                             |           |
| Zr      |                                  | $10^{-3}$          | 10                          | 10        |
| Nb      |                                  | $10^{-3}$          | 10                          | 10        |
| Tc      | $10^{-3}$                        | $10^{-3}$          | 10                          | 10        |
| Pd      |                                  |                    | 10                          | 10        |
| Ag      |                                  |                    |                             |           |
| Sn      |                                  |                    | 10                          | 100       |
| I       |                                  |                    |                             |           |
| Cs      |                                  |                    |                             |           |
| Sm      |                                  |                    | 10                          | 100       |
| Pb      |                                  |                    | 10                          | 100       |
| Ra      |                                  |                    | 10                          | 10        |
| Ac      | $10^{-5}$                        | $10^{-3}$          | 10                          | 100       |
| Th      | $5 \times 10^{-5}$               | $5 \times 10^{-3}$ | 10                          | 100       |
| Pa      | $5 \times 10^{-5}$               | $5 \times 10^{-3}$ | 10                          | 100       |
| U       | $5 \times 10^{-5}$               | $5 \times 10^{-3}$ | 10                          | 100       |
| Np      | $5 \times 10^{-5}$               | $5 \times 10^{-3}$ | 10                          | 100       |
| Pu      | $5 \times 10^{-5}$               | $5 \times 10^{-3}$ | 10                          | 100       |
| Am      | $10^{-5}$                        | $10^{-3}$          | 10                          | 100       |
| Cm      | $10^{-5}$                        | $10^{-3}$          | 10                          | 100       |

注) 表中 100 ならば通常値の 1/100 倍のこと

表 2.1-4 人工バリアのKd の設定値

| 核種 \ 年度 | 平成元年度<br>(基本ケース) | 平成 2 年 度<br>(パラメータサーベイ) | pH, Eh を考<br>慮した場合 | 有機物の影響<br>を考慮した場合 |
|---------|------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|
| C-14    | 0                | —                       | —                  | —                 |
| I-129   | 1                | 0                       | 100, 1000 (高収着材想定) |                   |
| Am-241  | 6600             | 660                     | 2.0                | 66                |
| Np-237  | 120              | 11.9                    | 50.0               | 1.2               |
| U-233   | 93               | 9.2                     | 2.0                | 0.93              |

単位: ml/g

## (ii)溶解度

Harwell 研究所での Pourboix 線図を用いた溶解度算定<sup>9)</sup>に基づけば, Np-237 については, セメント及び金属腐食環境下ではその存在形態は  $\text{NpO}_2$  が支配的であり,  $1 \times 10^{-18} \text{ M}$  となる。一方, 錯体を考慮すれば  $\text{Np}(\text{OH})^{-5}$  が支配的で  $1 \times 10^{-7} \text{ M}$  となることが示されている。また, 文献<sup>8)</sup>によれば  $\text{pH}=12$ ,  $\text{Eh}=-410\text{mV}$  セメント系環境条件下で Am, Np, U の最大溶解度をそれぞれ  $3 \times 10^{-10}$ ,  $2 \times 10^{-8}$ ,  $6 \times 10^{-10} \text{ M}$  としている。(表2.1-5)

一方, Pigford<sup>10)</sup>によれば, 環境条件が  $\text{pH}=9$ ,  $\text{Eh}=-0.2 \text{ V}$  では Np は10倍, Amは1/10000 倍, Uは不変であるとしている。

有機物による溶解度増加については, 同じく文献<sup>8)</sup>によると普通ポルトランドセメント/微粉フライアッシュ浸出液中のセルロース含有下で, Am, Np, U の最大値がそれぞれ  $1 \times 10^{-6}$ ,  $5 \times 10^{-6}$ ,  $5 \times 10^{-6} \text{ M}$  を示している。

(表2.1-3 参照)

本検討では, 核種移行に伴ない有機物等の作用により錯体形成の可能性があることから, 保守的な観点より最大パラメータ値を用いることにして表 2.1-6のよう設定した。

表 2.1-6 核種の溶解度設定値

| 核種 \ 溶解度 | 溶解度設定値 [M]         |
|----------|--------------------|
| Am-241   | $1 \times 10^{-6}$ |
| Np-237   | $5 \times 10^{-6}$ |
| U-233    | $5 \times 10^{-6}$ |

C-14, I-129: 可溶 (全量溶解) 単位: M (=mol/l)

表 2.1 - 5 pH = 12, Eh = -410 mV での溶解度

pH = 12  
Eh = -410mV

| Element                             | Best Estimate<br>(mol/m <sup>3</sup> ) | Maximum<br>(mol/m <sup>3</sup> ) | Minimum<br>(mol/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| H                                   | -                                      | -                                | -                                |
| C                                   | 3 10 <sup>-2</sup>                     | 6 10 <sup>-2</sup>               | 10 <sup>-2</sup>                 |
| Cl                                  | -                                      | -                                | -                                |
| Ca                                  | 20                                     | 40                               | 10                               |
| Ni                                  | 10 <sup>-4</sup>                       | 10 <sup>-3</sup>                 | 10 <sup>-5</sup>                 |
| Se                                  | 2 10 <sup>-6</sup>                     | 4 10 <sup>-6</sup>               | 10 <sup>-6</sup>                 |
| Sr                                  | 4 10 <sup>-1</sup>                     | 8 10 <sup>-1</sup>               | 2 10 <sup>-1</sup>               |
| Zr                                  | 10 <sup>-3</sup>                       | 2 10 <sup>-3</sup>               | 10 <sup>-3</sup>                 |
| Nb                                  | 10 <sup>-4</sup>                       | 6                                | 10 <sup>-5</sup>                 |
| Tc                                  | 10 <sup>-4</sup>                       | 6 10 <sup>-4</sup>               | 2 10 <sup>-5</sup>               |
| Pd                                  | 10 <sup>-4</sup>                       | (no range)                       | -                                |
| Ag                                  | 10 <sup>-1</sup>                       | (no range)                       | -                                |
| Sn                                  | 5                                      | -                                | 10 <sup>-2</sup>                 |
| I                                   | -                                      | -                                | -                                |
| Cs                                  | -                                      | -                                | -                                |
| Sm                                  | 10 <sup>-7</sup>                       | (no range)                       | -                                |
| Pb                                  | 4 10 <sup>-1</sup>                     | 4                                | 4 10 <sup>-2</sup>               |
| Ra                                  | 10 <sup>-7</sup>                       | 10 <sup>-2</sup>                 | 10 <sup>-3</sup>                 |
| Ac                                  | 10 <sup>-7</sup>                       | (no range)                       | -                                |
| Th                                  | 10 <sup>-6</sup>                       | 10 <sup>-3</sup>                 | 10 <sup>-7</sup>                 |
| Pa                                  | 10 <sup>-7</sup>                       | (no range)                       | -                                |
| U UO <sub>2</sub> (c) solid phase   | 3 10 <sup>-7</sup>                     | 6 10 <sup>-3</sup>               | 10 <sup>-4</sup>                 |
| U(OH) <sub>4</sub> (am) solid phase | 10 <sup>-3</sup>                       | 2 10 <sup>-3</sup>               | 5 10 <sup>-6</sup>               |
| Np                                  | 8 10 <sup>-6</sup>                     | 2 10 <sup>-5</sup>               | 2 10 <sup>-6</sup>               |
| Pu                                  | 7 10 <sup>-8</sup>                     | 7 10 <sup>-7</sup>               | 7 10 <sup>-9</sup>               |
| Am                                  | 3 10 <sup>-8</sup>                     | 3 10 <sup>-7</sup>               | 3 10 <sup>-9</sup>               |
| Cm                                  | 3 10 <sup>-8</sup>                     | 3 10 <sup>-7</sup>               | 3 10 <sup>-9</sup>               |

(一) は可溶性

C-14及びI-129 は可溶性であることから、溶解度の変化による試算には意味がないと考え、検討の対象外とした。

### (iii) 天然バリアの透水係数

天然バリアのKd は、フミン物質による錯体・コロイドの形成により一般には小さくなると考えられている。またコロイドによる電気的作用により核種移行が遅延されるともいわれている<sup>4)</sup>。一方間隙がコロイドの付着により小さくなると、平均自由行程が小さくなることから透水係数が小さくなると考えられ、この場合核種移行速度は低下する方向にある。

一方、田中ら<sup>11)</sup> は浅地中処分を対象として表層の砂岩、凝灰岩、砂質土壌に対し、pH=5と9の場合についてAmとPuのKd を測定し、pH9の場合Kd が約1/3 となることを示しているが透水係数との関係は言及していない。

また、天然バリア中の核種移行速度を検討する上で、透水係数とKd の他に、発生するガスが天然バリアの透水係数に及ぼす影響についても検討する必要がある。

ると考えられる。以下にガスと透水係数の関係について触れる。

Stephen らは<sup>12)</sup> W I P P の岩塩水中に溶存するガスが地下水流速に及ぼす影響について T O U G H コードを用いて試算した。彼らは毛管圧力に起因したガス／水相間圧の差によって、ガスが及ぼす地下水流速の変化を求め、相間圧差がない場合は、ガスが存在しない地下水流速の 2.1 倍、相間圧がある場合は 1.5 倍となることで、ガスが地下水流速を増大させる効果があることを示した。

一般にガスと地下水の流れは二相流問題として、図 2.1-4 に示すように相対透過係数を用いて議論できる。この図は、もし多孔質媒体の含水率が 40% で、残りの部分がガス 60% であるとき、水の相対透過係数  $k_{rel}$  は 40% ではなくそれ以下であることを意味している。一般に多孔質媒体中にガスが存在すれば、水の流れに対して栓のように動き、水ばかりかガスそれ自身も動きにくくなる。このような効果は Jamin effect と呼ばれ温泉地帯の間欠泉、沸とう泉の噴出停止の原因となっていることは周知のとおりである。

Brooks & Corey が求めた曲線では、図 2.1-5 に示すように含水率が 40% に低下すれば透水係数  $K_{rel}$  は 0 となる。これはスウェーデンのガス発生試算のようにガス発生量が  $1,200 \text{ m}^3 \text{ S T N} / \text{サイロ} \cdot \text{y}$  と大きい場合で、かつ地下水流速（線流速）が  $0.1 \text{ m} / \text{yr}$  と小さい場合、間隙はほとんどガスで占められることから水の流れはなくなることを意味する。一方、ガスには浮力効果により、上昇流を増加させる傾向もあることからガスが間隙のかかなりの部分を占める状態では、地下水流速が速くなる可能性もある<sup>13)</sup>。またガス圧による地層亀裂の増加等も考えられ透水係数が大きくなる可能性も否定できない<sup>14)</sup>。

このようなことから、現時点では天然バリア中の核種移行速度がコロイド、ガス等の影響によって大きく設定すべきか小さくすべきかは不明であるが、ここではガスによる流速増加を考慮して平成 2 年度の地下水流速  $1 \times 10^{-10} \text{ m} / \text{s}$  を 10 倍した値を採用する。

以上検討してきたように M A 固化体を対象に本年度実施する性能評価試算条件を表 2.1-7 にまとめた。

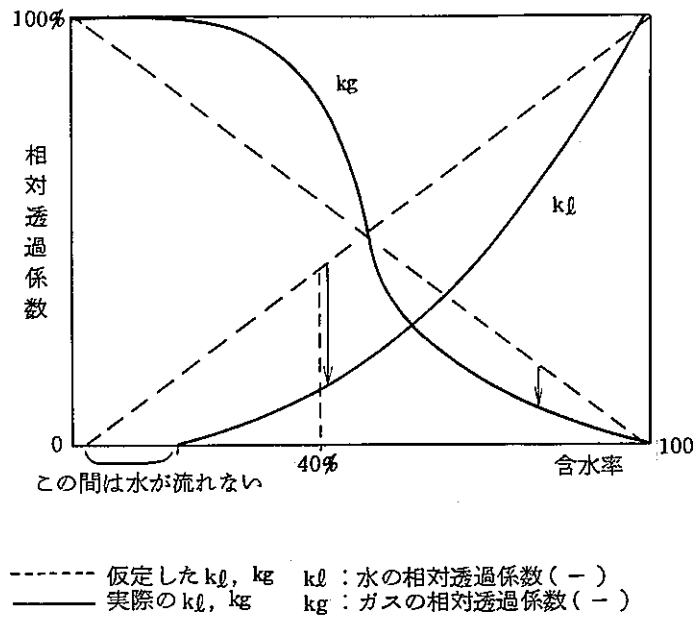


図 2.1 - 4 二相流におけるガスと水の相対透過係数

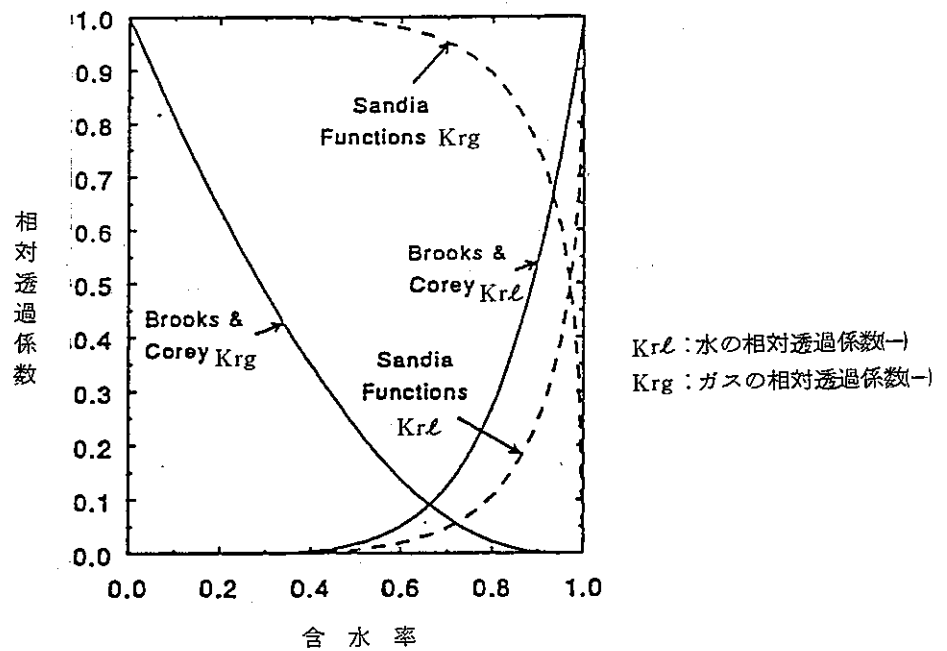


図 2.1 - 5 Brooks & Corey と Sandia の含水率と水／ガスの相対透過係数の関係

表 2.1-7 環境条件によるパラメータ値の変化 (MA固化体, I-129はハル・エンドピース)

| ケース<br>パラメータ                           | 対象核種                                       | 基本ケース                                                                 | pH、Ehを考慮<br>した場合                                                 | 有機物の影響を<br>考慮した場合                                              |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 溶解度<br>(mol / ℓ)                       | Am-241<br>Np-237<br>U-233                  | $4.1 \times 10^{-10}$<br>$1 \times 10^{-8}$<br>$4.3 \cdot 10^{-9}$    | $3 \times 10^{-10}$<br>$3 \times 10^{-8}$<br>$6 \times 10^{-10}$ | $1 \times 10^{-6}$<br>$5 \times 10^{-6}$<br>$5 \times 10^{-6}$ |
| 充填材<br>Kd (ml / g)                     | C-14<br>I-129<br>Am-241<br>Np-237<br>U-233 | 0<br>1<br>$6.6 \times 10^3$<br>$1.2 \times 10^2$<br>$9.3 \times 10^1$ | 2<br><div>1001000</div> <div>2</div> <div>50</div> <div>2</div>  | —<br>—<br><div>66</div> <div>1.2</div> <div>0.93</div>         |
| 天然バリアの<br>地下水流速<br>(ダルシー流速)<br>(m / s) | Am-241<br>Np-237<br>U-233                  | $1 \times 10^{-10}$                                                   | <div><math>1 \times 10^{-9}</math></div>                         |                                                                |



: 本年度試算対象

(3) T R U固有現象を考慮したパラメータ値を用いた線量当量又はフラックスの一次元核種移行試算（感度解析）

(i) 天然バリアの地下水流速変化の場合

地下水流速が10倍となった場合について、これまでに実施されている平成2年度の性能評価試算におけるMA固化体基本ケースの線量当量試算結果を基準として影響の評価を行った。その結果比較を図 2.1-6に、また人工バリア出口及び天然バリア出口での最大フラックス及びその値に達する年数を表 2.1-8に示す。

表 2.1-8 人工／天然バリア出口での最大フラックス及び年数  
(MA, 4 N+1, 地下水流速10倍)

| 試算結果<br>ケース     | 核 種      | 人 工 バ リ ア               |                   | 天 然 バ リ ア               |                   |
|-----------------|----------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
|                 |          | 最大フラックス *)<br>(C i / y) | 年<br>(y)          | 最大フラックス *)<br>(C i / y) | 年<br>(y)          |
| 基本ケース           | N p -237 | $2.36 \times 10^{-6}$   | $5.0 \times 10^4$ | $6.02 \times 10^{-7}$   | $7.0 \times 10^5$ |
|                 | U -233   | $1.02 \times 10^{-6}$   | $7.0 \times 10^4$ | $6.61 \times 10^{-8}$   | $7.0 \times 10^5$ |
| 地下水流速<br>10倍ケース | N p -237 | $2.36 \times 10^{-6}$   | $5.0 \times 10^4$ | $1.77 \times 10^{-6}$   | $1.0 \times 10^5$ |
|                 | U -233   | $1.02 \times 10^{-6}$   | $7.0 \times 10^4$ | $1.98 \times 10^{-7}$   | $3.0 \times 10^5$ |

\*) フラックスと線量当量は比例関係にあるため、相対的評価  
では、どちらも同じとなる。

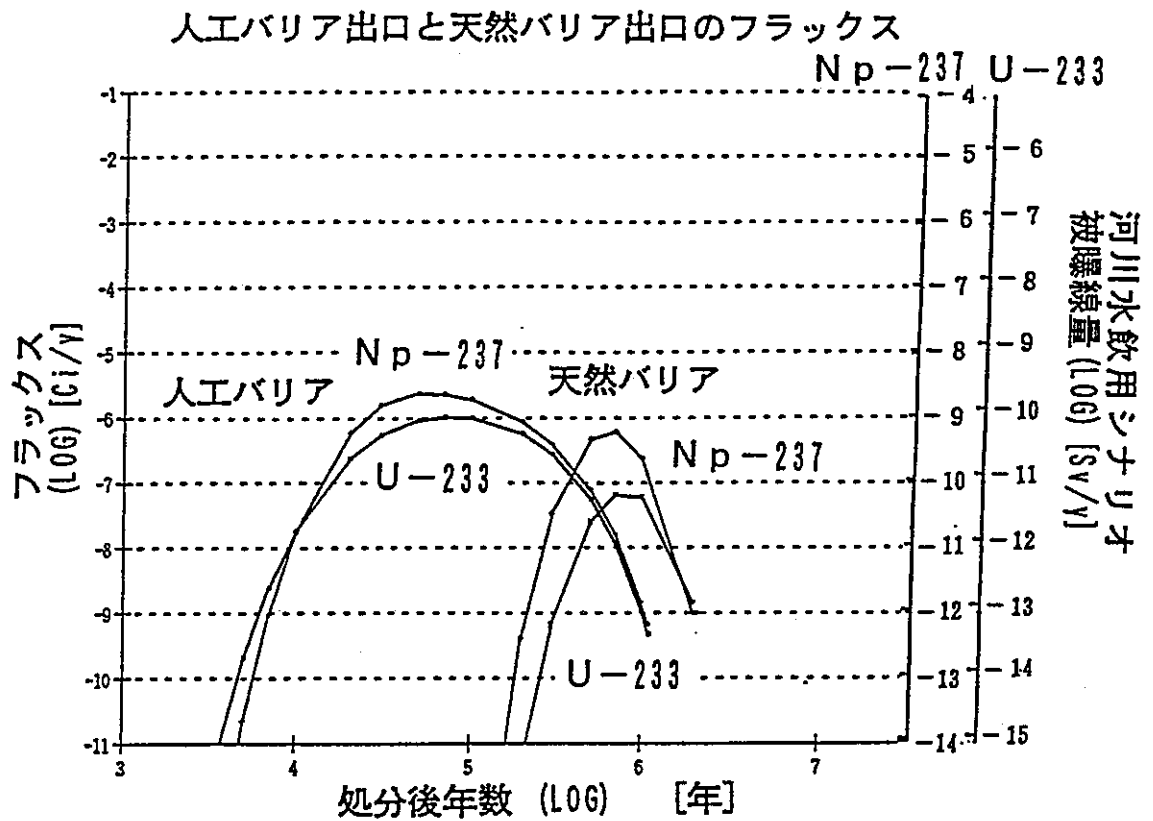
同表より、地下水流速10倍ケースにおける天然バリア出口フラックス最大値は、N p -237 で2.9 倍大きく、致達時間も  $6 \times 10^5$  年早くなることがわかる。

一方、P A G I S (clay)による偏導関数法を用いた感度解析評価値：SではN p -237 で

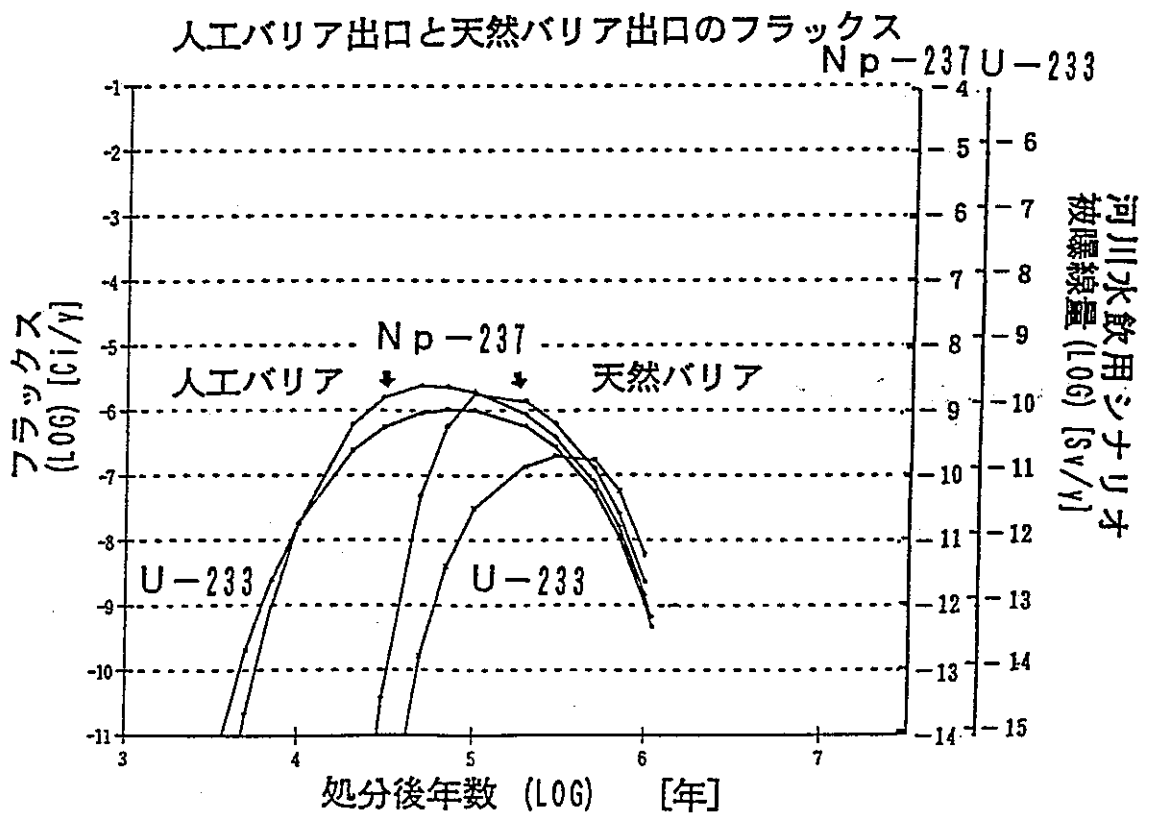
$$S = \frac{\left( \frac{Y' - Y}{Y} \right)}{\left( \frac{X' - X}{X} \right)} = \frac{1.94}{9} = 0.22$$

$\begin{matrix} Y & ; & \text{フラックス (基本ケース)} \\ Y' & ; & \text{フラックス (変化後の値)} \\ X & ; & \text{対象パラメータ (基本ケース)} \\ X' & ; & \text{対象パラメータ (変化後の値)} \end{matrix}$

となり、地下水流速の変化割合に比べて、ニアフィールド出口フラックスの変化がそれほど大きくないことがわかる。



(a) 基本ケース



(b) 地下水流速 10 倍ケース

図 2.1 - 6 地下水流速を 10 倍にした場合の被曝線量経年変化  
(MA 固化体, 4N+1 系列)

(ii) 溶解度変化の場合

MA固化体の4N+1系列核種を対象に、溶解度を有機物含有の場合の最大値を用いて人工バリア出口フラックスを試算し、基本ケースと比較した。

図2.1-7 にフラックス経年変化を示し、表2.1-9 に人工バリア出口における最大フラックス及びその値に達する年数を示す。

表2.1-9 人工バリア出口での最大フラックス及び年数  
(MA, 4N+1, 有機物存在下の溶解度)

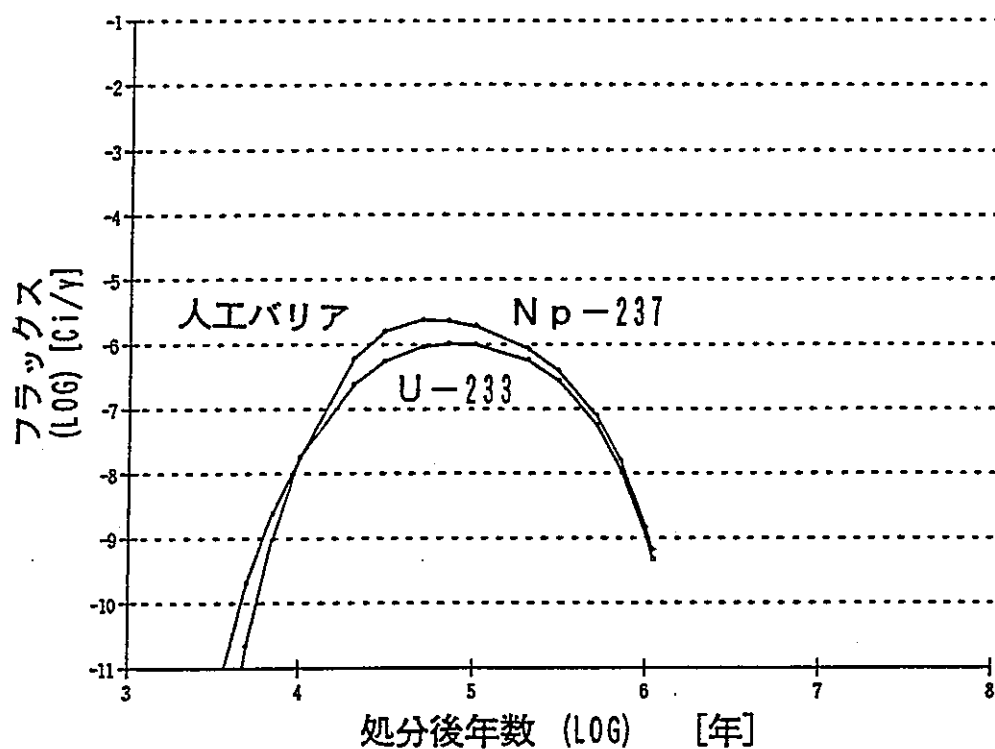
| 試算結果<br>ケース                | 核 種       | 人 工 バ リ ア             |                   |
|----------------------------|-----------|-----------------------|-------------------|
|                            |           | 最大フラックス<br>(ci/y)     | 年<br>(y)          |
| 基 本 ケ ー ス                  | N p - 237 | $2.36 \times 10^{-6}$ | $5.0 \times 10^4$ |
|                            | U - 233   | $1.02 \times 10^{-6}$ | $7.0 \times 10^4$ |
| 有 機 物 存 在 下<br>の 溶 解 度 変 化 | N p - 233 | $4.37 \times 10^{-6}$ | $5.0 \times 10^4$ |
|                            | U - 233   | $1.87 \times 10^{-6}$ | $7.0 \times 10^4$ |

同表より、有機物存在により溶解度をAm-241で約2400倍、Np-237で500倍、U-233で約1100倍とした場合、人工バリア出口の最大フラックスは2倍程度となり、ピークの到達時間は同じとなることがわかる。PAGIS (clay)で用いられたS値をNp-237に適用すると

$$S = \frac{\left( \frac{Y' - Y}{Y} \right)}{\left( \frac{X' - X}{X} \right)} = 0.0017$$

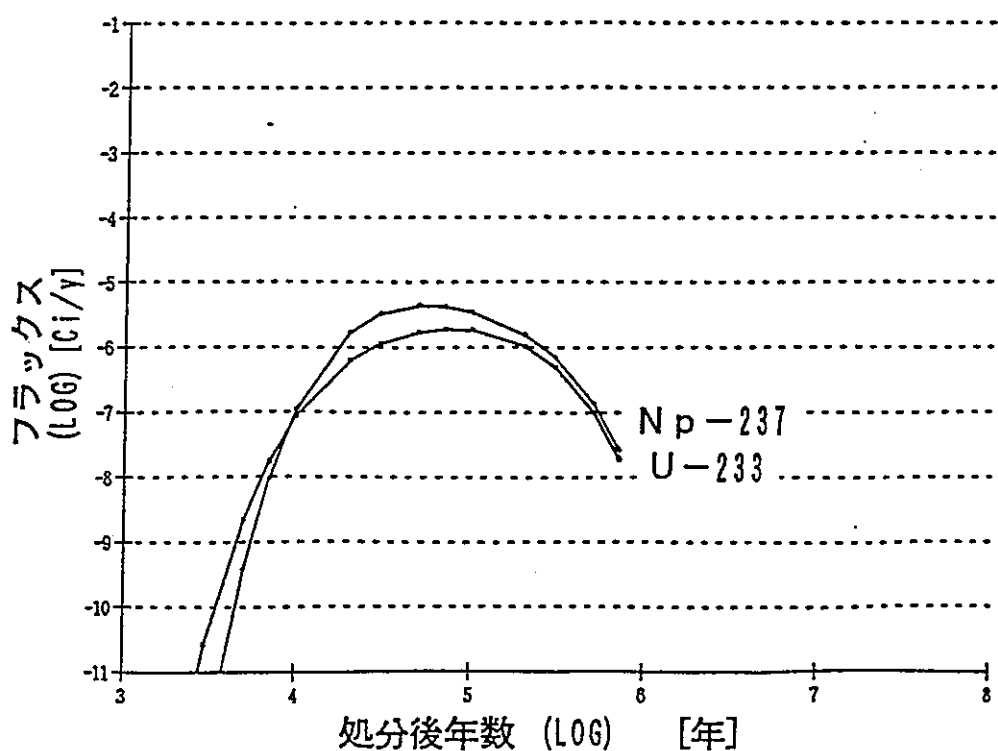
となり、溶解度の変化が大きいかかわらずフラックスに対する感度は、地下水流速（核種平均移行速度）を10倍した場合に比べて大きくないことがわかる。

# 人工バリア出口のフラックス



(a) 基本ケース

# 人工バリア出口のフラックス



(b) 有機物存在下の溶解度考慮ケース

図 2.1 - 7 有機物存在下の溶解度を考慮した人工バリア出口フラックス経年変化 (MA 固化体)

(iii) Kd 変化の場合

(a) I-129

ハル・エンドピースセメント固化体中の I-129 を対象に、分配係数を100倍及び1000倍と大きくした場合について試算し、基本ケースと比較した。

その結果を図2.1-8 に示す。これより河川水飲用の場合、線量当量が Kd = 100 倍で1ケタ、1000倍で2ケタ下がり、人工バリアの収着機能を大きくすると線量当量が小さくなること、及びピークに到達する時間が5～10倍遅れることがわかる。

表2.1-10に人工バリア出口及び天然バリア出口での最大フラックス及びその値に達する年数を示す。

表2.1-10 人工／天然バリア出口の最大フラックス及び年数  
(I-129, ハルエンドピース, Kd =100, 1000倍)

| 試算結果<br>ケース | 核種    | 人 工 バ リ ア            |                   | 天 然 バ リ ア            |                   |
|-------------|-------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
|             |       | 最大フラックス*)<br>(Ci/y)  | 年<br>( y )        | 最大フラックス*)<br>(Ci/y)  | 年<br>( y )        |
| 基本ケース       | I-129 | $2.0 \times 10^{-5}$ | $3.0 \times 10^3$ | $1.7 \times 10^{-5}$ | $1.3 \times 10^4$ |
| kd= 100倍    | I-129 | $1.4 \times 10^{-6}$ | $3.0 \times 10^4$ | $1.4 \times 10^{-6}$ | $5.0 \times 10^4$ |
| kd=1000倍    | I-129 | $1.6 \times 10^{-7}$ | $5.0 \times 10^5$ | $1.6 \times 10^{-7}$ | $1.6 \times 10^7$ |

同表より、Kd=100倍、1000倍の場合の天然バリア出口での感度解析評価値：Sは

Kd=100 倍の場合

$$S = \frac{\left( \frac{Y' - Y}{Y} \right)}{\left( \frac{X' - X}{X} \right)} = -0.009$$

Kd=1000倍の場合

$$S = -0.001$$

となり、両者ともKd の変化幅の割合に対するフラックスの変化の割合が4 N + 1 系列核種を用いた地下水流速の変化の場合より小さく溶解度の変化の場合より大きいことがわかる。近年ヨウ素の移行遅延のための吸着材の開発やセメント媒体中でのより詳細なKd 実験結果等が重要視されており、この試算値によって一定のフラックスを下げるに要するKd 値の増加割合がほぼ把握できると考えられる。

ハル・エンドピース被曝線量経年変化（セメント分配ケース）

井戸水飲用シナリオの場合の  
線量当量 (LOG) (Sv/y)

河川水飲用シナリオの場合の  
線量当量 (LOG) (Sv/y)

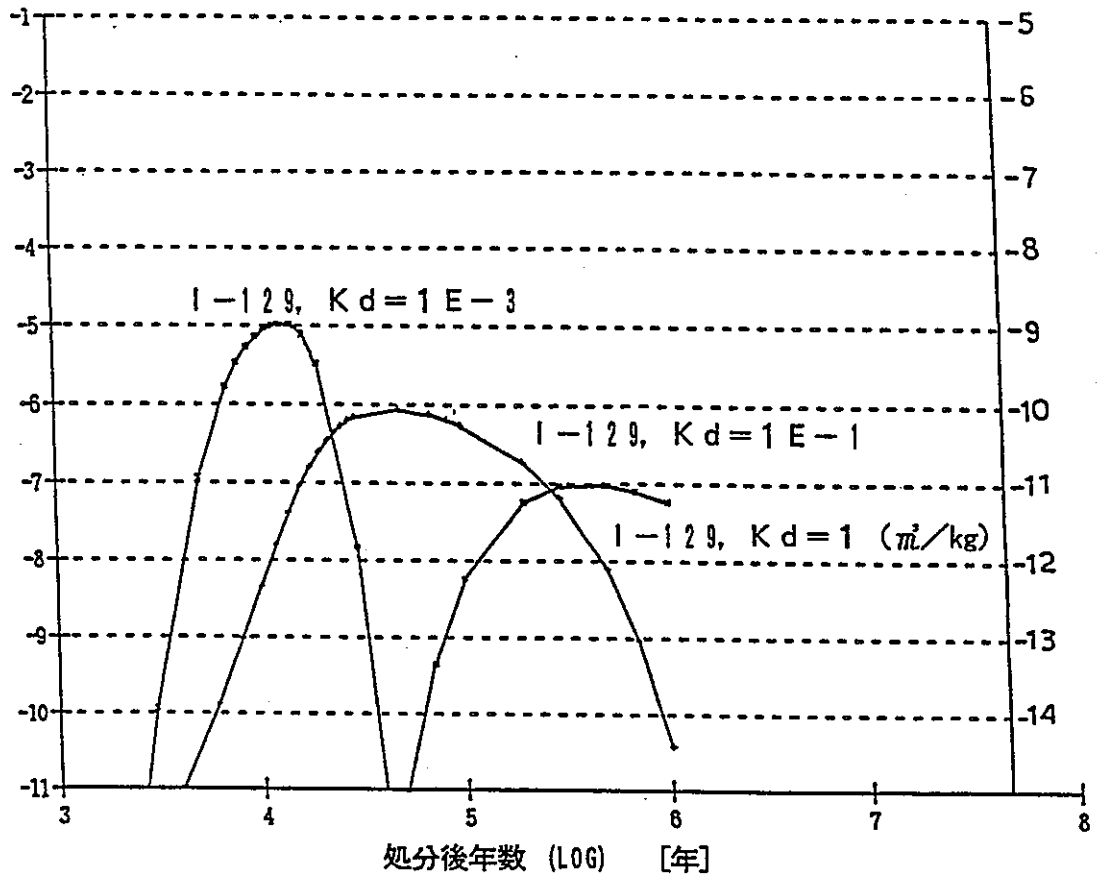


図 2.1-8  $Kd$  を 100 倍, 1000 倍にした場合の被曝線量経年変化 (ハンエンドピース)

(b)  $4N+1$

MA固化体について人工バリアの $K_d$ を、 $pH=12$ で $Eh=-410mV$ 環境下での文献値、及び有機物存在下での文献値を用いて試算した結果を図2.1-9、図2.1-10に示す。また、表2.1-11に人工バリア出口の最大フラックス及びその値に達する年数を示す。この結果から、 $pH$ 、 $Eh$ の変化を考慮した場合、基本ケースに比べてピーク値が2倍大きくなり、ピークに達する年数が2倍早くなること、及び有機物存在下ではピーク値が3倍大きくなり、年数が10倍早くなることがわかった。

表2.1-11 人工バリア出口での最大フラックス及び年数  
(MA,  $4N+1$ ,  $pH/Eh$ を考慮した $K_d$ )

| 試算結果<br>ケース                     | 核 種    | 人 工 バ リ ア             |                   |
|---------------------------------|--------|-----------------------|-------------------|
|                                 |        | 最大フラックス               | 年                 |
| 基 本 ケ ー ス                       | Np-237 | $2.36 \times 10^{-6}$ | $5.0 \times 10^4$ |
|                                 | U-233  | $1.02 \times 10^{-6}$ | $7.0 \times 10^4$ |
| $pH$ , $Eh$ を考慮<br>した $K_d$ の場合 | Np-237 | $5.68 \times 10^{-6}$ | $3.0 \times 10^4$ |
|                                 | U-233  | $1.54 \times 10^{-6}$ | $2.0 \times 10^4$ |
| 有機物存在下の<br>$K_d$ の場合            | Np-237 | $7.55 \times 10^{-6}$ | $3.0 \times 10^3$ |
|                                 | U-233  | $5.34 \times 10^{-8}$ | $7.0 \times 10^3$ |

PAGIS (clay)で用いられた $S$ 値は、Np-237を対象にすると、 $pH$ 、 $Eh$ を考慮した場合、

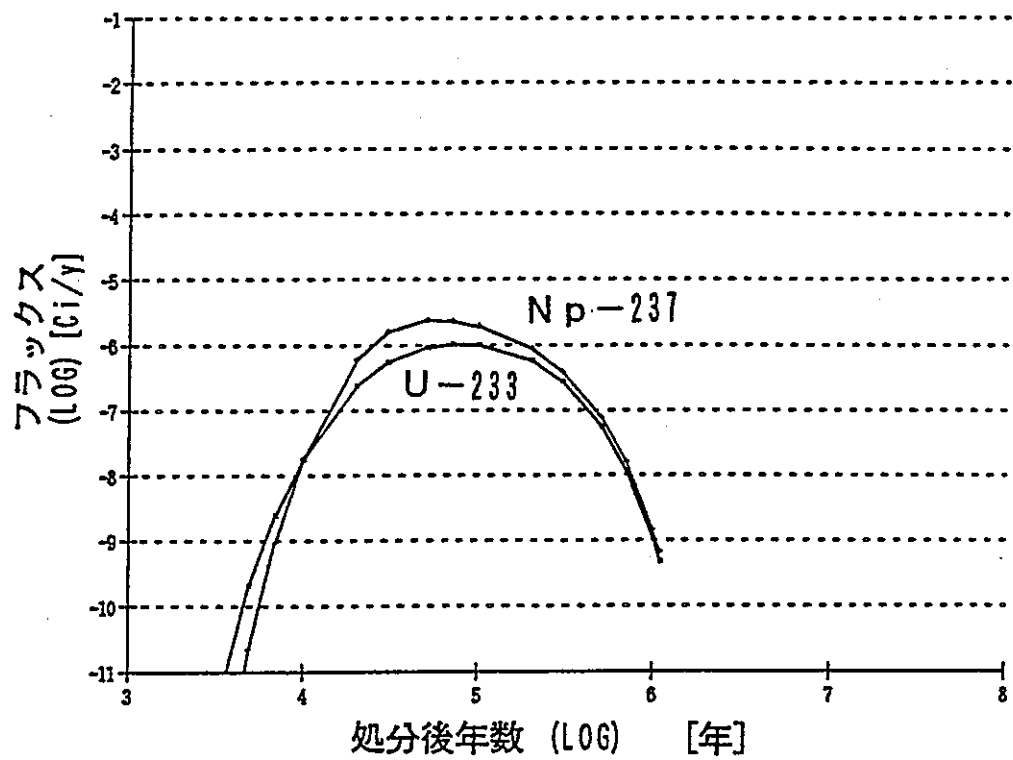
$$S = \frac{\left( \frac{Y' - Y}{Y} \right)}{\left( \frac{X' - X}{X} \right)} = 2.4$$

有機物を考慮した場合

$$S = \frac{\left( \frac{Y' - Y}{Y} \right)}{\left( \frac{X' - X}{X} \right)} = 2.2$$

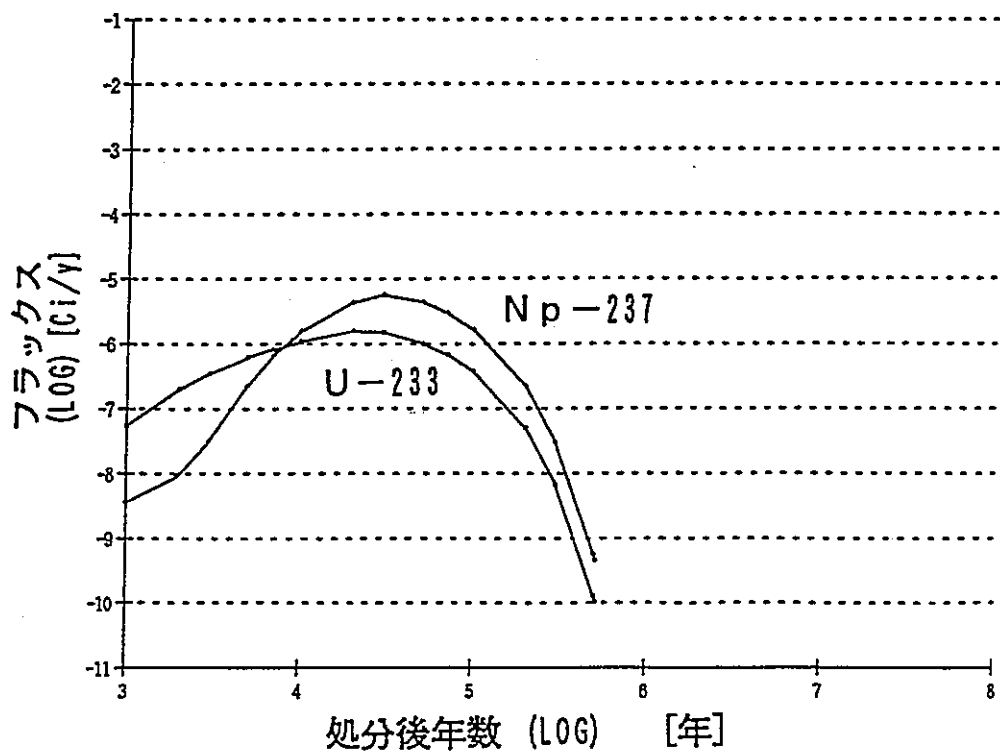
となり、両者ともほぼ同じ $S$ 値で、この範囲の $K_d$ の変化に対するフラックスの感度は溶解度の変化を想定した変化の場合に比較して大きいことを示す。

# 人工バリア出口のフラックス



(a) 基本ケース

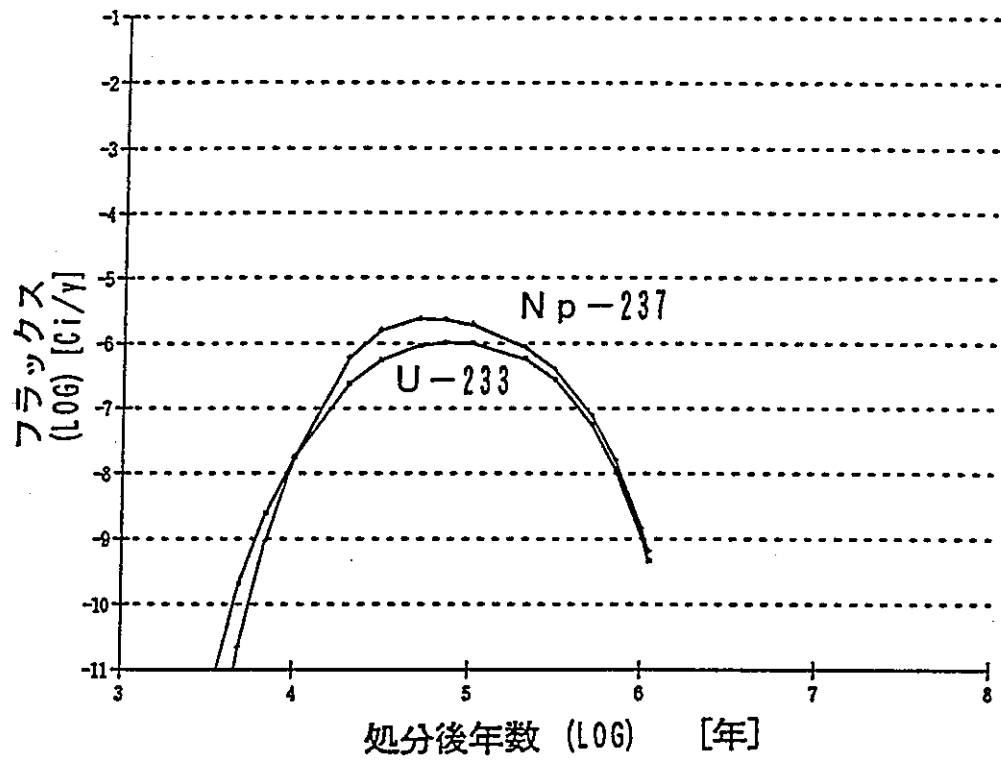
# 人工バリア出口のフラックス



(b) pH及びEhを考慮した場合

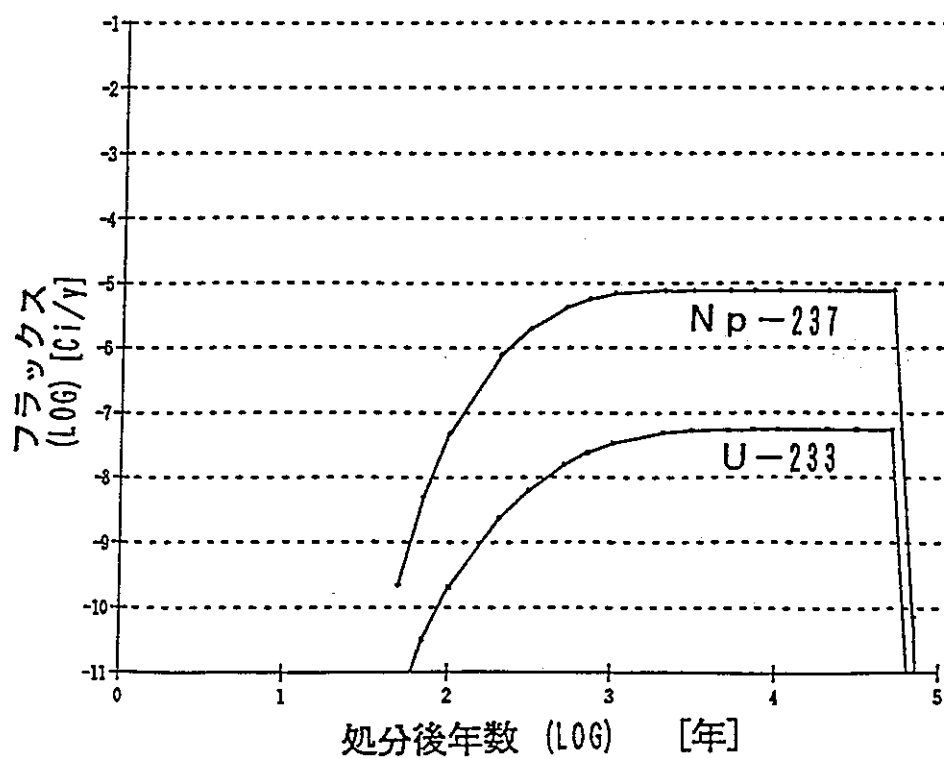
図 2.1 - 9 pH及びEhを考慮したKd変化による人工バリア出口フラックス経年変化 (MA固化体)

# 人工バリア出口のフラックス



(a) 基本ケース

# 人工バリア出口のフラックス



(b) 有機物を考慮した場合

図 2.1 - 1 0 有機物を考慮した  $K_d$  変化による人工バリア出口フラックス経年変化 (MA 固化体)

#### (4) まとめと今後の課題

TRU廃棄物の処分の安全性を評価する上で、クリティカルになる可能性が高いと考えられるC-14, I-129, 4N+1系列核種を対象に溶解度, 人工バリアのKd, 天然バリアの地下水流速について, 現在考えられるTRU廃棄物処分環境下でのパラメータに対する影響因子のうち線量当量に大きな影響を与えると考えられるものを抽出し, 変動巾を想定して次元核種移行計算を実施した。

その結果をまとめて表 2.1-12に示す。ガス発生による移流速度増加等を考慮して天然バリアの地下水流速を10倍に仮定した場合, 地層中の平均核種移行速度が10倍となることから, 天然バリアの出口フラックスピーク値は約3倍大きくなり, 到達時間も $6 \times 10^5$ 年早くなることがわかった。

溶解度については, MA固化体の4N+1系列に対して有機物の存在により $10^2 \sim 10^3$ 倍大きくなると仮定した場合, 人工バリア出口の最大フラックスは2倍程度の増加となり, 到達時間はほぼ同じとなった。これは, 処分場内地下水の核種濃度の増加により, 核種は急速に充填材中に移行するものの, 極短期間で廃棄体中の放射性核種が枯渇するため, 充填材のフラックス低減効果により流入フラックスのピークが低下するためと考えられる。

又, 充填材のKdについて, ハル・エンドピースセメント固化体のI-129を対象に吸着剤等の添加を考慮して, 仮に100倍, 1000倍のKdが得られた場合を想定して試算した結果, 公衆の線量当量値は見かけの拡散係数の低下による充填材からの放出フラックスの低下により100倍で1ケタ, 1000倍で2ケタ減少し, ピークに達する時間も5~10倍と長くなることがわかった。I-129に対しては充填材のKd値の影響が大きいことから, 収着性に優れた充填材の開発は, 処分の安全性に対して寄与が大きいものと予想される。

一方, Kdについて, MA固化体の4N+1系列を対象に高pH, 低Ehの条件を考慮した場合と有機物の存在を考慮した場合について1~2桁程度Kd値が低下したケースの試算を行った結果, 人工バリア出口フラックスのピーク値は2~3倍大きくなった。一方, ピークに達する時間もpHの上昇, Ehの低下を考慮した場合で2倍となる。又, 有機物存在下の場合ではNp-237のKd値を1/100とすることにより, 基本ケースでは $5 \times 10^4$ 年付近にピーク値が存在するのに対して, 充

填材中のフラックスが早期に上昇し、1000年付近で基本ケースの3倍のフラックスにより定常に達している。

以上、TRU廃棄物処分環境下で、線量当量に影響を与える地下水流速、溶解度、 $K_d$ 等の重要パラメータのうち、特に $K_d$ の影響が大きいと評価されているが、可能な $K_d$ 増加巾の把握と、その条件下における効果を明らかにするため、今後この $K_d$ を大きくする吸着剤等の性能、拡散試験データの収集等が必要であると考えられる。

また、その他のパラメータについても、表2.1-12に示すように環境条件の変化による変動巾が大きい場合には核種移行に対して、重大な影響を及ぼす場合もあることから、今後これらのパラメータの変動に対しても鋭意試験データを蓄積する必要がある。

表 2.1-12 環境条件によるフラックスピーク値の変化  
(MA固化体, I-129はハル・エンドピース)

| ケース<br>パラメータ                      | 対象核種   | パラメータ変化率             |                      | ピーク値変化率      |        |
|-----------------------------------|--------|----------------------|----------------------|--------------|--------|
|                                   |        | pH, Ehを考慮            | 有機物の影響               | pH, Ehを考慮    | 有機物の影響 |
| 溶解度変化                             | Am-241 |                      | $2.4 \times 10^3$    |              | —      |
|                                   | Np-237 |                      | $5.0 \times 10^2$    |              | 1.9**  |
|                                   | U-233  |                      | $1.2 \times 10^3$    |              | 1.8**  |
| 人工バリアの<br>Kd変化                    | I-129  | 100 1000             | —                    | 0.08* 0.009* |        |
|                                   | Am-241 | $3.0 \times 10^{-4}$ | $1.0 \times 10^{-2}$ | —            |        |
|                                   | Np-237 | $4.2 \times 10^{-1}$ | $1.0 \times 10^{-2}$ | 2.4**        | 3.2**  |
|                                   | U-233  | $2.2 \times 10^{-2}$ | $1.0 \times 10^{-2}$ | 1.5**        | 5.2**  |
| 天然バリアの<br>地下水流速<br>変化<br>(ダルシー流速) | Am-241 | 10                   |                      | —            |        |
|                                   | Np-237 |                      |                      | 2.9*         |        |
|                                   | U-233  |                      |                      | 2.9*         |        |

注) 表中斜線部分は検討対象外とした。

ピーク値変化率は、(今回試算値/基本ケースピーク値)として算出

\* : 天然バリア出口  
\*\* : 人工バリア出口

### 2.1.2 現象の抽出

前章で抽出され性能評価対象とすべきと考えられた現象より、特にT R U廃棄物の処分において考慮すべき特有な現象、あるいは性能評価上顕著な影響を及ぼすと考えられる現象を抽出し、評価手法の調査検討対象とする。

#### (1) 基本項目の構成と現象の抽出手順

T R U廃棄物の地層処分において独自、優先的に研究開発を実施すべき現象の抽出は以下の手順に従って行うものとする。

上記のようにT R U廃棄物の処分研究開発を進める上では、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の成果を取り込みつつ、効率的な研究開発を進める必要があるとされている。したがって、まずこれらとの対応を明確にするため、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発課題の体系を参考として、T R U廃棄物およびその処分システムの特殊性を反映した、T R U廃棄物の処分において考慮すべき現象の分類、整理を行う必要がある。次にこの分類を基に、評価の必要な事象・プロセスに関するデータの取得、評価モデルの開発状況を、T R U廃棄物および高レベル放射性廃棄物等に対して調査、整理し、各廃棄物に対して現時点で研究開発が必要と考えられている現象を確認する。さらにこれらの実施状況を勘案することにより、T R U廃棄物として独自、優先的に研究開発の必要な課題を抽出、付加し、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発内容等との重複を避けると共に、それらと相互補完する研究会発対象を選定すべく検討を進めるものとする。

T R U廃棄物の処分を実施する上で重要と考えられる現象を分類、整理する際には、T R U廃棄物を埋設処分する上での長期安全確保の考え方にに基づき、これと共通部分の多い高レベル放射性廃棄物の性能評価研究体系、および諸外国における研究項目を参考にすると共に、前述の廃棄体、処分概念を基礎としたT R U廃棄物処分に特徴的な現象、昨年度までに実施した性能評価試算結果<sup>15, 16)</sup>も考慮した。

上記の点を考慮することにより、T R U廃棄物およびその処分システムの基本的特徴は研究開発項目体系の基礎とすべき高レベル放射性廃棄物との比較の上で、表2.1-13のように示すことができる。

処分に係わる研究開発課題の抽出に当たって考慮すべき T R U 廃棄物および処分システムの特徴は、以下のように示すことができる。

- ①放射能濃度及び含有核種の種類が廃棄物により異なり幅広く分布する。また、データが未取得であるものも多い。
- ②安全評価上の重要核種としてアクチニドとその娘核種のほか、I-129、C-14等が加わる。
- ③廃棄物の処理方法が未定、あるいは長期性能が未評価の廃棄体も多い。
- ④廃棄体中に含まれる有機物、金属等、およびその劣化生成物による核種の溶解度、収着性への影響、ガス発生による影響の評価が必要。また、コンクリート等 H L W とは異なる人工バリア材料が多用される場合が考えられる。

このように、高レベル放射性廃棄物との対比という観点での T R U 廃棄物処分の特徴は、廃棄物の種類が多様であるところに起因する廃棄体の物理的、化学的特性の相異、あるいは人工バリア材料の相異に起因するものであることがわかる。

これに対して低レベル放射性廃棄物との比較においては、上記の特徴のうち②～④について共通する部分があり、原子炉施設から発生する低レベル放射性廃棄物の処分に対する研究開発によって得られた研究成果を応用することが可能な分野もある。しかしながら、②については得られているデータが浅地中処分に対応するものであることから、処分環境条件の相違による異なる条件下でのデータ取得が必要となる。また、③に対しては、浅地中処分においては人間の侵入による被ばくが問題のないレベルとなるまでの期間、管理を行うことが前提であることが多いため、人工バリアに長期の性能を期待しない場合が多い。したがって、T R U 廃棄物の処分において人工バリアに新たに長期の性能を期待する場合には、その機能に対するモデル化、データの取得が必要となる。さらに、④に関してはキレート剤の影響等、共存物質によるバリア機能への影響について参考となるデータが得られているが、②と同様の理由により劣化生成物による影響などについては長期の影響に対して評価された例は少なく、また得られているデータが短半減期  $\beta \gamma$  核種を中心としていることもあって、必要なデータが総て得られているわけではない。

表2.1-13 H L Wとの比較の上での T R U 廃棄物の特徴

| 項 目                                         | 内 容                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.<br>放射能濃度，含有核種                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄物の種類により放射能濃度は幅広く分布。</li> <li>・放射能濃度，含有核種について詳細なデータが採取されていないものも多い。</li> </ul>                                                                |
| 2.<br>安全評価上の重要核種                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ I -129，場合により C -14 等の低収着性 <math>\beta \gamma</math> 核種が線量当量に大きく寄与する。</li> </ul>                                                              |
| 3.<br>廃棄体性能<br>(パラメータの成立性)                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄体の処理方法が未定，核種溶出制限機能が不明なものも多い。</li> <li>・長期性能が未評価，困難。</li> </ul>                                                                              |
| 4.<br>共存物質による影響<br>(パラメータの成立性)<br>(モデルの成立性) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄体により多種多様な有機物，金属等を含む。</li> <li>・核種の溶解度，収着特性に影響する物質を含む。</li> <li>・ H L W とはバリアの構成材料が異なるものもある。</li> <li>・気体等の発生によるバリアの長期性能評価手法が未確立。</li> </ul> |

以下に高レベル放射性廃棄物との対応を考慮した， T R U 廃棄物地層処分のニアフィールド関連研究開発項目の構成を1.2.2の検討結果に基づき整理した。

表 2.1 - 1 4 主な性能評価関係研究開発課題

|                                 |                                                                                    |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1) ソースターム                       |                                                                                    |
| 長半減期低収着性 $\beta$ $\gamma$ 核種の存在 | I-129, C-14 に対する各種現象に係わるデータの収集                                                     |
| 2) 固化体からの核種放出                   |                                                                                    |
| 多様な固化媒体の存在                      | アスファルト, セメント等固化媒体の長期浸出／核種保持／劣化特性                                                   |
| 不均質固体廃棄物の存在                     | 不均質固化体の浸出特性                                                                        |
| 有機物（水）の存在                       | 微生物活動によるガス, 分解生成物発生の影響<br>放射線分解によるガス, 分解生成物発生の影響<br>地球化学的条件の変化                     |
| 金属の存在                           | 金属の腐食によるガス, 腐食生成物発生の影響<br>地球化学的条件の変化<br>栄養素としての微生物活動への影響                           |
| 3) 人工バリア中の核種移行                  |                                                                                    |
| 有機物の存在                          | 錯体・コロイド形成による核種移行特性への影響<br>栄養素としての微生物活動への影響<br>ガス, 分解生成物による核種移行特性への影響<br>地球化学的条件の変化 |
| 金属の存在                           | 栄養素としての微生物活動への影響<br>ガス, 腐食生成物による核種移行特性への影響<br>地球化学的条件の変化                           |
| セメントの存在                         | 化学的緩衝作用による処分場環境の変化<br>地球化学的条件の変化<br>溶出イオンによる核種移行特性への影響<br>溶出イオンによるバリア間相互作用         |
| ベントナイトの存在                       | 溶出イオンによるバリア間相互作用                                                                   |
| 可溶性塩類の存在                        | 核種移行特性への影響<br>栄養素としての微生物活動への影響                                                     |
| ガス発生による影響                       | ガスの移行による核種移行の影響<br>ガス圧の上昇によるバリアへの影響                                                |

なお、課題の検討に当たって、現時点ではT R U廃棄物は高レベル放射性廃棄物と同様の地層環境に処分されるものとしているところから、地層処分研究開発項目として高レベル放射性廃棄物の処分研究で実施されており、明らかに重複する以下の範囲は当初より検討の対象外として除外した。

- 直接放出シナリオに係る各種事象・プロセス、及び隔離性評価
- ファーフィールド現象における地下水流動
- 地質環境調査技術

また、T R U廃棄物を埋設処分する場合には、高レベル廃棄物と同一サイトに統合して処分されるケースも考えておく必要があることから、性能評価研究にはこの点も含めた評価研究基本項目に対して、T R U廃棄物の地層処分に関し評価対象となる現象を分類、整理した。

以上の基本的特徴を踏まえ、T R U廃棄物独自にあるいは優先的に実施すべき研究開発項目は、ニアフィールドにおける地下水移行シナリオに対する課題のほか、以下の範囲を主体として摘出されることとなる。

－ソースターム研究－

- ・ T R U廃棄物は多様な種類によって構成され、高レベル放射性廃棄物では組成比の小さいI-129、C-14等の核種を多く含むことから、各廃棄物に対して核種インベントリ、物理的・化学的特性等、固有の特性を把握するために実施する“ソースタームの明確化”

－性能評価研究－

- ・ 多様な処理技術が適用される各種T R U廃棄物（固化体）のバリア機能を明らかにするため、廃棄体の劣化、不均質性、ガスの蓄積・移行の影響を含め、廃棄体の長期浸出特性を試験、評価する“廃棄体からの溶解、浸出特性の把握”
- ・ コンクリートの多用、有機物の含有等によるT R U廃棄物処分場特有の条件における核種の溶解度、拡散特性、収着特性、およびこれらに対するコロイド、ガス発生の影響について試験、モデル化を行い、核種移行を評価するための“人工バリア中の核種移行挙動の把握”
- ・ T R U廃棄物及び人工バリア構成物質に対する微生物分解、その他腐食等の化学変化による劣化生成物の生成、pH、Ehの長期変化についてモデル化し、処分場環境条件の変化を評価するための“処分環境条件変化に係わる現象の把握”
- ・ 多様な有機物等を含むT R U廃棄物、及びセメント等の人工バリア構成物質、あるいはその劣化生成物による錯体、コロイドの形成、ガスの移行による核種移行への影響評価、また高レベル放射性廃棄物では組成比の小さいI-129、C-14等の核種に対する地下水中移行評価に必要なデータを採取するための“地層中の核種移行”

－全体性能評価研究－

- ・ 各種の個別モデルを適切に組合せることにより、多種多様な廃棄物によって

構成される T R U 廃棄物の特性，及び H L W の地層処分とは異なる人工バリアを用いることによる，T R U 廃棄物特有の処分環境条件を反映可能な評価手法を構築する“総合的評価手法の確立”

- ・高レベル放射性廃棄物など他の種類の放射性廃棄物と一括処分する処分概念に対して，各廃棄物相互の特性によって生じる影響を評価する“処分方法の統合に係わる研究”

－処分技術開発に係る課題－

- ・高レベル放射性廃棄物に比較して発熱性の小さい T R U 廃棄物は処分空間の有効利用等のため，サイロ，ボルト等の比較的大断面の空洞に処分する概念が一般的であり，これらの地下深部大規模空洞の設計技術の評価，開発等を実施する“処分システムの設計研究”
- ・地下深部大規模空洞掘削技術・閉鎖技術，設置される人工バリア製作技術，あるいは操業時に必要となる移送，定置技術等の評価，開発を行う“処分技術開発”

－研究管理システムに係る課題－

- ・高レベル放射性廃棄物同様多分野にわたる多量の研究成果を一元的に管理し，研究の進展により柔軟な研究開発計画の策定を可能とするシステム，及び処分対象となる各種廃棄体の膨大な特性データを収集管理するシステムの開発を実施する“研究管理システム”

－地質環境条件に係る課題－

- ・T R U 廃棄物は高レベル放射性廃棄物との核種濃度の差により，深度，地質等地層に関する要求事項が異なる場合も考えられる。この場合必要となる，浅地中処分より深く深地層処分より浅い，数十mから数百mまでの深度における地下水化学，水理特性，岩盤特性のデータを整備する“地質環境条件に関する研究”

## I ソースターム研究

### a) 廃棄体特性評価

- ①核種インベントリ
- ②物理的特性
- ③化学的特性（化学組成，分子構造，核種保持機能等）

### b) 廃棄体技術開発

- ①廃棄体製造技術
- ②品質保証技術

## II 性能評価研究

### a) シナリオ研究（人間侵入，浅地層シナリオ解析等）

### b) ニアフィールド核種移行

#### i 固化体からの核種放出

- ①廃棄体からの放射性核種の浸出（固化体の劣化，微生物の影響，不均一性，ナチュラルアナログ含む）
- ②ガス発生（微生物，腐食等）

#### ii 人工バリア中の核種移行

- ①拡散移行（バリア材劣化の影響）
- ②溶解度（有機物，劣化生成物，バリア材の影響）
- ③収着特性（有機物，劣化生成物の影響，バリア材の影響， $I^{129}$ ， $C^{14}$ ）
- ④コロイド生成・移行（錯体）
- ⑤ガスの蓄積・移行
- ⑥バリア材の劣化（ベントナイトとコンクリートの両立性，有機物の微生物分解等）

### c) ファーフィールド核種移行

- ①移流分散（浅地層処分の場合の不飽和水理・核種移行）
- ②収着特性（有機物，劣化生成物の影響， $I^{129}$ ， $C^{14}$ ）
- ③コロイド生成・移行
- ④ガスの移行

d) 全体システム性能評価

(評価手法の開発, 総合性能評価手法の整備, 総合性能評価)

Ⅲ 処分技術開発

a) 処分システム設計

①人工バリアシステム (高度化含む)

②処分場 (大空洞, 個別・総合方式)

b) 技術開発

①人工バリア製作施工技術

②建設・操業・閉鎖技術 (大空洞等)

③経済性評価

Ⅳ 地質環境条件の研究 (比較的浅い地層への処分の場合)

①地下水化学 (酸化-還元雰囲気変遷)

②浅層水理 (不飽和水理, 還流)

③岩盤特性 (浅地層)

## 2.2 諸現象のモデル化に関する調査

本節では1.2において摘出したニアフィールドにおける核種移行に対する影響因子について、現象の機構、影響評価モデルの開発状況、評価例等を調査し、今後の我が国における研究開発計画の検討に資するものである。本年度は、まず、各国において研究開発が進展している項目より調査を開始するものとして、ガス発生、廃棄体からの浸出、微生物活動等による影響について調査を行うものとした。また、相対的に研究開発が遅れているコロイドによる影響等については次年度において調査を行う。

### 2.2.1 ガス発生及び蓄積移行

#### (1) ガス発生メカニズム

TRU廃棄物はガス発生の可能性があるといわれている。事実セルロースを封入したドラム缶を用いたガス発生の実験<sup>1)</sup>もあることから、処分に際してはガス発生によって人工バリア及び天然バリアの本来期待される構造力学的、水理学的機能が脆弱化され、核種移行速度が促進することが懸念されている<sup>2)</sup>。

このガスは金属腐食により発生する $H_2$ 、微生物分解により発生する $CH_4$ 、 $CO_2$ が主体であり、放射線分解により発生するガスについてはオーダ的には小さい<sup>3~5)</sup>。

ガスによる影響に関連した文献も近年多く見られ、1991年9月にはパリでOECD/NEA主催のガスに係わるワークショップが開催され、日本からの動燃事業団を含めL/ILW、HLWからのガス発生、移行に係わる32件の発表があった。現段階では、各国ともガスに関する処分場への影響の検討の重要性を指摘し、発生メカニズム、推定発生量、移行について種々のアプローチの提案が示されているが、多くの共通点もある。これらは、基本的にはガス発生に係わる基本事項の確認と、対象廃棄物総量から単純に化学反応式を用いて求めたガス発生量による処分場への影響評価が主流である。発生したガスの地中移行過程については、ガスが気泡として地下水中に存在することを前提とした、二相流コードによる試算が多くなされている。また、特定条件下での原位置挙動試験も報告されている。

このような背景から、本節ではガス発生メカニズムについて諸外国の考えをまとめ、従来ガス発生量について保守側すぎると考えられる試算方法について

以下に示す観点から検討した。

- ① ガス圧の影響により，ガス発生速度が変化しないか，又はガス圧はどのくらいの値となるか。
- ② ガスが発生しても中深層の被圧地下水中に溶存するか。
- ③ ガスが発生しても人工バリア及び天然バリアへ吸着しないか。
- ④ ガス源となる廃棄物の表面積は，初期のまま維持するか。

最後に，英国Harwell 研究所によりNEAワークショップで発表された，ガス発生評価コードGAMMONについて概説した。

(i) 諸外国のガス発生メカニズム

米国，英国，スウェーデン，スイス，フィンランドで考慮されているガス発生メカニズムについて研究成果の概要を表2.2-1 にまとめた。

表2.2-1 各国のガス発生メカニズム

| 発生ガス<br>国 | 金属腐食によるガス                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 微生物分解によるガス                                                                                                                                                                                         | 放射線分解によるガス                                                                                                                        |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| アメリカ合衆国   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• WIPP (岩塩)</li> <li>発生速度<br/>1.7 mol/ドラム・y</li> <li>発生量<br/>896 mol H<sub>2</sub> /ドラム</li> </ul>                                                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (同左)</li> <li>発生速度<br/>0.85 mol/ドラム・y</li> <li>発生量<br/>589 mol/ドラム</li> </ul>                                                                             | —                                                                                                                                 |
| イギリス      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 無酸素条件下で<br/>0.1 ～数 <math>\mu\text{m/y}</math></li> <li>• その他<br/> <ul style="list-style-type: none"> <li>ソルコイ 0.03 <math>\mu\text{m/y}</math> 未満</li> <li>マジンクス 0.002 ～0.01%</li> <li>Al 10 <math>\mu\text{m}</math> ～1 mm/y</li> </ul> </li> <li>• 200 ～1000年で消耗</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 腐食によるガス発生量のおよそ 1/100</li> <li>• 約 400年間反応継続</li> <li>• pH 11 ～12でも微生物は生存するとしている。</li> </ul>                                                               | —                                                                                                                                 |
| スウェーデン    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• SFR</li> <li>• pH 13.5 で腐食速度：<br/>1 ～10 <math>\mu\text{m/y}</math><br/>(3.0 <math>\mu\text{m/y}</math> を採用)<br/>↓<br/>1,200 Nm<sup>3</sup> /サイロ・y 発生</li> </ul>                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• pHが高い環境では発生しないと考えられる。</li> </ul>                                                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 100 Nm<sup>3</sup> /サイロ・y</li> </ul>                                                     |
| スイス       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 50℃以下のコンクリート中の鉄：<br/>0.1 ～1 <math>\mu\text{m/y}</math></li> <li>• 高 pH 条件<br/>1 mm/y</li> </ul>                                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 発生速度：<br/>0.2 mol/kg.y</li> </ul>                                                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 生成化学種の単位質量：<br/>(100 eV 当り)<br/>コンクリート：<br/>H<sub>2</sub> = 0.03 mol / Mrad・t</li> </ul> |
| フィンランド    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 腐食速度<br/>0.3 ～0.5 <math>\mu\text{m/y}</math></li> <li>• トータルガス発生量<br/>1.5×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>(ILW)</li> </ul>                                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.4 <math>\ell</math> /y・m<sup>2</sup></li> <li>• 20年間で分解終了<br/>発生速度は6000m<sup>3</sup>/y<br/>トータルガス量<br/>1.2×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>(LLW)</li> </ul> | —                                                                                                                                 |

各国とも単位に統一性がないため簡単に比較できないが，ガス発生量 (mol/drum) について米国（金属腐食ガス896 mol/drum，微生物分解ガス589 mol/drum）を基準として比較すれば，図2.2-1 に示すように表現される。

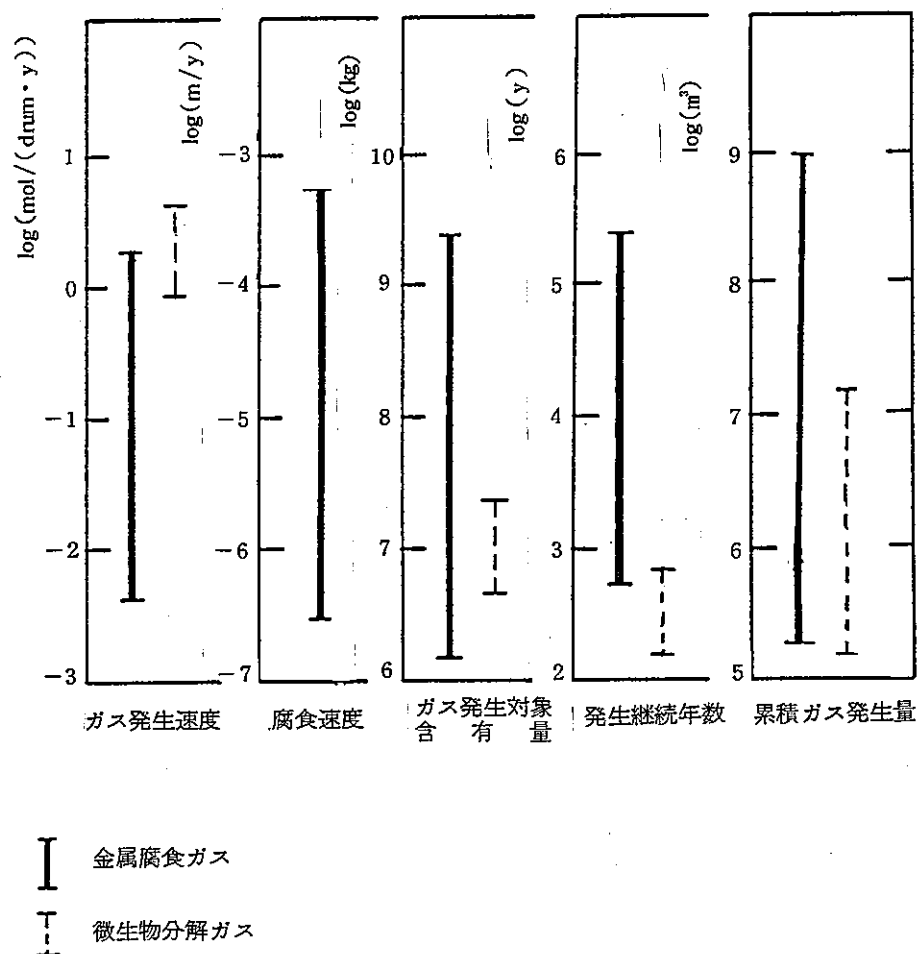


図2.2-1 諸外国のガス発生量（処分場当り）

この図から金属腐食ガスについては、ガス発生速度が  $0.004 \sim 1.5 \text{ mol}/(\text{drum} \cdot \text{y})$ 、腐食速度が  $0.3 \sim 500 \mu\text{m}/\text{y}$ 、累積ガス発生量が  $1.5 \times 10^5 \sim 10^9 \text{ m}^3$  の範囲にあることがわかる。一方微生物分解ガスについては、ガス発生速度が  $0.85 \sim 3.5 \text{ mol}/(\text{drum} \cdot \text{y})$ 、累積ガス発生量が  $1.2 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$  であり、相対的に金属腐食による発生量が大きいことがわかる。

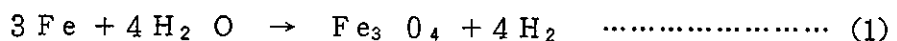
このガス発生量については、各国とも対象廃棄物総量を対象として化学反応を設定して算定しているが、現実的には長期に亘りガス発生が一定であるとは考えにくい。その理由として以下の項目に注目した。

## (ii) ガス発生速度に及ぼすガス圧の影響

現在、多くの国ではガス発生及び蓄積に及ぼす限られた空間のガス圧上昇の影響についてはほとんど検討されておらず、多くが自由空間への放出シナリオとなっている。ただ米国では、岩盤を対象とした処分場周辺に及ぼすガス蓄積についてガス圧を検討しているが、具体的な関係式又は値は示されていない<sup>6)</sup>。

また、英国Harwell 研究所<sup>7)</sup>では水素ガス圧の変化(0.1, 1, 10Mpa)による腐食速度の影響について実験し、現時点では10Mpa 圧力時の腐食速度が0.1 Mpa (1 気圧, 0.3 ~ 6  $\mu\text{m/y}$ ) の場合の1/4 倍と小さくなっていることが示され、この理由としてマグネタイト皮膜の形成に起因するとしている。

以下に化学平衡論の基本的事項により、ガス発生の反応式を考えてみる。一般に、廃棄体内にガス発生に必要な $\text{H}_2\text{O}$ は地下水の浸入により補給されると仮定すると、金属腐食及び微生物分解により発生するガスに係わる保守側の化学反応式は下式のとおりである。



ここで右辺について、ガスは処分場外へ自由放出しないと仮定すると、一定の条件において左辺と右辺は平衡状態に達する<sup>8)</sup>。この時の平衡定数は温度、圧力、媒体の関数であるが、環境条件が変化しない場合平衡定数は一定であると考えられる。

そこで(1) 式の平衡定数 $K_1$  は次のようになる。

$$K_1 = \frac{[\text{Fe}_3\text{O}_4]^1 \cdot [\text{H}_2]^4}{[\text{Fe}]^3 \cdot [\text{H}_2\text{O}]^4}$$

[ ] : 各化学種の活動度 [M]

この $K_1$ は左辺項が十分量存在する限られた間隙内でも、もはや $H_2$ 量が増加しない状態を示す定数である。

このように、反応が右へばかり進行するのではなく、ある条件が達成されると左へも進む場合もありうる。

いま仮に廃棄体内部の間隙を人工バリアと同様に0.26とすると、ガスが蓄積する限られた間隙全容積は一般的な形状のトンネル型処分ユニットで約 $5000\text{m}^3$ となる。この間隙全部に新たに発生するガスが置換するとしても、(1)式の左辺のFeは反応式より表2.2-2に示すようにFeが9.3トン消費されるのみであり、廃棄物全量に比べはるかに小さい値となることから、さらに鉄が腐食すれば圧の上昇が生じることとなる。

表2.2-2 STPTにおけるガス発生対象物の量

|      | 対象要素 | 廃棄体内の<br>空隙容積 *1) | ガス mol数 *2)                     | 反応対象物<br>(トン) |
|------|------|-------------------|---------------------------------|---------------|
| 金属腐食 | Fe   | $5000\text{m}^3$  | $2.23 \times 10^5$<br>( $H_2$ ) | 9.3           |

\*1) 間隙率0.26とする。

\*2) Fe :  $55.84\text{g/mol}$ , Fe 3モルに対し $H_2$  4モル発生

### (Ⅲ) ガス蓄積の予備評価

次に金属腐食及び微生物分解によるガス発生経年変化を算定して、ガスが人工バリアにどのような圧力を及ぼすかを検討した。

前述のように累積ガス発生量は諸外国の試算値により処分空洞あたり約 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ となる。一方、処分場として断面形状、長さ、廃棄体定置を考慮して一般的に $19000\text{m}^3$ とし、処分空洞内空隙は全体間隙率を0.26とすると、

$$V_o = 5 \times 10^9 \text{ cm}^3 \text{ となる。}$$

まず、処分空洞から外へのガス透過がない場合、処分空洞内圧力：Pは

$$P = 1 \times 10^6 \times 10^6 \text{ (cm}^3\text{)} / 5 \times 10^9 \text{ (cm}^3\text{)} \approx 200 \text{ 気圧}$$

となる。この様な大きな圧力が処分空洞内部に生ずれば人工バリア又は空洞周辺岩盤の多くは破壊する。

次にガス透過を考えた場合次のようになる。

ある時間  $t$  における処分空洞間隙容積  $V_0$  内の圧力を  $P$  (dyn/cm<sup>2</sup>) とする。

$dt$  時間の間に処分空洞内容積の圧力が  $dp$  だけ上昇したとすると、

$$dp = \frac{P \cdot V_0 + P_0 \cdot (a \cdot dt + Q \cdot dt)}{V_0} - P$$

ここで、 $a$  (cm<sup>3</sup>/s) はガス発生速度、 $Q$  (cm<sup>3</sup>/s) は人工バリアを通過するガス流速。

$P_0$  (dyn/cm<sup>2</sup>) は初期圧力。

$$\therefore dp = P_0 \cdot \left( \frac{a + Q}{V_0} \right) dt$$

ところで、 $Q$  (cm<sup>3</sup>/s) はダルシー則に従えば次式となる。

$$Q = -\frac{K}{\mu} \cdot \frac{P - P_0}{L} \cdot A$$

ここで、 $A$  : 表面積 (cm<sup>2</sup>)

$K$  : 透過係数 (cm<sup>2</sup>)

$\mu$  : 粘性係数 (dyn · s/cm<sup>2</sup>)

$L$  : 人工バリア厚さ (cm)

したがって、

$$dp = P_0 \cdot \left( \frac{a}{V_0} - \frac{K \cdot A}{V_0 \cdot \mu \cdot L} \cdot (P - P_0) \right) \cdot dt$$

$$\therefore \frac{1}{P_0 \cdot \left( \frac{a}{V_0} - \frac{K \cdot A}{V_0 \cdot \mu \cdot L} \cdot (P - P_0) \right)} dp = dt$$

$$\therefore -\frac{V_0 \cdot \mu \cdot L}{K \cdot A \cdot P_0} \ln [P_0 \cdot \left( \frac{a}{V_0} - \frac{K \cdot A}{V_0 \cdot \mu \cdot L} \cdot (P - P_0) \right)]$$

$$= t + c$$

$t = 0$  で  $P = P_0$  より,

$$c = -\frac{V_0 \cdot \mu \cdot L}{K \cdot A \cdot P_0} \ln \left[ P_0 \cdot \left( \frac{a}{V_0} \right) \right]$$

$$\therefore P_0 \cdot \left( \frac{a}{V_0} - \frac{K \cdot A}{V_0 \cdot \mu \cdot L} \cdot (P - P_0) \right)$$

$$= \exp \left\{ -\frac{K \cdot A \cdot P_0}{V_0 \cdot \mu \cdot L} (t + c) \right\}$$

$$\therefore P = \frac{V_0 \cdot \mu \cdot L}{K \cdot A} \left\{ \frac{a}{V_0} - \frac{1}{P_0} \cdot \exp \left\{ -\frac{K \cdot A \cdot P_0}{V_0 \cdot \mu \cdot L} (t + c) \right\} \right\} + P_0$$

具体的数値を代入し,  $P$  を  $K$  と  $a$  の関数とすると,

$$V_0 = 5 \times 10^9 \text{ cm}^3$$

$$L = 500 \text{ cm}$$

人工バリアの厚さを 5 m と仮定

$$a = 3.00 \times 10^1 \text{ cm}^3 / \text{処分空洞} \cdot \text{秒}$$

金属腐食によるガス発生速度を  
仮定した。

$$1.93 \times 10^2 \text{ cm}^3 / \text{処分空洞} \cdot \text{秒}$$

微生物分解によるガス発生速度を  
仮定した。

$$A = 7.0 \times 10^7 \text{ cm}^2$$

処分空洞内表面積

$$\mu = 18.2 \times 10^{-5} \text{ dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$$

$$P_0 = 1.0 \times 10^6 \text{ dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$$

(注) 1 気圧 = 9.8 N/cm<sup>2</sup>

$$= 9.8 \times 10^5 \text{ dyn} / \text{cm}^2$$

$$= 1 \times 10^6 \text{ dyn} / \text{cm}^2$$

これから,

$$P = 1 \cdot 10^6 - \frac{6.5}{K} \cdot \left( -\frac{a}{5 \times 10^9} + \frac{1}{P_0} \cdot \exp \left( -\frac{K \cdot P_0}{6.5} t + \ln \left( P_0 \cdot \frac{a}{5 \times 10^9} \right) \right) \right)$$

以上から、透過係数及びガス発生速度を関数とした処分空洞内部ガス圧経年変化がわかる。(表2.2-3)

この表から、金属腐食ガスのようにガス発生速度が小さい場合、金属消耗年数である2,000年を経過後も透過係数 $10^{-11}$  cm<sup>2</sup> (通常のコンクリート、軟岩程度) では、ガス圧は1気圧からほとんど上昇しない。また、微生物分解ガスのように比較的発生速度が大きい場合でも金属腐食ガスと同様であるが、透過係数が $10^{-15}$  cm<sup>2</sup> (気密性の高いコンクリート、岩盤程度) と仮定すると、100年経過後で97気圧とガス圧がかなり上昇することがわかる。

今後、透過係数の室内、サイト試験を実施することによりデータを収集し、人工バリア、周辺岩盤のガスに対する気密性を検討していく必要がある。その結果に基づいて、人工バリアのガスに対する適切な層厚、周辺岩盤のゆる領域の効果について詰めていく必要があると考えられる。

表2.2-3 躯体内部ガス圧経年変化に及ぼす透過係数(K)の影響(1)

(a) 金属腐食によるガス圧(ガス発生速度 =  $3.00 \times 10^1 \text{ cm}^3/\text{処分空洞} \cdot \text{秒}$ とした場合)

| $K (\text{cm}^2)$<br>時間(y) | $1 \times 10^{-10}$ | $1 \times 10^{-11}$ | $1 \times 10^{-12}$ | $1 \times 10^{-13}$ | $1 \times 10^{-14}$ | $1 \times 10^{-15}$ |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0                          | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 |
| 100                        | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 | 1.4                 | 4.9                 | 16.0                |
| 500                        | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 | 1.4                 | 4.9                 | 36.6                |
| 1,000                      | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 | 1.4                 | 4.9                 | 39.7                |
| 2,000                      | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 | 1.4                 | 4.9                 | 40.0                |

(単位 : atm)

表2.2-3 躯体内部ガス圧経年変化に及ぼす透過係数(K)の影響(2)

(b) 微生物分解によるガス圧(ガス発生速度 =  $1.93 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{処分空洞} \cdot \text{秒}$ とした場合)

| $K (\text{cm}^2)$<br>時間(y) | $1 \times 10^{-10}$ | $1 \times 10^{-11}$ | $1 \times 10^{-12}$ | $1 \times 10^{-13}$ | $1 \times 10^{-14}$ | $1 \times 10^{-15}$ |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0                          | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 | 1.0                 |
| 10                         | 1.0                 | 1.0                 | 1.3                 | 3.5                 | 10.6                | 12.9                |
| 50                         | 1.0                 | 1.0                 | 1.3                 | 3.5                 | 23.9                | 55.1                |
| 100                        | 1.0                 | 1.0                 | 1.3                 | 3.5                 | 25.9                | 97.4                |
| 200                        | 1.0                 | 1.0                 | 1.3                 | 3.5                 | 26.1                | 156.8               |
| 500                        | 1.0                 | 1.0                 | 1.3                 | 3.5                 | 26.1                | 229.7               |

(単位 : atm)

#### (Ⅳ) 地下水へのガス溶解の可能性

廃棄物からガスが発生した場合、地下水への溶存の可能性がある<sup>9, 10)</sup>。Lever<sup>11)</sup>らは $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ について、発生期間内に処分場を通過する地下水に溶解する量を $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ としているが、累積発生ガス量に比べて1桁小さいため評価に際しては溶解を考えていない。しかし、上記ガスの地下水溶解量は例えばフィンランドの累積発生ガス量に匹敵する量であり、無視することはできないと考えられる。

この溶解量はガスの種類によって異なるが、Henry 則より圧力に比例して増加するため、地下数百mに処分場を設置した場合、被圧地下水の圧力は数十 $\text{kg/cm}^2$ となることが予想され、ガス溶解量は自由水の場合の数十倍となると考えられる。

今、仮に地下水流速（線流速）を $0.1\text{m/y}$ とすると、1坑道の断面積を約 $1500\text{m}^2$ 、岩盤の空隙率を $0.03$ として、地下水量は次のようになる。

$$0.03(-) \times 0.1\text{m/y} \times 1500\text{m}^2 = 4.5\text{m}^3/\text{y}$$

$\text{CH}_4$ の場合を例にすると表2.2-4のように $30^\circ\text{C}$ 、1気圧で $0.029 \text{ cc/cc}$ 水溶存する<sup>5)</sup>ことから、例えば地下300mの場合温度を一定、水圧を地圧と無関係として、地表からの水頭と仮定すれば30気圧となり、 $0.87\text{cc/cc}$ 溶解する。従って地下水量 $4.5 \text{ m}^3/\text{y}$ 中に $3.92\text{m}^3/\text{y}$ 溶解することになる。

表2.2-4 気体の溶存量  $\text{cc STN/cc 水}$

| 温度<br>ガス      | $20^\circ\text{C}$ | $40^\circ\text{C}$ | $60^\circ\text{C}$ |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\text{H}_2$  | 0.018              | 0.016              | 0.016              |
| $\text{CO}_2$ | 0.880              | 0.530              | 0.360              |
| $\text{CH}_4$ | 0.033              | 0.024              | 0.020              |

この値を表2.2-1のスウェーデン<sup>2)</sup>のガス発生速度 $1200\text{m}^3/\text{y}$ にあてはめると、自由水の場合このようにガスの地下水への溶存量を考慮しても、ガス発生量の0.3 %が溶存することになり、ほとんどすべてが気泡となって天然バリア中を移行することになる。

しかし、例えば地下水流速が10倍となり、深度がさらに深く1000mになったと仮定すれば溶存量は3 %となり、かつガス発生量が現実的値に基づき算定されることで $1200\text{m}^3/\text{y}$ ・サイロより小さくなれば、溶存するガスの割合がさらに大きくなり大部分が地下水に溶存し、気泡として天然バリアを移行する量は小さい場合もあると推定される。

上記で検討した値はすべて $\text{CH}_4$ の場合であり、 $\text{H}_2$ の場合溶解度は $\text{CH}_4$ の半分であるが、 $\text{CO}_2$ の場合は $\text{CH}_4$ の20倍程度の溶存量となる。

#### (V) 人工／天然バリアへのガス吸着の可能性

多孔質媒体中のガス吸着については、古くからラングミュア式を用いた単分子層モデルが用いられ、適用可能であることが言われている。このモデルは媒体の比表面積に比例して吸着量が増加するものである<sup>12)</sup>。

一般にL／ILW処分場では、人工バリア材に主としてコンクリート、アスファルト、粘土、金属などを組合わせるバリアシステムが検討されているが、そのうちコンクリート、粘土が量的、性能的な面等から代表的充填材として考えられている。粘土は比表面積の大きい材料であり、ラングミュア式によればかなりのガスを吸着する潜在的可能性がある。

例えば、イライトについてCO<sub>2</sub>の吸着量が飽和圧力の1/2条件下で約30 cm<sup>3</sup>/g、カオリナイトでも同様に5 cm<sup>3</sup>/gであることが示されている<sup>13)</sup>。

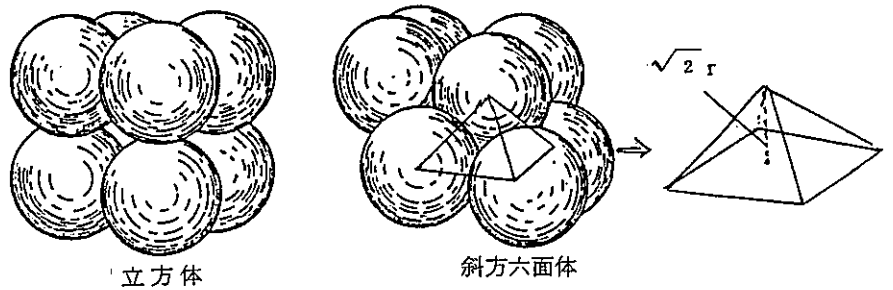
またコンクリートについても固結物ではあるものの、骨材、砂等の粒子はかなり大きな比表面積を有していること、及び長期的にみて亀裂が生じた場合、新鮮な面が形成され吸着能がさらに大きくなることが考えられる。

一方、水分による吸着能低下も報告されているが、量的には3割減程度とみられている。

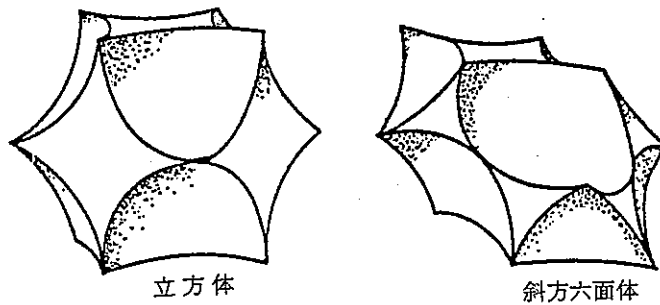
また、天然バリアのガス移行における吸着材を挙げるとすれば、地下深部の圧力下での炭層（石炭）が最も多量の吸着能を有し、CH<sub>4</sub>に対して20 m<sup>3</sup> STN/t 吸着する場合もあると報告されている。その他泥岩についても0.1 m<sup>3</sup> /t程度吸着するとしている<sup>7)</sup>。ドイツでは岩塩へのガス吸着を考慮して検討しているものの定量的表示はなされていない<sup>8)</sup>。

今、仮にベントナイト粒子を均一球状として最密充填構造（斜方六面体）における内部表面積を求めてみる。Gratonら<sup>14)</sup>によれば、これは図2.2-2のような同粒形斜方六面体に対して幾可学的に間隙率を0.2595としている。この値は本試験の性能評価試算で用いているベントナイトの間隙率0.26に一致している。これから図2.2-2のように単位体積当り

$$\frac{1}{\sqrt{2} \cdot r} \times \frac{1}{\sqrt{2} \cdot r} \times \frac{1}{\sqrt{2} r} = \frac{1}{2\sqrt{2} \cdot r^3}$$



(a) 粒子構造



(b) 空隙の形

個のベントナイト粒子が存在することになる。したがって比表面積( $SS$ )は

$$SS = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \times \frac{1}{2\sqrt{2} \cdot r^3}$$

$$= 4.44 / r \text{ (m}^2/\text{m}^3\text{)}$$

となる。したがってベントナイトの体積を  $1.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ /坑道の充填材に対してその20%として内部表面積を上式より求め、これにガスがラングミュア吸着式に従い単分子層吸着したと仮定した場合、吸着ガス量が求められる。今、比表面積： $SS$ と単分子層吸着に必要な吸着量： $v_m$ との関係は文献<sup>23)</sup>に基づけば $\text{CH}_4$ に対して

$$SS = 4.30 \cdot v_m$$

と表わされる。ベントナイトの粒子半径を  $1.4 \times 10^{-7} \text{ m}$  とすると

$$1.9 \cdot 10^4 \times 0.2 \times \frac{4.44}{1.4 \times 10^{-7}} = 4.3 \cdot 10^6 v_m$$

したがって、 $v_m = 2.8 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{トンネル}$  となり、充填材  $1 \text{ m}^3$  当り  $2.8 \cdot 10^4 / 1.9 \cdot 10^4 = 1.5 \text{ m}^3$  の吸着量となる。

これは前述のカオリナイト ( $5 \text{ ml/g}$ ) とほぼ同オーダーとなる。この量はフィンランドでの累積発生量  $1.5 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ /サイロの19%であり、さらに同様に天然バリアでも吸着すると仮定すると、発生量とほぼ同量の吸着が可能であることが推測され、バリアによるガス吸着の影響が大きいことを示す。

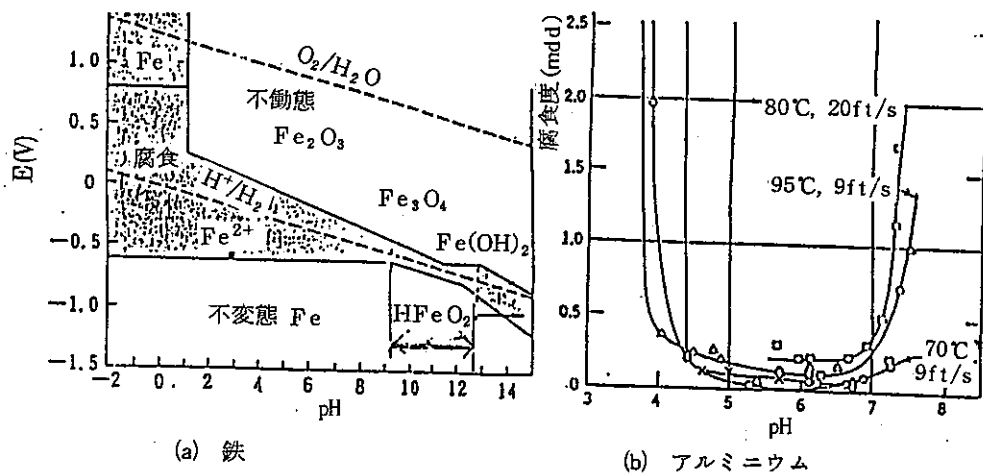
また、ガス発生の可能性が大きい廃棄物に対しては、その対策として現在考えられている人工バリア材料よりさらに比表面積の大きいもの、例えば Molecular Sieve, 活性炭, ゼオライト等で長期的にも変質しない材料をポーラス材として用いれば、ガス抜き用通路となるばかりでなく、吸着材としての効果も大きいと考えられる<sup>15)</sup>。

今後、採掘に伴うガス漏出あるいは天然ガスの賦存等の自然現象の経験から、放射性廃棄物より発生したガスが地表に至る間に、周辺バリアに吸着され維持される可能性について検討する必要がある。このためには人工バリア及び天然バリア材料の吸着試験を実施し、発生したガスがどの程度バリアに吸着するかを調べる必要がある。

#### (V) 対象廃棄物の反応表面積

各国の金属腐食ガスの試算は、対象廃棄物の総表面積を仮定し、これに腐食速度を乗じることで Fe の供給量を算定している。しかし実際の廃棄物は表面積が大きく容積の小さいもの、又はその逆と様々な形状をもつことから、初期の露出表面積が長期に亘り反応に寄与するとは考えられず、ある時間を経過すれば反応に寄与する表面積はかなり小さくなり、反応はかなり遅くなることも推定できる。

一方、腐食速度を遅らせる不働態の形成も考えられる。特に処分場周辺 ( $\text{pH} = 10$ 前後) では、図2.2-3 ように平衡論的に腐食が生じにくい環境条件であり、この面からの検討も必要と考えられる<sup>16, 17)</sup>。



(註) 上図より 9.4 ~ 12.5 の Fe 腐食は進行していく  
 また、 0.4 ~ 7.0 の Al 腐食はほとんどない  
 ことがわかる。

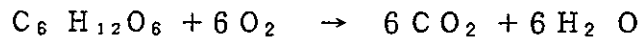
図2.2-3 金属の腐食と pH の影響

(Ⅵ) ガス発生コード GAMMON<sup>18)</sup>

このコードは英国Harwell 研究所により1991年のDECD/NEAによるワークショップで発表されたものであり、環境条件に応じて微生物分解及び金属腐食の反応式を選択することで、より現実的なガス発生メカニズムを選択することができる。

化学反応式は微生物分解について8種類、金属腐食について3種類用意され、環境条件（好／嫌気性等）に応じた式によりガス発生量の試算が可能である。下記に用意された化学反応式を示す。

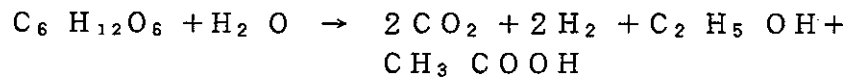
① 微生物1（好気性分解）



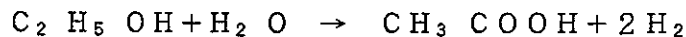
② 微生物2（硝酸塩分解）



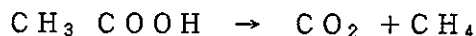
③ 微生物3（嫌気性分解1）



④ 微生物4（嫌気性分解2）



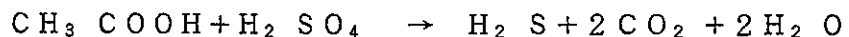
⑤ 微生物5（メタン生成菌1）



⑥ 微生物6（メタン生成菌2）



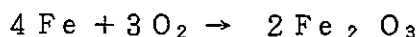
⑦ 微生物7（硫酸塩還元菌1）



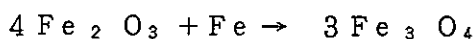
⑧ 微生物8（硫酸塩還元菌2）



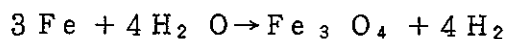
⑨ 鉄の酸化（サビ）



⑩ 嫌気性雰囲気でのマグネタイトの形成



⑪ 鉄の嫌気性腐食



## (2) 人工バリア及び天然バリア中のガス移行

ガスの発生メカニズムは(1)で述べたように気泡発生に至るまでに多くの負の影響についても検討する必要がある、これによって人工／天然バリアでの気泡の発生の可能性は試算値よりかなり小さくなると考えられる。しかし、気泡が生じた場合には地下水とともに二相流を形成し、ガスと地下水による人工／天然バリアへの作用により地表への気体状及び溶液中の放射性核種移行速度は保守側にみると大きくなる可能性は十分あると考えられる。

ここでは気泡と地下水の二相流移行問題について下記項目に対する概況を述べる。

- ① T O U G Hコード
- ② 諸外国のガス移行への対策
- ③ N E Aワークショップの方向性

### (i) T O U G Hコード<sup>19)</sup>

このコードは1987年Lawrence Berkley研究所のPruess, K.らによって開発された二相流コードである。

試算例として、従来しばしば報告されているスイスOberbauenstockの試算例では、ガス発生速度を処分後20年までは $1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{秒}$ 、それ以後は $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{秒}$ と仮定し、要素数328個を用いて人工バリアから天然バリアへのガス／水移行問題を解いている<sup>20)</sup>。また、毛管圧力はガス圧に比べて小さいことから無視し、かつ地下水へのガス溶存は処分後2.5年間継続するものとし、その後はサイロ内に貯えられ20年後に処分場外に気泡として放出され、200～500年後に気泡が地表に達し、1000年後にガス飽和度が30%になるものとしている。

以下に入力条件及びその他の試算結果を示す。

T O U G Hコードを用いた不飽和多孔質岩盤中のH L Wパッケージ周辺のガス／水移行解析例を以下に述べる。

解析モデルを図2.2-4に示す。これはH L Wパッケージを無限の長さとし、2層の亀裂面が0.22mの等間隔に存在するものとした場合のものである。

図2.2-4 の解析モデルは、上下対象であることから0.11m厚が解析領域となる。

最後に二相流コードで特に問題となる毛管圧力及び相対透過係数のうち、しばしば使用される2つの方法を以下に説明する。

① Sandia function での毛管圧力と相対透過係数

$$P_{sus}(S_\ell) = -1.393 \left( \left( \frac{(S_\ell - S^0_r)}{(1 - S^0_r)} \right)^{\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{1-\lambda} \quad (\text{Mpa})$$

$P_{sus}(S_\ell)$  : 毛管圧力

$\lambda$  : 毛管圧力決定の際の定数

$S_\ell$  : 含水率

$S^0_r$  : 半径  $r$  (廃棄体表面) での含水率

$$K_{r\ell}(S_\ell) = \left( \frac{S_\ell - S^0_r}{1 - S^0_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left( 1 - \left( \frac{S_\ell - S^0_r}{1 - S^0_r} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \right)^\lambda \right\}^2$$

$K_{r\ell}(S_\ell)$  : 水の相対透過係数

ここで、 $S^0_r = 9.6 \times 10^{-4}$

$$\lambda = 0.45$$

$$K_{rg}(S_\ell) = 1 - K_{r\ell}$$

とすると、 $S_\ell$  と  $P_{sus}(S_\ell)$  の関係は図2.2-5 のように示される。

② Corey' curvesの相対透過係数

$$K_{r\ell} = \left( \frac{S_\ell - S^0_r}{1 - S^0_r - S_{gr}} \right)^4$$

$S_{gr}$  : 半径  $r$  (廃棄体表面) でのガス飽和度

$$Krg = \left( 1 - \frac{S\ell - S^0 r}{1 - S^0 r - Sgr} \right)^2 \cdot \left( 1 - \left( \frac{S\ell - S^0 r}{1 - S^0 r - Sgr} \right)^2 \right)$$

Krg : ガスの相対透過係数

ここで,  $S^0 r = 0.3$

$Sgr = 0.05$

とすると,  $S$  と  $Kr\ell$ ,  $Krg$  の関係は図2.2-6 のようになる。

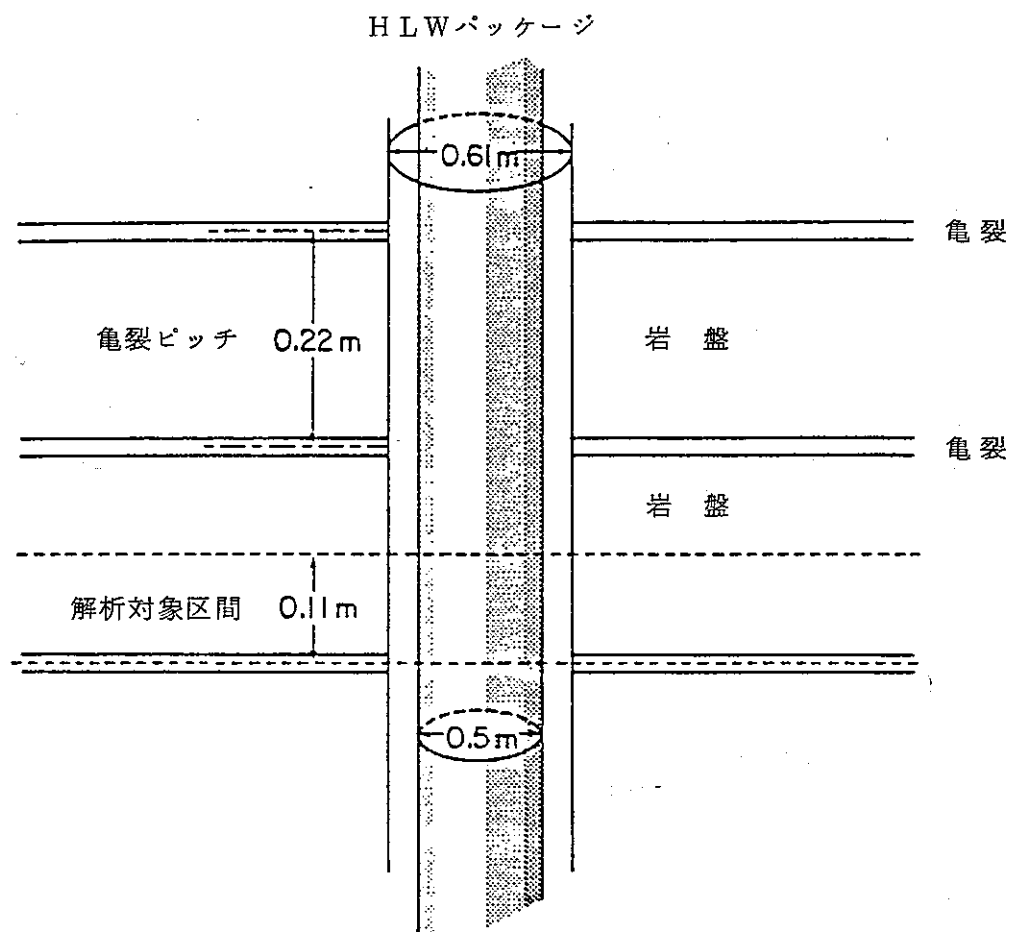
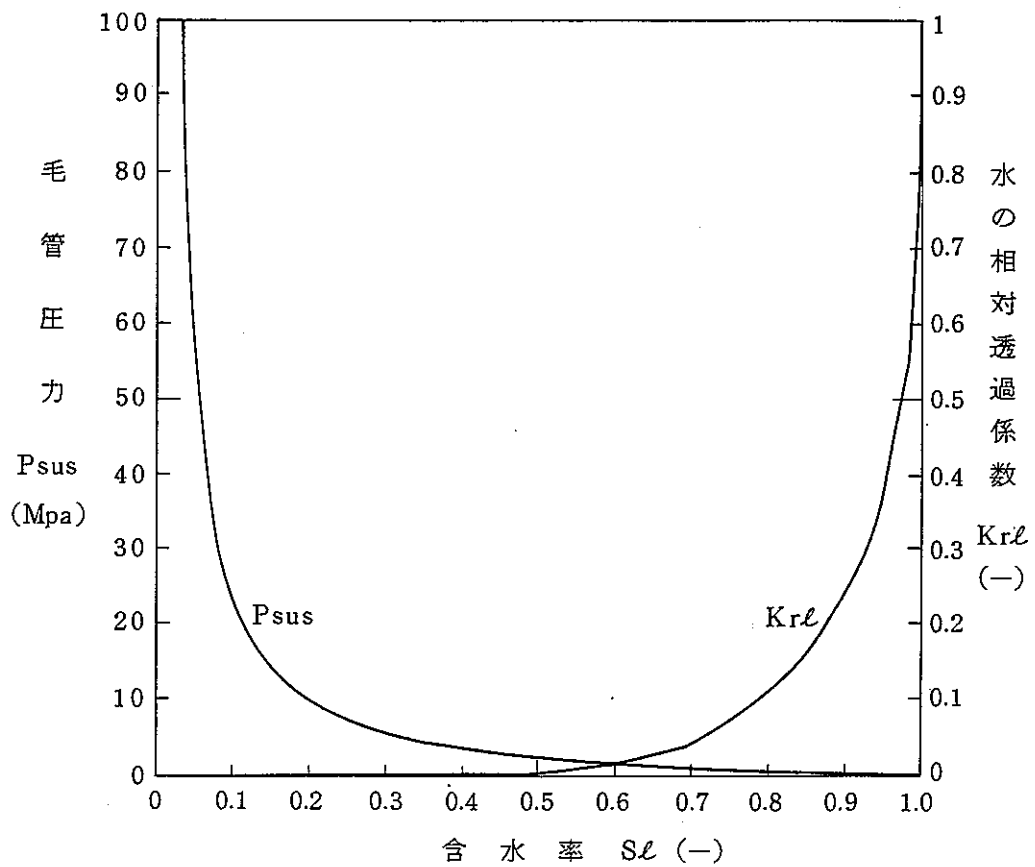
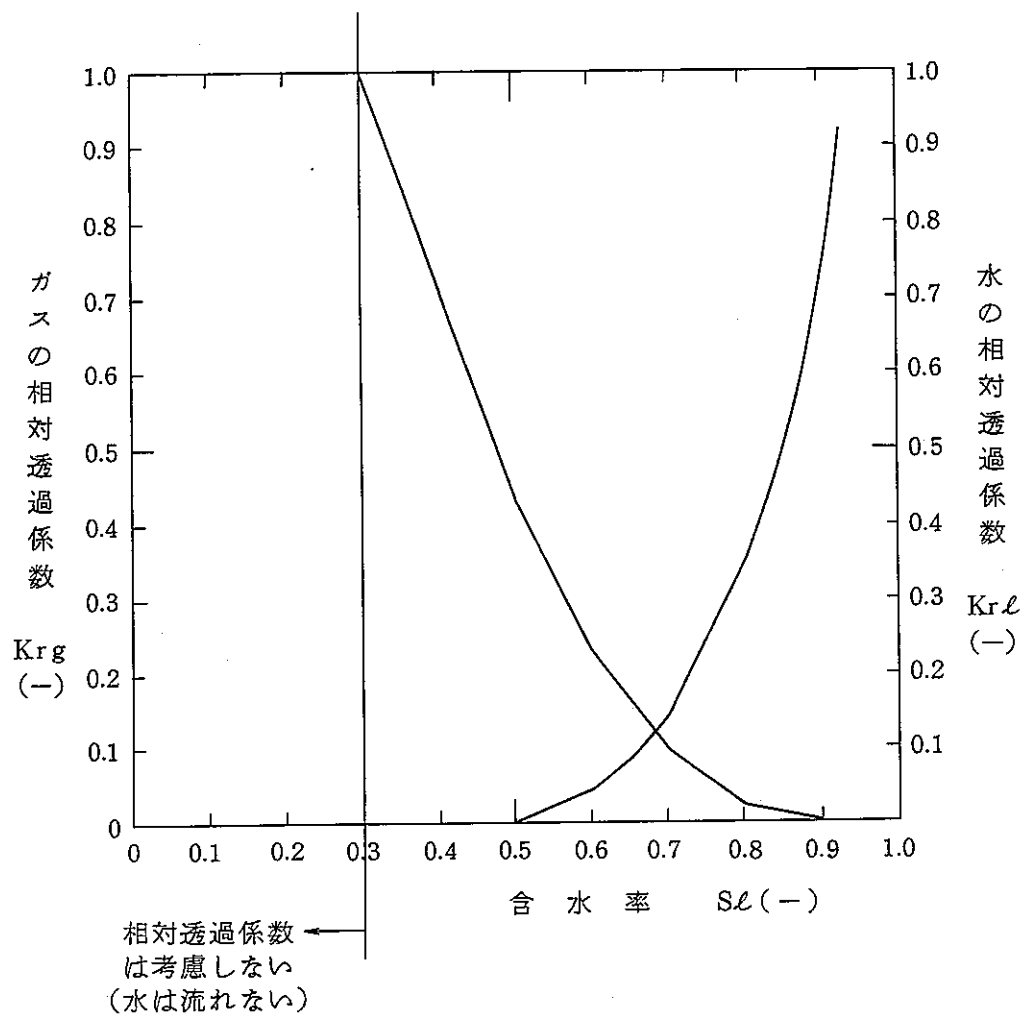


図2.2-4 H L Wパッケージ処分孔周辺解析モデル



| $S_l$ (-)       | 0.1                  | 0.2                  | 0.3                  | 0.4                  | 0.5                  | 0.6                  | 0.7                  | 0.8                  | 0.9  | 1.0 |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|-----|
| $P_{sus}$ (Mpa) | 23.4                 | 9.9                  | 5.9                  | 4.0                  | 2.9                  | 2.1                  | 1.5                  | 1.1                  | 0.7  | 0   |
| $K_{rl}$ (-)    | $2.2 \times 10^{-6}$ | $7.1 \times 10^{-5}$ | $5.4 \times 10^{-4}$ | $2.3 \times 10^{-3}$ | $7.4 \times 10^{-3}$ | $2.0 \times 10^{-2}$ | $4.7 \times 10^{-2}$ | $1.1 \times 10^{-1}$ | 0.24 | 1   |

図2.2-5 Sandia function による毛管圧力:  $P_{sus}$  と水の相対透過係数



| $S_l$ (-)    | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4                  | 0.5                  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9                  | 1.0 * |
|--------------|-----|-----|-----|----------------------|----------------------|------|------|------|----------------------|-------|
| $K_{rg}$     |     |     | 1.0 | 0.07                 | 0.43                 | 0.23 | 0.09 | 0.02 | $8.8 \times 10^{-4}$ |       |
| $K_{rl}$ (-) |     |     | 0   | $5.6 \times 10^{-4}$ | $8.9 \times 10^{-3}$ | 0.05 | 0.14 | 0.35 | 0.73                 |       |

\*)  $S_l = 1.0$  では  $K_{rl} > 1$ ,  $K_{rg} < 0$  となり矛盾する

図2.2-6 Corey 法による相対透過係数

(ii) 諸外国のガス移行対策

ガスによる人工バリアへの力学的悪影響を避けるため、いくつかの国ではガス移行の対策が検討されている。表2.2-5 には諸外国で提案されているガス圧、毛管圧力、コンクリート引張強度値を、図2.2-7 にはガス蓄積対策例としてフィンランドのガスロックを示す<sup>3)</sup>。また表2.2-6 には諸外国のガス移行対策を示す。

表2.2-5 ガス圧、毛管圧力、コンクリート引張強度

| 国名     | ガス発生速度<br>(mol/drum・y) | ガス 圧<br>(MPa) | 毛管圧力<br>(MPa) | コンクリート<br>引張強度(MPa) | 備 考                              |
|--------|------------------------|---------------|---------------|---------------------|----------------------------------|
| 米 国    | 1.70                   | —             | —             | —                   | 地圧を14.8MPa に<br>制御する             |
| 英 国    | 1.49                   | 1.5           | 1.5           | 1.5                 | コンクリートに亀<br>裂の可能性あり              |
| スウェーデン | $3.58 \cdot 10^{-1}$   | MAX. 1.5      | 1.5           | 0.5~1.5             | ポーラスコンクリ<br>ート、ベントでガ<br>スを抜く方法検討 |
| ス イ ス  | $4.48 \cdot 10^{-3}$   | —             | 2.0           | 2~3                 | 地盤に5~10本/<br>mの亀裂発生の方<br>可能性あり   |

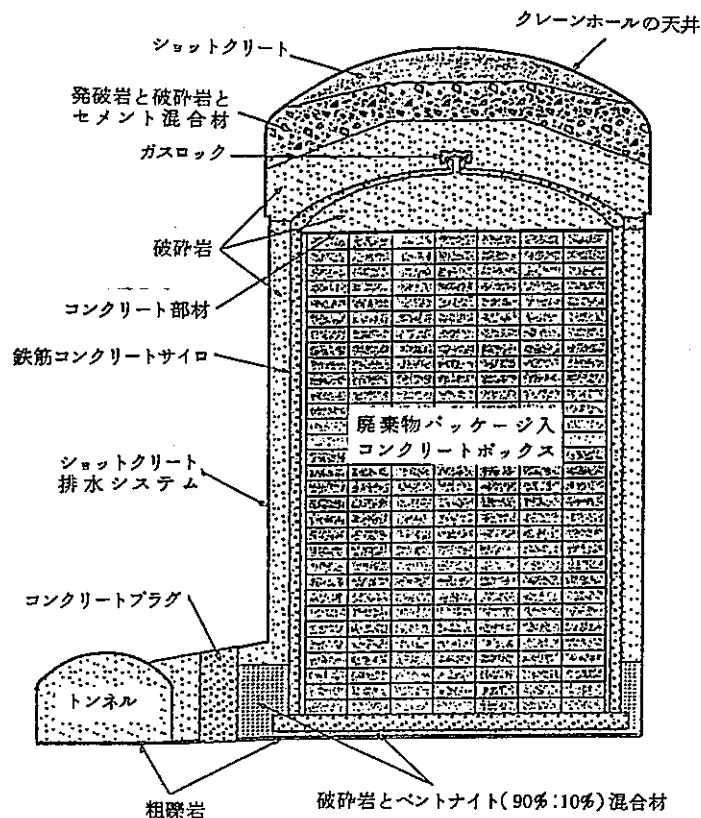


図2.2-7 フィンランドのILWサイロのガスロック

表2.2-6 ガス移行対策

| 国名      | ガス移行対策                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| アメリカ合衆国 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・空洞の再拡張，クリープによるゆるみ領域の閉塞の遅延，既存の亀裂等によるガスの保持能力</li> <li>・ガス除去材の添加による埋戻し</li> <li>・有機物の焼却による除去の効果</li> <li>・圧縮処理による透水性透過性の効果</li> </ul>                                                                                                                         |
| イギリス    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水浸入速度，ガスの発生と気泡の形成による核種移行への影響（間隙の水による飽和度の核種移行への影響）</li> <li>・バックフィル用コンクリートの透水係数は<math>10^{-18}</math> ㎡以上であることから，ガス圧によるコンクリートの危険性はないとしている<sup>21)</sup>。</li> <li>・ファーフィールドモデル内に，まばらに亀裂が存在すれば，ガス圧を上昇させることなく，ガスを逃がすことが可能であるとしている<sup>21)</sup>。</li> </ul> |
| スウェーデン  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ガスは除去する必要がある，そのためサイロ底部をより強固にすること及び不活性粒子（例えば砂）で充填したチューブによるサイロ蓋部の工夫等がある。</li> <li>・ベントナイト／砂混合比を50：50とすると，ガスがサイロ外へ出る限界圧は0.5～1.5Mpaであり，底部充填材にベントナイト10%，砂90%を用いる理由の1つとして，この限界圧を低下させることでサイロ躯体の強度以下に保たれることとしている<sup>22)</sup>。</li> </ul>                         |
| スイス     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ガスの発生による人工バリアの破損</li> <li>・ガスの発生による汚染水の排除と近傍の水文条件への影響</li> <li>・低透水性充填モルタルの開発</li> <li>・ガスを施設外に放出するベントの開発</li> <li>・充填材，ベントの長期性能評価</li> </ul>                                                                                                              |
| フィンランド  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ガスベントを躯体頂部に設置</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                   |

(iii) N E A ワークショップによるガス対策の方向性と今後の課題

表2.2-7 ～ 9にN E A ワークショップの発表論文一覧を示す。これらから各国ともガス発生に関しては、バリアの物理／化学的／地質学的閉じ込め効果、ガス保持能力、ガス圧の発生速度への影響といった従来の保守側解析に対してより現実的な要素の検討の必要性和若干の推測を述べている。

また、ガス対策として空洞周辺の割れ目区域の役割、サイロ躯体上部へのガスロックの設置の必要性についても述べている。

一方、天然バリアのガス移行試算では、二相流T O U G Hコードによる解析結果がいくつか示され、ガスが地下水中の核種移行に大きく影響することを示している。

以上のように、いずれも従来の保守側すぎるガス量試算結果から、二相流解析に用いるパラメータ値の検討あるいは想定される環境下を模擬した室内／サイト試験を経て、毛管圧力や相対透過係数といった値を求め、より現実的なパラメータを用いた場合のガス発生量の算定へ踏み出した段階にある。

したがって今後、人工バリア及び天然バリア材料について、含水率が及ぼす毛管圧力と相対透水係数の影響を、室内実験あるいはサイト試験により把握していく必要がある。また、2.2.1 で検討したようにガス発生量に対して負の作用をする各要素、ガス圧、ガスの地下水溶解、ガス吸着、表面積について、さらに文献調査すると共に室内実験により確認していく必要があると考えられる。

表 2.2-7 O E C D / N E A ワークショップ発表論文の概要

| 文 献 Na | 国, サイト | 対象廃棄物        | 媒 体              | 発 生 源                | 特 徴                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------|--------|--------------|------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ①      | 英, AEA | I / LLW      | 粘 土<br>割れ目系岩盤    | 金属腐食(c)<br>微生物分解(M)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・二相流によるモデル解析の現状紹介。</li> <li>・ガス／水移行論が中心で、発生メカニズムについては一般的事項の確認のみ。</li> <li>・物理的／化学的／地質学的ガス閉じ込めについて述べる。</li> <li>・微量ガス (C-14, Kr-85) についても研究の必要性を示す。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| ②      | 独      | HLW          | 岩 塩              | 岩 塩<br>C<br>放射線分解(R) | <p>Asse 鉱山にて <math>\text{CO}_2</math>, <math>\text{H}_2\text{S}</math>, <math>\text{CH}_4</math> ガスの採取試験を実施し、岩塩自体が保有するガスの確認 (例えば、<math>\text{N}_2 = 0.3 \sim 12.5\text{ppm}</math>, <math>\text{CO}_2 = \sim 11.4\text{ppm}</math>, <math>\text{CH}_4 = 0.1 \sim 2.0\text{ppm}</math>)。</p> <p>炭素鋼コンテナの腐食ガスが最も重要。微生物分解はガラス固化体の場合考慮する必要なし。岩塩水下の腐食速度は <math>0.2\text{mm/y}</math>。</p> <p>放射線 (<math>300\text{Gy/h}</math>) 存在下で腐食速度は <math>1 \rightarrow 14\mu\text{m/y}</math> と大きくなった。</p> <p>今後は岩塩の不均質・分散についても解析の予定。</p> |
| ③      | 米、WIPP | TRU          | 岩 塩              | C<br>M               | <p>ガス注入試験により、空洞周辺的气体分布を実験。ガス／水の透過係数モデルを提案し、計算用に相対透過係数を定義した。</p> <p>岩盤とガスの挙動について経時変化を示し、クリープや圧密によりガス圧が上昇、あるいはガス圧に上昇により岩盤間隙を押し広げるメカニズムを説明。毛管圧力は <math>1\text{Ma} \sim 50\text{Ma}</math> 発生するとしている。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| ④      | スウェーデン | I / LLW      | —                | C                    | <p>金属全面腐食を仮定し、1000年までのガス発生量を試算。ガスは地下水に溶存せず、<math>50\text{kpa}</math> でサイロ内にガスクッションを形成。その後充填材、躯体中をガスが拡散し、<math>280\text{kpa}</math> でサイロの底が抜けるシナリオを述べる。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| ⑤      | フィンランド | I / LLW      | —                | C<br>M               | <p>3500年までのガス発生量を算出。I LLWでは金属腐食ガスが <math>150000\text{m}^3</math> と多く、L LLWでは微生物分解ガスが <math>120000\text{m}^3</math> と多い。</p> <p>I LLWの躯体頂部 (欠球型) には、ガスロック設置図あり。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ⑥      | CEC    | I LLW<br>HLW | 粘土<br>岩塩<br>結晶質岩 | C<br>M               | <p>CECにより実施されているPEGASUSプログラム (15組織、7メンバー) の研究分担紹介。人工バリアに粘土、天然バリアに岩塩、粘土、結晶質岩を研究対象。ボアホール密閉、坑道密閉による移行モデルの実験報告。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| ⑦      | 仏      | HLW          | 花 崗 岩            | C<br>R               | <p>ガス発生の主たる反応は腐食では <math>3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2</math>, <math>\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2</math> としている。</p> <p>これを用いたガス発生量試算式を提案。人工バリアからの発生、放出、特にThermal Release を考慮。</p>                                                                                                                                                                                                                                    |
| ⑧      | 日, PNC | HLW          | 酸素溶存液            | C                    | <p>金属腐食による <math>\text{H}_2</math> ガスの発生量に及ぼす <math>\text{O}_2</math> 溶存量の関係を実験。 <math>\text{O}_2</math> 溶存量が大きい程 <math>\text{H}_2</math> 発生量大。しかし、 <math>\text{H}_2</math> ガス発生に関係する腐食割合は、酸素が大きくなると減少する。また局部腐食についても述べた。Potentio dynamic測定法による。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| ⑨      | 独      | HLW          | 岩 塩              | R<br>岩塩水             | <p>フーリエ変換赤外線分光分析器を用いたガス解析により、<math>\text{CO}_2</math>, <math>\text{CO}</math>, <math>\text{NO}_x</math>, <math>\text{N}_2\text{O}</math> などが10分以内にすばやく定量化可能。</p> <p>岩塩水を用いて <math>\gamma</math> 線によるNaClの放射線分解に起因してコロイド状 <math>\text{Na} + \text{岩塩水} \rightarrow \text{H}_2</math> ガスが発生するとしている。</p>                                                                                                                                                                                                                      |
| ⑩      | 米、WIPP | TRU          | 岩 塩              | C<br>R<br>M          | <p>ガス発生量に係わるピンスケール、ラポテストの報告。現在6ヶ月経過中。 <math>1.26\text{mol/y.drum}</math> の <math>\text{H}_2</math> ガス発生速度で <math>1500\text{mol/drum}</math> 発生するとしている (ただし圧力は <math>150\text{psi}</math>)。 <math>1000\text{psi}</math> では <math>0.275\text{mol/y.drum}</math> (腐食速度 <math>2.90\mu\text{m/y}</math>) となる。このように充填圧が高くなると <math>\text{H}_2</math> ガス圧上昇に伴ない生成速度は遅くなるとしている。</p>                                                                                                                                                |

表 2.2-8 O E C D / N E A ワークショップ発表論文の概要

| 文 献 No. | 国, サイト             | 対象廃棄物 | 媒 体                  | 発 生 源               | 特 徴                                                                                                                                                                                         |
|---------|--------------------|-------|----------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ⑪       | 英、BNFL             | LLW   | 浅地層                  | 金属腐食(c)<br>微生物分解(M) | Drigg 処分場にて地表からのガスサンプリングを 250日間実施。CH <sub>4</sub> (65m mol/l), CO <sub>2</sub> (24m mol/l) が検出された。その他、Lab Test, Bin Testも実施。解析としてガス発生メカニズムGAMMONコード、ガス移行DRINKコードを用いた。                       |
| ⑫       | 独、Asse             | HLW   | 岩 塩                  | C<br>放射線分解(R)       | H <sub>2</sub> ガスの発生の主因は金属腐食と放射性分解としている。金属腐食速度0.1 μm/y で0.39 l/m <sup>2</sup> ・yガス発生。G値を仮定して放射線分解ガスの算定。Asse鉱山内の3ルーム内のガス濃度実測。Konrad鉄鉱山に適用可能かどうかを調査検討。                                        |
| ⑬       | カナダ、AECL           | I/LLW | 浅地層                  | M                   | 4000年間は微生物活動あり。0.08 l/kg・y のガス発生量。土壌モニタリング550 日にてCO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> が発生、ガスクロにて分析した。                                                        |
| ⑭       | 英                  | I/LLW | -                    | M<br>C              | ガス発生メカニズムGAMMONコードの紹介。微生物分解について8種類、金属腐食について3種類の化学反応式を環境条件(好気性、嫌気性など)により自動的に選択し、ガス発生量を求める。微生物の影響は長く継続されるとしている。                                                                               |
| ⑮       | ベルギー               | HLW   | 粘土                   | -                   | Boom粘土に係わるMEGASプロジェクトの紹介。放射線分解により粘土中の鉄が3価に酸化され、H <sub>2</sub> ガスを吸収するメカニズムを説明。H <sub>2</sub> ガス圧を低下させる効果がありとしている。                                                                           |
| ⑯       | スイス、Grimsel        | -     | 花 崗 岩                | -                   | 花崗岩中の含水量測定(地下450M)。測定は地下空洞壁面から90cmまではTDR法による含水量測定(測定精度1%以下)、160 cmまではthermocouple syclometer を用いて毛管圧力を測定(最大50Mpa)した結果の報告                                                                    |
| ⑰       | 独立、Asse            | HLW   | 岩 塩                  | 岩 塩                 | CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> Sガスサンプリングを岩塩を対象に実施。地下 800m、昇温によりガス量が1~2桁増加。岩塩の熱+放射線分解によるガス放出の影響を調べた。                                                                     |
| ⑱       | カナダ、AECL           | -     | EDZ<br>(空洞周辺ゆるみゾーン)  | -                   | 空洞上部に形成されるガスクッションによって 240mレベルでのボアホール内真空透過法を用いたEDZ透過係数の測定。コード名VACUUMを用いた透過計算実施。<br>EDZがガスベントの役目をする。H <sub>2</sub> ガスの発生・蓄積により水を押し出す一方で、気泡が処分空洞上部にガスクッションとして形成するモデルを提案。                       |
| ⑲       | 仏                  | HLW   | 結晶質岩<br>(花崗岩)<br>頁 岩 | R<br>C              | ニアフィールド内のガス量の評価をAQUAGAZコードを用いて種々の概念研究。H <sub>2</sub> ガスは考慮する必要性ありとしている。解析モデルとして廃棄体/埋戻し材/プラグ/トンネルモデルを提案。                                                                                     |
| ⑳       | 米<br>スウェーデン<br>スイス | I/LLW | -                    | C                   | TOUGHコードによる岩盤亀裂媒体中のガス/水移流の計算。ガス発生量は0.4m <sup>3</sup> /y H <sub>2</sub> とし、毛管圧力はNarasimhan式を用いた。最大65bar のガス圧に対して計算。ガス源はFe, Al, Zn。Corey 式を用いて相対透過係数算定。セメント質・埋戻材の透過係数は10 <sup>-16</sup> mとした。 |
| ㉑       | 仏                  | ILM   | 粘 土<br>花 崗 岩         | 金属腐食(C)<br>放射線分解(R) | 二相流モデルとガス溶存モデルに適したFEMコードの開発(Black Oil コード)。<br>H <sub>2</sub> ガスを対象。                                                                                                                        |

表 2.2-9 OECD/NEAワークショップ発表論文の概要

| 文献 No | 国、サイト                 | 対象廃棄物      | 媒体                      | 発生源           | 特 徴                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------|-----------------------|------------|-------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ②     | 米、WIPP                | TRU        | 岩 塩                     | C<br>微生物分解(M) | 金属腐食ガスは発生速度 $2.66\text{mol/drum}\cdot\text{y}$ で500年継続、微生物分解ガスは $0.86\text{mol/drum}\cdot\text{y}$ で500年継続、ドラム合計6804本として数値解析。ガス圧上昇により処分空洞は膨脹するが、一方で内圧上昇によりガス発生速度は減少するとしている。ガス-塩水二相流により割れ目の幅が広がる。195年経過後最初の空洞体積の10%以下に減少、その時のガス内圧は9~10Mpaとなる。これによりガス発生速度は減少し、間隙率は $0.3 \rightarrow 0.09$ となり、最終的には14.8Mpaとなる。                                                                      |
| ③     | 独                     | 発熱性<br>ILW | 岩 塩                     | R<br>C        | ボアホール内ガス圧上昇モデルの開発。<br>地下300mに2200ℓドラムが発生するガス圧力測定とガスクロ分析結果報告。<br>放射線分解により発生するガス量、腐食速度 $1\cdot 10^{-6}\text{m/y}$ 及び $10\cdot 10^{-6}\text{m/y}$ 岩塩の透過係数を変えて計算した。                                                                                                                                                                                                                   |
| ④     | 米、WIPP                | TRU        | 岩 塩                     | C<br>M        | TOUGH2コードを用いてガス/塩水移行を計算。透過係数について議論。Interded層にはYucca Mt.の特性曲線を使用。<br>腐食速度 $2\text{mol/drum}\cdot\text{y}$ 450年、微生物分解 $1\text{mol/drum}\cdot\text{y}$ で600年間ガス発生継続の処分空洞寸法は $4\text{m}^H \times 10\text{m}^W \times 90\text{m}^L$ ドラム数6800本。1000年間の圧力上昇/ガス移行計算感度解析を透過係数をかえて実施。450年時点で最大34.5Mpa毛管圧力及び相対透過係数算定式はSandia functionと、Brooks & Corey法を用い、透過係数に及ぼす影響は毛管圧力より相対透過係数が大きいことを示した。 |
| ⑤     | 独、Konrad              | —          | 鉄 鉱 床<br>(堆積岩)          | —             | Konradの地下1000mの鉄鉱石中にボアホール2本(86mmφ, 14m長)を設け、Heガスの透過係数を減圧法にて実測。<br>$\text{H}_2$ の室内試験とFEMにて透過性解析も実施。                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| ⑥     | 仏、ANDRA               | —          | 堆 積 岩<br>(Paris Basion) | 堆積岩           | Paris Basion堆積岩1kg当り10 mlのガス蓄積量を確認。地中ガスとして、 $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2$ , Ar, Heの存在を確認。地下500~700mで、ガス移行フラックスが $0.25\text{ℓ/m}^2\cdot\text{h}$ を実測。                                                                                                                                                                                                               |
| ⑦     | カナダ, URL              | —          | Bonnet<br>花 崗 岩         | —             | Heガス注入試験により割れ目系領域の移行速度は $22\text{ℓ/分}$ 。移行開始圧(Threshold Pressure)の計算との比較でよい一致性を示す。ガス圧上昇により水を押しつけながら亀裂中を移行するとしている。                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| ⑧     | スイス<br>Dverbauenstock | —          | 不 飽 和<br>岩 盤            | —             | TOUGHコードを用いて非定常注入法による不飽和に透水係数特性を解析し絶対透過係数を求めた。また実験値とよい一致性を示した。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| ⑨     | 独、Konrad              | —          | —                       | —             | ECLIPSEコードによる二相流2次元解析の報告。 $\text{H}_2$ ガス発生量を5000年で42000 $\text{m}^3$ とした。<br>Konradはガスが発生しても安全性に影響ないことを強調。                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| ⑩     | 英                     | —          | 地下700 m<br>の割れ目系<br>岩 盤 | —             | ガスの割れ目系岩盤移行のモデリング(例えば平行面亀裂モデルなど)の提案。<br>ガスを非圧縮性として簡単な式を用いて発生量、透過係数を導出した。                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| ⑪     | ベルギー                  | —          | 粘 土                     | —             | MEGASプロジェクトの紹介。Oedmeterを用いた透過試験結果の報告。水圧2Mpa、ガス圧2.2Mpaで移行が始まるとしている。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| ⑫     | 英<br>伊                | —          | 土 壤                     | 深地層           | 土壌包蔵ガスのサンプリング分析( $\text{He}$ , ラドン, $\text{CO}_2$ , $\text{O}_2$ )結果報告。                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

## 2.2.2 廃棄体からの放射性核種の浸出

TRU廃棄物からの核種の浸出は、廃棄物自体が種々の形状、汚染／放射化形態を有する雑廃棄物が多いため、HLW等ガラス固化体のような均質モデルのみで評価を行うことには無理がある。不均質廃棄体の浸出特性については従来瞬時放等の保守側のモデルが適用されているが、実際の浸出特性に対する安全裕度を把握するため実地的な浸出予測モデルが必要である。本節では、まず従来適用されてきた均質な廃棄体からの浸出モデルについて調査し、評価手法について整理することで均質モデルの基本的考え方、浸出量の大小を検討した。次に、これらの考え方を踏まえて不均質固化体に対するモデルの調査、検討を行い、現在報告されている不均質モデルによる浸出の考え方はほとんどないが、唯一存在する不均質簡易モデルの紹介を行なった。

### (1) 主要な浸出モデル

#### (i) 均質媒体内の浸出モデル<sup>1)</sup>

不飽和／飽和、多孔質、不均質媒体の中の2次元核種移行コードFEMWATER及びそれを改良したBLTコードに用いた浸出モデルを検討するにあたり、浅地中処分を対象とした浸出モデルとして、境界条件を考慮した6種類の浸出モデル例を紹介する。

以下に浸出モデルについて紹介する。

#### (a) 半無限媒体を対象とした廃棄体表面からの浸出

廃棄体中央 ( $x = 0$ ) における核種フラックスを0、半無限境界 ( $x = \infty$ ) での核種水中濃度を0とすると、廃棄体表面 ( $h$ ) での核種フラックス： $J_D$  は次式で与えられる。

$$J_D = \frac{1}{2} C_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}} e^{-\lambda t} \left[ 1 - e^{-\frac{h^2}{Dt}} \right] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $D$  : 拡散係数

$C_0$  : 廃棄体内の初期濃度

$\lambda$  : 崩壊定数

$t$  : 経過時間

$h$  : 廃棄体中心から表面までの距離

この式で、崩壊を考慮せず、定常であると仮定した場合、一次元流れをこのモデルのように中心から1方向でなく両方向にとると、以下に示す拡散浸出式で表される。

$$J = I_i \left( \frac{De}{\pi \cdot t} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{S_w}{V_w}$$

(b) 有限な平面で境界フラックス0での浸出

廃棄体中心から表面（0～ $h$ ）及び表面からある一定区間（ $h \sim \ell$ ）を対象区域としている。

境界条件として廃棄体中心（ $x = 0$ ）でゼロフラックス、外側境界（ $x = \ell$ ）でもゼロフラックスとする。廃棄体表面からの核種フラックス： $J_D$  は次式となる。

$\frac{D \cdot t}{\ell^2} < 1$  の場合

$$J_D = \frac{1}{2} C_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}} e^{-\lambda t} \cdot \sum_{n=-N}^N \left( e^{-\frac{n^2 \ell^2}{Dt}} - e^{-\frac{(h-n\ell)^2}{Dt}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$\frac{D \cdot t}{\ell^2} \geq 1$  の場合

$$J_D = \frac{2 D C_0 e^{-\lambda t}}{\ell} \cdot$$

$$\sum_{n=1}^N \sin^2 \left( \frac{n \pi h}{\ell} \right) \exp \left[ -\frac{n^2 \pi^2 D t}{\ell^2} \right] \dots\dots\dots (3)$$

(c) 有限な平面で境界濃度 0 での浸出

このモデルはフラックスとして最も大きくなる。外側境界での移行が非常に早い場合に適合するため浅地中処分にも適用できる。

$x = 0$  でゼロックス, 廃棄体表面 ( $x = h$ ) で濃度を 0 とする。それより外側は考慮しないモデルである。

$$\frac{D \cdot t}{h^2} < 1 \text{ の場合}$$

$$J_D = C_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}} e^{-\lambda t}$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left( e^{-\frac{n^2 h^2}{Dt}} - e^{-\frac{(n+1)^2 h^2}{Dt}} \right) \dots\dots (4)$$

$$\frac{D \cdot t}{h^2} \geq 1 \text{ の場合}$$

$$J_D = 2 D \frac{C_0}{h} e^{-\lambda t} \cdot$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{\pi^2 (2n+1)^2 Dt}{4h^2}} \dots\dots\dots (5)$$

(d) 有限な円筒形で境界濃度0での核種フラックス

廃棄体を半径R, 高さHとし, その表面で濃度0とする。このモデルは最大濃度勾配を示し, 結果的にはフラックスが大きくなる。

積算部分放出量Cumulative Fraction Release を用いて表示している。  
CFR < 0.2 ならば(a) の半無限モデルを, 0.2 ≥ ならば下式を用いるよう提案している。

$$CFR = 1 - \frac{32}{\pi^2} \frac{S_p}{S_c} \dots\dots\dots (6)$$

$$S_p = \sum_{n=1}^{N-1} \exp \frac{[-(2n-1)^2 \pi^2 Dt/H^2]}{(2n-1)^2} \\ + \frac{N}{(2N-1)^2} \exp [-(2N-1)^2 \pi^2 Dt/H^2] \\ - \frac{1}{2H} \sqrt{\pi Dt} \operatorname{erfc} [(2N-1) \pi \sqrt{Dt/H}] \dots\dots\dots (7)$$

$$S_c = \sum_{m=1}^{M-1} \frac{1}{\beta_m^2} \exp [-\beta_m^2 Dt/R^2] \\ + \left[ \frac{1}{\beta_M f_M} + \frac{1}{2\beta_M^2} \right] \exp [-\beta_M^2 Dt/R^2] \\ - \frac{1}{R f_M} \sqrt{\pi Dt} \operatorname{erfc} (\beta_M \sqrt{Dt/R}) \dots\dots\dots (8)$$

ここで

$$f_M = \pi - \frac{1}{8\pi M^2}$$

$\beta_m$  : 第0種ベッセル関数の0値

M, N = 10程度

(e) 溶解放出 (Dissolution Release) モデル

廃棄体からの核種溶解速度に基づき、フラックスを次式で示している。

$$J_{dis} = U \cdot C_{wf} \left(1 - \frac{C_s}{C_{sat}}\right) \dots\dots\dots (9)$$

ここで  $U$  : 溶解速度

$C_{wf}$  : 廃棄体内の核種濃度 (核種インベントリを廃棄体体積で割る)

$C_s$  : 水中核種濃度

$C_{sat}$  : 溶解度限度

(f) 流出放出 (Rinse Release) モデル

水中濃度を次式で示している。

$$C = AM \cdot \left(1 - \frac{C_s}{C_{sat}}\right) / (\theta \cdot Vel) \quad C < C_{sat} \dots\dots\dots (10)$$

(10)を次式に代入して浸出率を求めている。

$$J_R = C \cdot V_D \cdot Ab / Awf \dots\dots\dots (11)$$

ここで  $C_s$  : 初期水中濃度

$C_{sat}$  : 溶解度限度

$\theta$  : 体積含水率

$Vel$  : 廃棄体体積

$C$  : 濃度

$AM$  : 質量 (核種インベントリ)

$V_D$  : ダルシー速度

$Ab$  : 流出面積

$Awf$  : 廃棄体面積

$J_R$  : 浸出率

最後に浸出率の比較として、(a) ~ (c) に示す平面モデルに対して図2.2-8 に示している。これから(c) ゼロ境界濃度モデルが他のモデルに比べ40%程度大きい値を示すことがわかる。

その他文献<sup>3)</sup>によれば、液境膜－固化体内拡散の複合モデルの厳密解を示しているが、これは浸出後の媒体まで考慮したモデルであるため、基本的な浸出モデルに何ら変わりがないため割愛する。

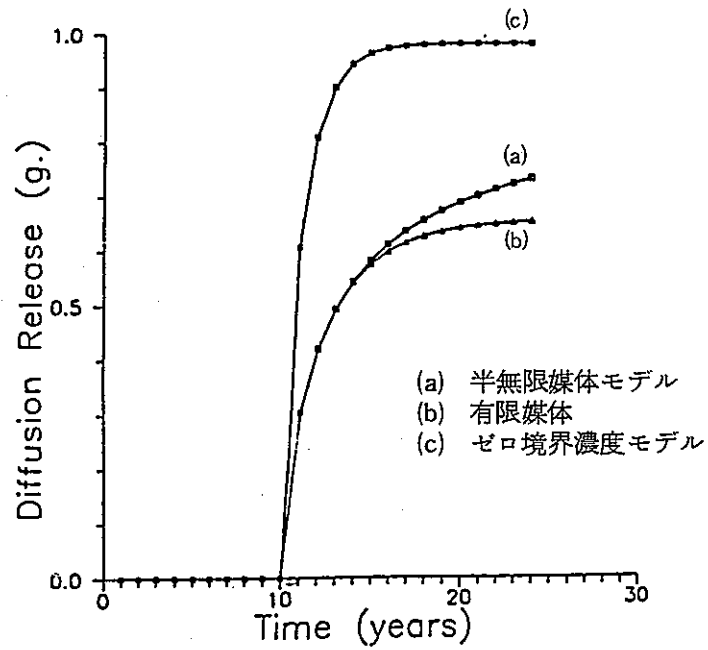


図2.2-8 3平面拡散モデルの拡散による核種放出量の比較

(ii) 不均質媒体内の浸出モデル

(a) 拡散バリアをもつ廃棄体からの一次元浸出モデル

均一濃度  $C_0$  [ $\beta q/m^3$ ] (i) を持つ媒質から厚さ  $h$  [m] の拡散バリア層を経て漏洩してくる核種  $i$  のフラックス  $j_g(i, t)$  [ $\beta q/m^2 \cdot y$ ] は下式で表わされる。ただし廃棄物自体の不均質性についてはこのモデルに適しない。

$$j_g(t, i) = \frac{C_0(i)D(i)}{h} \exp(-\lambda(i) \cdot t) \left( 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \exp\left(-\frac{D(i) m^2 \pi^2 t}{h^2}\right) \right) \dots (12)$$

$D(i)$  : 拡散係数 [ $m^2/y$ ]

$\lambda(i)$  : 崩壊定数 [ $1/y$ ]

(b) P I C<sup>\*</sup>をバリアとした不均質濃縮廃液ペレットの浸出モデル<sup>2)</sup>

浅地中処分を対象に、原子力発電所から出る濃縮廃液の乾燥ペレット ( $20\phi \times 10mm$  又は  $30 \times 20 \times 10mm$ ,  $Na_2SO_4$ ) を 200 ℓ ドラム缶に不均質に詰め、固化材としてセメントガラス (珪酸ナトリウム+珪酸塩エステル+セメント)、またドラム缶内強度維持用にスチールファイバを用いた廃棄体の浸出モデルを検討した。

ドラム缶内構成概念図を図2.2-9に示す。

モデル化には、次の前提条件を設けている。

- ① P I C はバリアとして機能する。
- ② ペレット、固化材は固有の物理特性 (拡散係数、分配係数) を有する。
- ③ P I C, ペレット、固化材はポーラスであり、Fickの拡散方程式に従って核種が移行するものとする。
- ④ 吸着は瞬時に平衡達し、かつ可逆的である。
- ⑤ ペレットと固化材は体積比率を考慮して拡散方程式に適用する。

a. P I C モデル

P I C 内 (図2.2-9 の  $x \leq x_0$ ) では、P I C からの核種の浸出量が非常に小さいため、P I C 近傍の核種のみが浸出するだけと考えられる。従って式(13)だけで十分であるとしている。

\* ) P I C : Polymer Impregnated Concrete

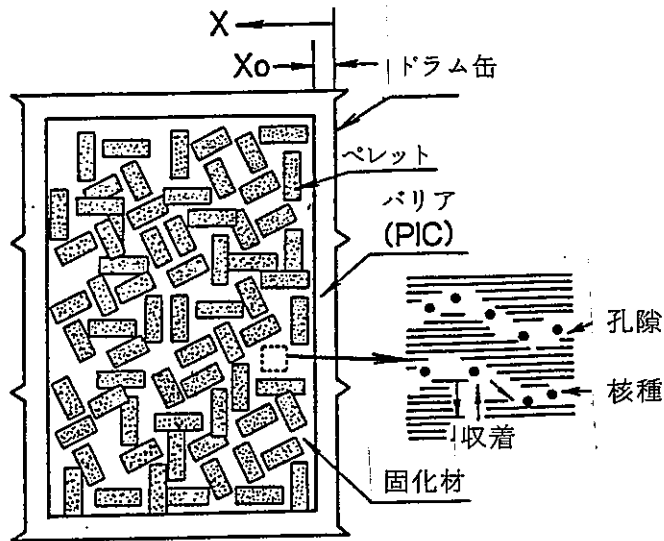


図 2.2-9 ペレット/ドラム断面

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{a} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $C$  = 核種濃度、 $C = C_s \cdot \rho + C_p \cdot \epsilon$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )

$t$  = 時間 (s)

$D$  = 収着を除く拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$a$  = 収着係数 (-)

$x$  = パッケージ表面から内側に向う距離 (m)

$a$  については、収着が瞬時平衡に達し、可逆的であるとする、下式が適用される。このようにして、(15)式を(13)式に代入して  $C$  を求める。

$$Kd = \frac{C_s}{C_p} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$a = \epsilon + Kd\rho \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、

$C_s$  = 収着した核種濃度 ( $\text{Bq}/\text{kg}$ )

$C_p$  = 間隙水中核種濃度 ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )

$\epsilon$  = 孔隙率 (-)

$Kd$  = 分配係数 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

$\rho$  = かさ密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

b. ペレット及び固化材モデル

ペレット及び固化材（図2.2-9 の  $x > x_0$  ）混合部分では、下式により不均質特性を体積分率：  $r$  を考慮することにより計算できるものとしている。

$$D = D_s r + D_p (1-r) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$a = a_s r + a_p (1-r) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで、固化材の体積分率（－）

$D_s$  = 固化材の拡散係数（ $\text{m}^2/\text{s}$ ）

$D_p$  = ペレットの拡散係数（ $\text{m}^2/\text{s}$ ）

$a_s$  = 固化材の吸着係数（－）

$a_p$  = ペレットの吸着係数（－）

試算に用いるパラメータを表2.2-10に示す。式(13)について側面、底面のPICバリアからの浸出量が小さく無視できるとすると、式(18)となる。

表2.2-10 パラメータリスト

| パラメータリスト                                  |       |                     |                     |                                  |
|-------------------------------------------|-------|---------------------|---------------------|----------------------------------|
| パラメータ                                     |       | セメントガラス             | PIC                 | $\text{Na}_2\text{SO}_4$<br>ペレット |
| 拡散係数<br>$D$ （ $\text{m}^2/\text{s}$ ）     |       | $3 \times 10^{-11}$ | $2 \times 10^{-17}$ | $1.3 \times 10^{-9}$             |
| 分配係数<br>$K_d$ （ $\text{m}^3/\text{kg}$ ）  | $C_s$ | 0.087               | <0.0001             | <0.0001                          |
|                                           | $S_r$ | 4.3                 | 0.019               | <0.0001                          |
|                                           | $C_o$ | 0.59                | 0.93                | <0.0001                          |
| かさ密度<br>$\rho$ （ $\text{g}/\text{cm}^3$ ） |       | 1.48                | 2.46                | 2.2                              |
| 孔隙率 $\varepsilon$ （－）                     |       | 0.26                | 0.05                | 1.0 <sup>*)</sup>                |

<sup>\*)</sup>  $\varepsilon = 1.0$  とすることで、ペレットにほとんど遅延効果を期待していない。

$$q = \frac{1}{C_0 \times h} \int_0^t \frac{D}{a} \times \left( \frac{C}{x} \right)_{x=0} dt \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$= \frac{2}{h} \times \left( \frac{D \times t}{n \times a} \right)^{0.5}$$

ここで、 $q$  : 浸出率 (—)

$C_0$  = 核種の初期濃度

$h$  = ペレット固化材の高さ

これをCrank-Nicolsonの差分法を用いてメッシュ数1000,  $\Delta t = 8000$ 秒で試算している。

図2.2-10に試算結果を示すが、実験値から離れている。これは上部の露出したペレット中の $C_0$ がセメントガラスを収着通過せずに溶解するためである。そこで式(18)を修正して式(19)を提案している。その結果図2.2-11, 2.2-12に示すように実験値と一致した。

$$q = \frac{2}{h} \times \left( \frac{D}{n \times a} \right)^{0.5} \times (t^{0.5} - t_0^{0.5}) + q_0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

### c. PICからの浸出

PICからの浸出については、PICの拡散係数が小さいことから図2.2-13に示すように浸出率は他のケースより非常に少ない。また、表面積／体積を考慮することで、供試体の浸出率をドラム缶での浸出率に換算することができる。(最初の1年で $3 \times 10^{-6}$ )

浸出率と $S/V$ の関係は式(20)に示すとおりである。

$$q \propto \frac{S}{V} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 $S$  = 表面積 ( $m^2$ )

$V$  = 体 積 ( $m^3$ )

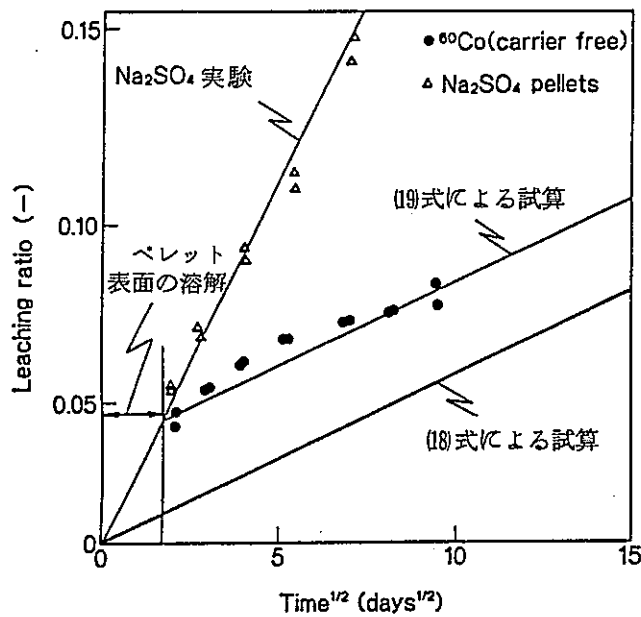


図 2.2 - 1 0 固化材／ペレット部分の  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  と Co の浸出率

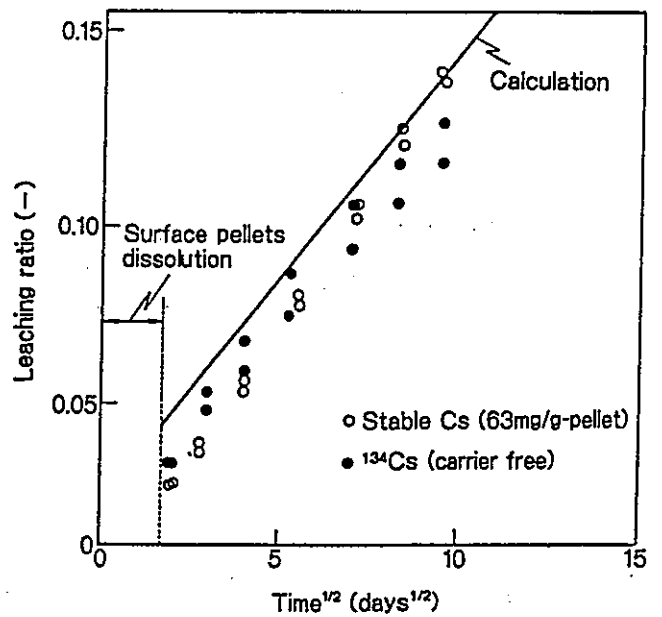


図 2.2 - 1 1 Cs の固化材／ペレット部分の浸出率

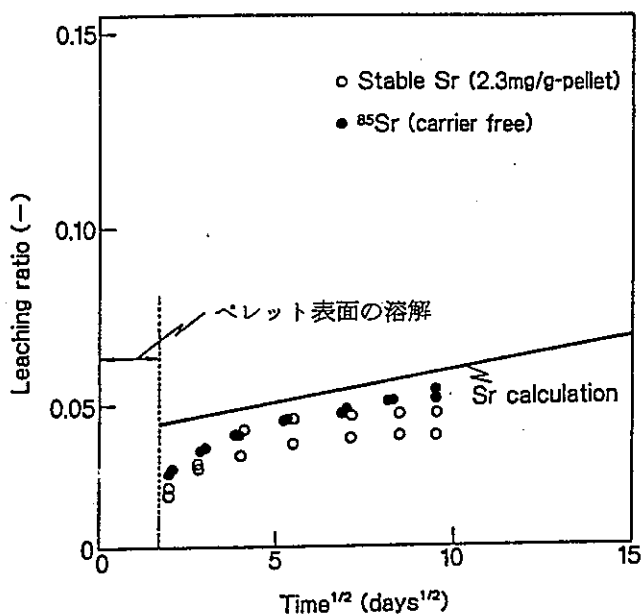


図 2.2 - 1 2 Sr の固化材／ペレット部分の浸出率

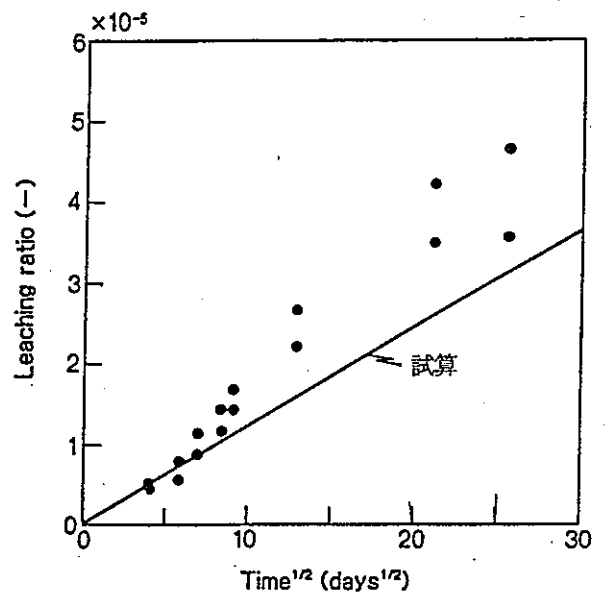


図 2.2 - 1 3 Cs を対象とした P I C バリアの浸出率

## (2) 不均質な廃棄体に対する浸出モデルの考え方

### (i) 不均質（固化体）に対する浸出モデル適用の現状

現時点において不均質（固化体）に対して不均質性を定量的に数値モデル化し、実用化されている浸出モデルはないものと考えられる。参考として最近の安全評価研究で用いられた浸出モデルを表2.2-11に示す。

### (ii) モデル選定、開発の考え方

#### (a) 不均質性の分類

##### ①放射能の分布に係わる不均質性（核種の移行距離に関係）

→放射能濃度の平均をとる等、均質に近似する。

→放射能分布のシミュレート、あるいは浸出特性の統計処理等によりモデル化する。

##### ②物性の分布に係わる不均質性（核種の移行経路、速度に関係）

→物性の加重平均をとる等、均質に近似する。

→物性分布のシミュレート、あるいは浸出特性の統計処理等によりモデル化する。

##### ③放射能の汚染形態が多様、不均質であるもの（核種の保持、溶出特性に関係）

→汚染形態を特定する、廃棄物からの瞬時溶離を仮定する等、簡略化を行う。

→汚染の状態によりモデルを変えて核種の溶離を評価し、さらに固化媒体中の移行を評価する。（付着性汚染：放出係数，放射化汚染：溶解律速）

不均質性（固形成）廃棄物の浸出特性をモデル化する場合には上記の手法の選択、組合せになる。

#### (b) 不均質性を浸出モデルに反映する上での考え方

①比較的均質な放射能の分布を有する、類似形状の固形物が分散した状態で固形成された廃棄物； 上記②

（濃縮廃液ペレット固化体等）

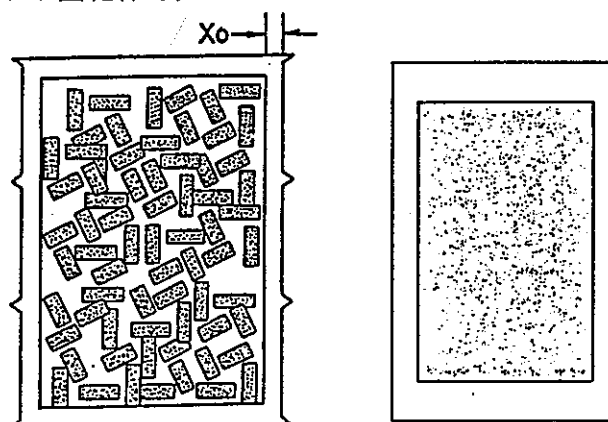


図2.2-14 不均質廃棄体タイプ1

#### 評価モデル例

- ・最小固化媒質厚さ，容器（または容器内張り）厚さを設定。
- ・廃棄物の存在する領域は均質と見なして拡散による移行により評価を行う。

適用性；モデル化，検証等が比較的容易である。

- ②多様な汚染形態による類似形状の固形物が分散した状態で固形化された廃棄物  
； 上記②×③  
(ハル・エンドピースセメント注入固化体)

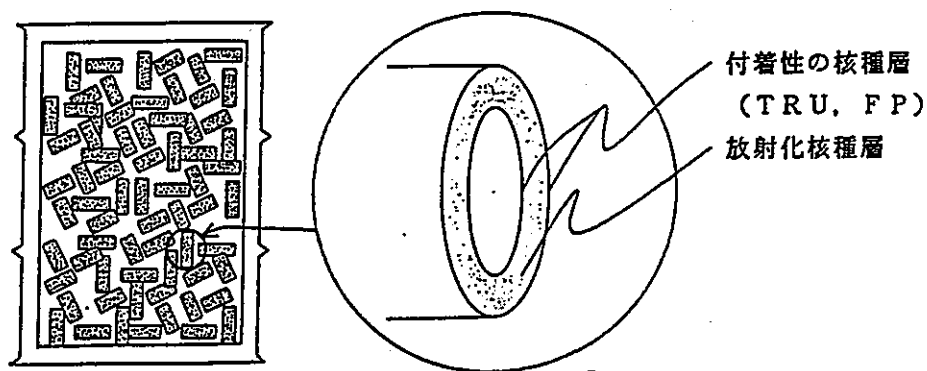


図2.2-15 不均質廃棄体タイプ2

評価モデル例

- ・形状を特定し，付着性の核種層については放出係数等による核種の溶離と媒体中の拡散移行を組合せたモデルを，放射化核種層については金属の腐食溶解律速による核種の溶出と媒体中の拡散移行を組合せた個別要素モデル。

適用性；汚染の状態により検証が比較的困難な場合がある。

- ③多様な汚染形態で不均質に汚染された，形状の異なる固形物が分散した状態で固形化された廃棄物； 上記①×②×③  
(雑固体セメント注入固化体)

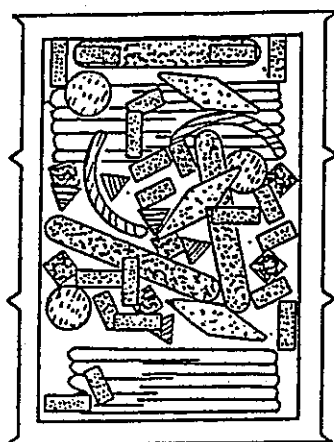


図2.2-16 不均質廃棄体タイプ3

評価モデル例

- ・汚染形態，放射能分布が極めて多様である場合，これらの特定ができないと考える。

- ・この場合には浸出試験結果の統計処理、次元解析等により、半実験的な浸出モデルを適用することが考えられる。

適用性；実廃棄体の特性把握，浸出性把握に多数の試験によるデータの取得が必要。

### (Ⅲ) 不均質性を浸出モデルに適用する上での困難さ

以上のように不均質な廃棄体の浸出特性をモデル化する上では、以下に示すような問題点を考慮する必要がある。

- ①廃棄体中の放射能分布，物性の分布を解析的なモデルに反映させる場合，汚染の形態，廃棄物の充填状況が特定できない場合にはモデル化は困難となり，実験的なモデルの適用を考慮せねばならない。
- ②固化媒体の物理的バリア機能を拡散等によりモデルに反映する場合，固化媒体自体の長期性能の評価が困難である場合が多い。
- ③汚染状況による核種溶離の程度を解析的に反映させる場合，汚染形態が様々である廃棄物は定量化が困難であり，保守的なあるいは多数の試験結果に基づく実験的なモデルの適用を考えざるを得ない場合がある。

以上に記したように，放射性廃棄物の不均質性を解析的にモデル化することは，廃棄物の特性によって困難な場合が多い。したがって，安全評価に用いるモデルについては以下のような方向性を持って研究を実施すべきとも考えられた。

- ・保守側のモデルでは十分な裕度を持って安全基準をクリアできない，あるいは浸出特性の変化が被ばく線量の変化に対する感度が高い，安全評価上クリティカルな廃棄物についてのみ廃棄体特性に即した浸出モデルの開発，検証を行う。
- ・浸出のモデル化，及びモデルの検証が容易な性状の固形物への処理を提言し，処理技術の開発を実施する。

等の戦略をとることを考慮する。

しかしながら，評価における安全性の裕度を把握するためには，現実的な浸出特性をできるだけ正確にモデル化し，保守側での評価との相違を明らかにしておく必要がある。したがって，各種の廃棄物についてこのようなモデル化を行い，浸出試験結果との比較によりモデルを検証するステップが今後必要となる。

表2.2-11 TRU, L/I LWに適用されている浸出モデル

| 国／ケース            | 廃棄物区分                 | 処分方法              | 浸出モデル                            | 備 考                                                                                                                              |
|------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| フランス<br>CEA評価    | L LW                  | 浅地中処分<br>(堆積層)    | 放出係数モデル<br>分配平衡モデル               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・監視期間中評価</li> <li>・浸出試験を基礎とした実験的モデル</li> <li>・監視期間後評価</li> <li>・廃棄体、充填材が砂状態に変化</li> </ul> |
| PACOMA評価         | L/I LW                | 地層処分<br>(花崗岩)     | 溶解度限度モデル                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・セメントの劣化によるpH変化と溶解度変化を連成</li> </ul>                                                       |
| アメリカ<br>10CFR61  | L LW                  | 浅地中処分<br>(堆積層)    | 放出係数モデル                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・浸出、化学的、物理的安定性を考慮して設定</li> </ul>                                                          |
| BLT(BNL)         | L LW                  | 浅地中処分<br>(礫堆積層)   | 拡散浸出モデル<br>金属溶解律速モデル<br>表面リンスモデル | <ul style="list-style-type: none"> <li>・均質固化体に適用</li> <li>・金属廃棄物に適用</li> <li>・表面汚染物等に適用</li> </ul>                               |
| WIPP(SEIS)       | TRU                   | 地層処分<br>(岩塩層)     | 溶解度限度モデル                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・全廃棄体に適用</li> </ul>                                                                       |
| スイス<br>NGB-85    | L/I LW                | 地層処分<br>(山腹坑道)    | 瞬時溶解モデル                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ハル・エンドピースを除く全廃棄体に適用</li> </ul>                                                           |
| post NGB-85      | L/I LW<br>(TRU廃棄物は除く) | 地層処分              | 金属溶解律速モデル<br>溶解度限度モデル            | <ul style="list-style-type: none"> <li>・放射化金属廃棄物に適用</li> <li>・その他の廃棄物に適用</li> </ul>                                              |
| ベルギー<br>PACOMA評価 | I LW                  | 地層処分<br>(粘土層)     | 瞬時溶解モデル                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・全廃棄体に適用</li> </ul>                                                                       |
| イギリス<br>Nirex 評価 | L/I LW                | 地層処分<br>(火成岩)     | 溶解度限度モデル                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・全廃棄体に適用</li> </ul>                                                                       |
| PACOMA評価         | I LW                  | 地層処分<br>(粘土層)     | 放出係数                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・浸出試験を基礎とした実験的モデル</li> <li>・廃棄体内外の濃度差を駆動力</li> </ul>                                      |
| スウェーデン           | L/I LW                | 地層処分<br>(海底下岩盤)   | 分配平衡モデル                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・サロ、ボロ内全I LWに適用</li> </ul>                                                                |
| 日 本<br>JNFI申請書   | L LW                  | 浅地中処分<br>(堆積層)    | 分配平衡モデル                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・均質固化体に適用</li> </ul>                                                                      |
| 同上改定前            | L LW                  | 浅地中処分<br>(凝灰岩、砂岩) | 拡散浸出モデル                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・均質固化体に適用</li> </ul>                                                                      |

### (3) まとめと今後の課題

不均質な固化体からの浸出手法については詳細なモデルが見当たらない。そこで今後、次の検討項目が考えられる。

① 均質媒体と仮定して数値モデル化する。この場合、均質モデルがどのような安全裕度をもつかを確証するため、実廃棄物による浸出試験、劣化試験の実施が必要。

② 廃棄物の放射化状態、形状等を数値モデル化して、限定空間（例えばドラム缶）を対象として解析し、廃棄物個々が持つ浸出率を合算する。

（例えば個別要素モデルによる解析）

③ 不均質媒体内の放射能、あるいは廃棄体の浸出特性を、ある一定の分布を有するものと仮定して評価する確立的評価方法の検討。

④ どのようなパラメータがどの程度利くかを経験、物理的現象を考慮して作り上げる次元解析による構成方程式の作成－解析方法。

このためには現在提案されているモデルに用いられているパラメータ以外で浸出に利くと考えられる新しいパラメータを取り込みうるような廃棄体内容の正確なデータの入手が必要となる。

### 2.2.3 微生物活動による現象

従来、放射性廃棄物の安全性は放射性核種及び設置されるバリア、あるいは主な移行媒体となる地下水に対する化学的、物理的特性と、地下水の移行経路・速度を決定する処分サイトの地質学的・水文学的特性を中心に性能評価研究が行われて来た。

微生物による影響については、その活動が比較的地上に近いと考えられた浅地中を処分地層とする低レベル放射性廃棄物に対して、アスファルト固化体の劣化等について検討された例があるものの、低レベル放射性廃棄物の毒性維持期間が比較的短いことなどのため、処分の安全性に対して決定的な影響を及ぼすものとは考えられていなかった。

ところが、近年の研究からは長・半減期核種を有意に含むTRU廃棄物等の地層処分に対する長期の安全性を評価する上で、深地層等の極限環境においても微生物の生存、増殖が否定できないこと、また微生物活動による代謝産物による処分環境の変化がバリア機能、あるいは主要核種の化学的特性の変化を生じさせる恐れのあることから、その影響を改めて明らかにする必要性が高まって来ている。

以下では、TRU廃棄物の処分において微生物活動によって生じ得る影響と、処分環境における微生物活動に関する研究の状況の概要を示すものとする。

#### (1) 処分場において検討対象となり得る微生物活動とその影響

TRU廃棄物の一部は有機物を含み、その構成物質が多様であるところから、高レベル放射性廃棄物と異なり微生物のエネルギー源、炭素供給源等が豊富に存在し得る。したがって、より微生物の繁殖が起こり易い条件が整っていると考えることができる。また、微生物は以下の特徴を有することにより、生物圏のみでなく岩石圏においても存在し、処分場環境に影響を与える恐れがあるものとされており、これらの特徴はその活動をモデル化する上で注意しなければならず、その開発を困難にしている原因ともなっている。<sup>1)</sup>

- ① 微小なサイズ故に、水・大気・生体中への分散が容易に行われる。
- ② 条件により短い世代時間で急速な増殖を起こす。
- ③ 代謝経路上において、代謝の調節、同調、酵素の誘導、抑制に大きな柔軟性を持ち、代謝の変化が著しい。

- ④ ③により，新しい生息地に急速にコロニーを形成する。
- ⑤ 極限環境においても耐性を示す。
- ⑥ 遺伝メカニズムの調節により，広範な表現型変異が見られる。
- ⑦ 他の生物と相助的共生を形成することがあり，その場合，代謝の変化を増加させる他，②～⑥に示す特性がさらに顕著となる。

以上に示した特徴から，微生物活動とそれによって生じ得る影響は多岐にわたることが容易に予測される。例えばMcCabe は地層処分における微生物活動によって生じ得る影響を，過去の他の分野における研究及び産業活動の経験から，表2.2-12に示すように予測している。<sup>2)</sup>

表2.2-12 バリアの破損と核種移行に対する微生物の影響

| 影 響 項 目          | プ ロ セ ス                                           | 経 験 分 野                                           |
|------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 容 器 等 の 破 損      | コンクリート・鉄の生物学的劣化                                   | 腐食研究，極限環境研究，<br>石油産業，試錐孔掘削経験                      |
| 廃棄体からの浸出         | 廃棄物形態の崩壊，地下水化学の変化                                 | 水文学研究，極限環境研究，<br>水資源産業                            |
| 埋戻し材中の移行         | ベントナイト・コンクリート・<br>アスファルト等の生物学的劣化                  | 放射栓化学研究，腐食研究，<br>極限環境研究，石油産業，<br>建設産業             |
| ファーフィールド<br>での移行 | 核種移行性・地下水流への影響，<br>微生物への核種収着，自動性微生物<br>による核種移行の加速 | 放射線化学研究，水文学研究，<br>地質微生物学，洞窟学研究，<br>鉱業，試錐孔掘削経験     |
| 人間に対する被曝         | 核種化学形の変化<br>食物連鎖への関与<br>栄養レベルでの濃縮                 | 土壌化学研究，生態学研究，<br>放射線生物学研究，<br>埋立処分研究，<br>食品・水資源産業 |

また，その後の研究においてNAGRA は中／低レベル廃棄物の処分において評価すべき微生物関係の主要な現象を以下のように示している。<sup>3)</sup>

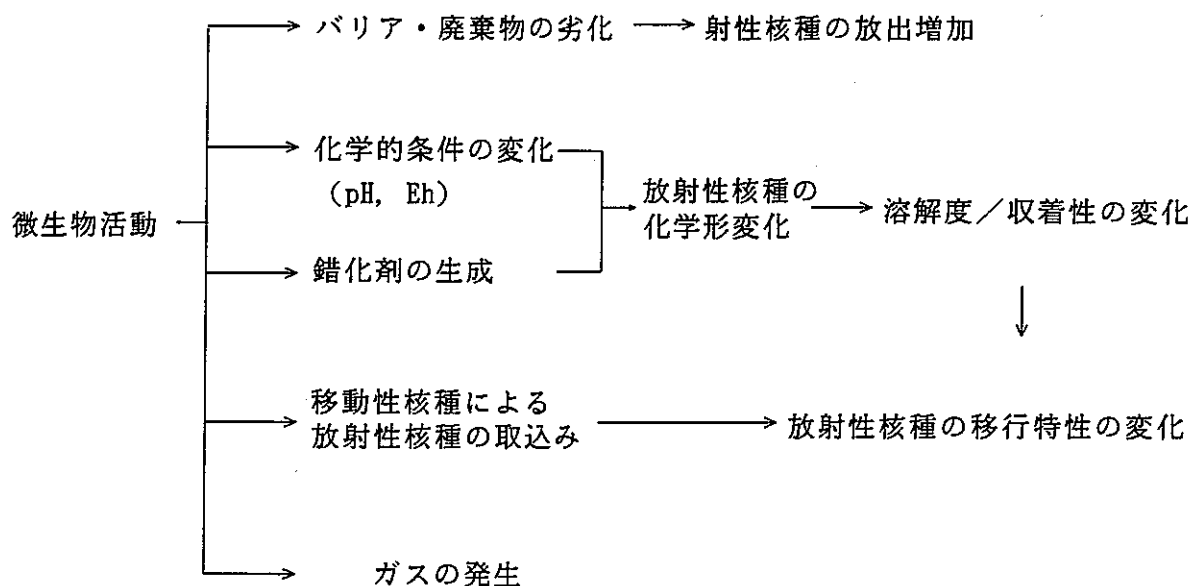


図2.2-17 NAGRA における微生物影響評価対象

また、これらに付随する影響として微生物分解による空隙の発生、微生物自体の付着によるバリア材の収着特性の低下、界面活性剤の生成による充填材の濡れの向上、さらには微生物自体による空隙の閉塞などが上げられている。

これらの検討結果より、微生物活動による影響は微生物の代謝作用に基づくものと、微生物そのものの物理的・化学的特性に基づくものと大きく分けることができる。

このうち、微生物の代謝作用に基づくものに関しては、さらに栄養源、エネルギー源の消費を直接の原因とする“バリア・廃棄物の劣化（バリア質量の減少）”，“化学的条件の変化（pH, Ehの変化）”，及び“放射性核種の化学形変化”また代謝産物の生成を直接の原因とするものとしては“バリア・廃棄物の劣化（硫酸、酸性物質）”，“化学的条件の変化（pH, Eh）”，“錯化剤，界面活性剤の生成”，“放射性核種の取込み（細胞内代謝に基づく）”，“ガスの発生”に分けることができるものと考えられる。

一方、微生物そのものの物理的・化学的特性に基づく影響としては，“錯化剤の作用（微生物の有機物としての作用）”，“放射性核種の取込み（細胞膜表面への収着）”，“収着性の低下（バリア材への付着による）”，“空隙の閉塞”に分類できるものと考えられる。

これらの分類を整理したものを図2.2-18 に示す。なお、微生物活動は上記のように多種類の非常に複雑な化学反応によって構成される物質代謝によるものであるため、各現象相互の関係も重要である。

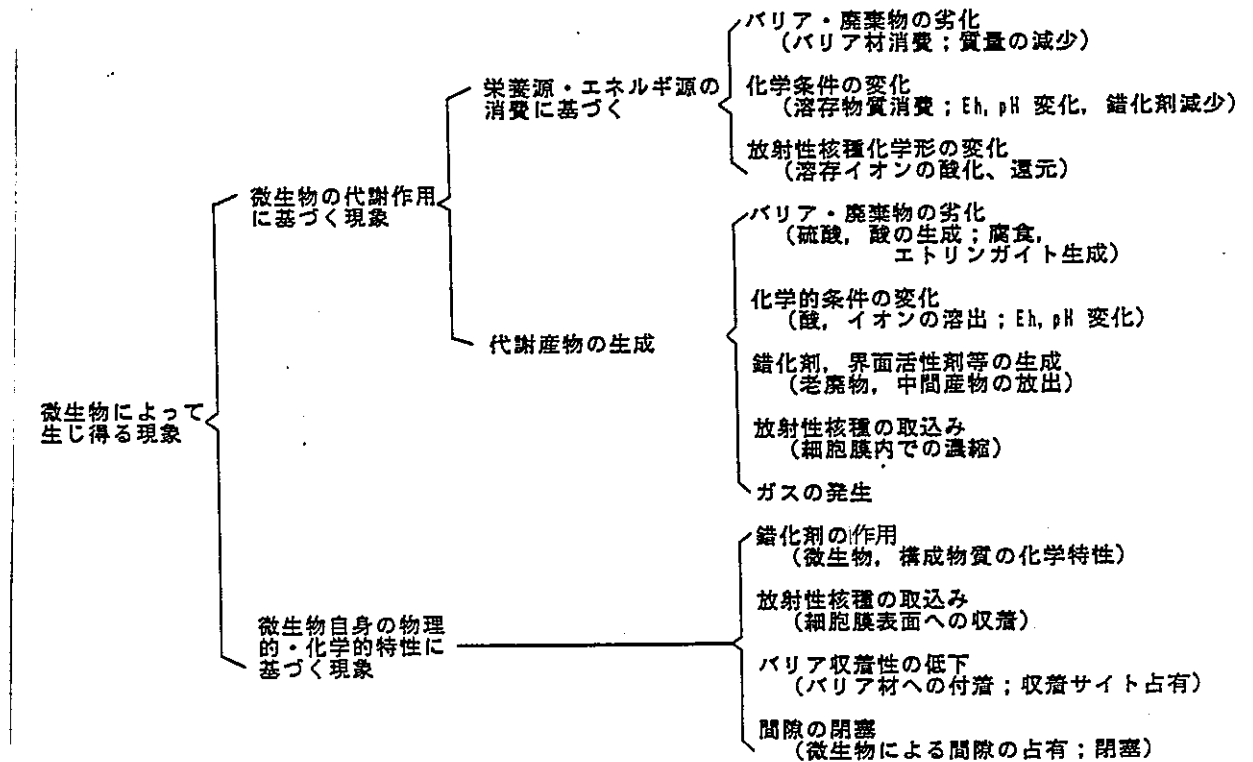


図2.2-18 微生物によって生じ得る現象と影響

さて、図2.2-18に示したように放射性廃棄物の処分の長期安全性に影響する可能性のある現象はその種類が多く、さらに各現象を生じる機構も微生物の種類によって異なることを考えれば、これらの現象を総じて試験、確認するためには相等の労力を要することが創造に難くない。地層処分における微生物作用に対する影響を対象とした体系的研究が開始されたのは、イギリスにおいては1980年代初期に文献調査が開始されて以来であり、スイスにおいても1985年に最初の微生物活動モデルに関する研究が報告されているところから、処分に対する影響の検討はイギリスとほぼ同時期に開始されているものと考えられる。したがって微生物活動による処分に対する影響を定量的に評価するための試験研究は前述の現象を総べてカバーするには至っていない。

これまでに研究が行われている対象は、例えば図2.2-18に示す範囲のうち、浅地中処分等の経験から現象が良く知られていたもの、及び近年の概略的検討において影響の比較的大きくなる可能性があると考えられた以下の項目が主体となっている。

- ・バリア材（アスファルト、コンクリート、金属）の劣化
- ・放射性核種の化学形の変化
- ・錯化剤の生成
- ・放射性核種の取込み
- ・ガスの発生、移行

また、これらの研究の前提となる微生物活動に影響する処分場環境条件の把握、及び処分場環境に生息する微生物とその代謝に関する研究も実施されている。

以下にそれらの内の主要な研究例について概要を示す。

## (2) 微生物活動に影響する処分場環境

イギリスにおいては予想される低／中レベル放射性廃棄物処分場条件下で生存可能な微生物の存在とその活動を把握するため、地質調査サイト、廃棄物、肥沃な土壌等から培養した微生物を用いて、pH及び栄養物質による影響を試験している。これらの試料から約 300種の細菌、菌類、放射菌類が分離され、土壌と模擬 LLWの混合試料による特性試験も行われて以下の結果を得ている。<sup>4)</sup>

○水の供給

- ・微生物活動は非常に乾燥した条件下では抑制されるものの、活動を開始してしまえば、代謝の過程で生じる水により自給自足状態となる。

○無機栄養素

- ・好気性雰囲気下では $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ の補充により微生物の活性が増加する。（窒素、及び細胞内陽イオンの供給が重要）
- ・嫌気性雰囲気下では $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ が微生物活動に重要となり、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ の重要度は相対的に低下する。（硫酸塩還元菌の活動の効果）

○有機栄養素

- ・可溶性で容易に代謝可能なアセテート、グルコース等が微生物活動を活性化させる。特に嫌気性雰囲気下ではアセテートが重要。

○pH

- ・pHの上昇に従って緩やかに微生物活動は活発化する。
- ・pHが12.25以上では微生物活動が見られない。

○ガスの発生

- ・好気性雰囲気では $\text{CO}_2$ が、嫌気性雰囲気下では $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ が主要成分となる。
- ・湿らせたLLWについて中性域で $10^3 \text{ m}^3/\text{ton} \cdot \text{年}$ 、一般廃棄物の埋立処分では $2 \sim 20 \text{ m}^3/\text{ton} \cdot \text{年}$ （いずれも嫌気性雰囲気）の発生速度を得ている。

(3) アスファルトの微生物分解

アスファルトの微生物分解については比較的早期から記述があり、1935年以降研究が実施されて来ているが<sup>5)</sup>、放射性廃棄物固化媒体としてのアスファルトに対する微生物の影響については、近年研究活動が活発化して来たところである。以下では中低レベル廃棄物の固化媒体として用いられているアスファルトの微生物分解に係る試験の代表例として、スイス及びフランスにおいて実施された研究例を示す。

(i) スイスにおける研究例

スイスでは使用済燃料の再処理をフランスのCOGEMA、及びイギリスの

B N F L に委託しており、そのうち C O G E M A では再処理廃棄物である化学処理スラッジの固化にアスファルトを用いているところから、N A G R A はこの返還廃棄物処分のためチューリッヒ大学に委託してアスファルトに対する微生物の影響について試験研究を行っている。<sup>6)</sup>

1989年に発表された同研究では、アスファルトに対する微生物分解速度の定量化と環境因子の影響把握を目的として、微生物活動に対して最適な条件下を主とした試験が行われている。即ち、アスファルト供試体は比表面積増加のため 100~400  $\mu$  m の微粒子状とし、これを電子受容体・供与体となり得る各種塩類を含む培養液中に懸濁させる。微生物は耕作土壌、アスファルト鉱山土壌を培養液中に分散させることで、あるいはアスファルトそのものに含まれる（同伴した）微生物を用いている。

得られた結果は以下の通りである。

- ・アスファルトを劣化させる微生物は至る所に存在する。
- ・微生物活動はアスファルトの表面積に比例する。
- ・繁殖した微生物には *Pseudomonas aeruginosa*, *Alkaligenes*, 及び *Streptomyces*. *P. Aeruginosa* が含まれる。
- ・微生物活動は温度が 10°C 上昇するごとに 2 倍の代謝の増加を示す。
- ・p H は 7 付近で最も活動が活発である。
- ・ $5 \times 10^4$  Rad の放射線照射では、活動の低下は見られない。
- ・好気性雰囲気下では最大 25~50 g アスファルト /  $\text{m}^2 \cdot \text{y}$  の速度で劣化し、15~40  $\ell$  の  $\text{CO}_2$  を発生する。
- ・嫌気性雰囲気下では 0.2~0.6 g アスファルト /  $\text{m}^2 \cdot \text{y}$  の速度で劣化し、0.25  $\ell$  の  $\text{CO}_2$  又は 0.005  $\ell$  程度のメタンを発生する。
- ・これはドラム缶廃棄体中のアスファルトが、1,000 年間に好気性条件下では 25~70%, 嫌気性雰囲気下では 0.3~0.8 % 劣化する速度に相当する。
- ・アスファルトの微生物劣化生成物は気体 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) 以外は同定されていないが、好気性雰囲気下では基質中の 40~70% が微生物中で同化されているものとして劣化量を算定している。

嫌気性雰囲気下における電子受容体の変化による気体の発生状態を表 2.2-13

に示す。CO<sub>2</sub> の発生に対しては下記3種の電子受容体が重要であるが、メタンの発生に対しては上記以外のCO<sub>2</sub> 等の電子受容体も重要となることが示されている。

表2.2-13 嫌気性雰囲気下における電子受容体の影響

| 接 種 物       | 発 生<br>ガ ス      | 電 子 受 容 体 |                              |                               |                  |
|-------------|-----------------|-----------|------------------------------|-------------------------------|------------------|
|             |                 | —         | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Fe <sup>3+</sup> |
| —           | CO <sub>2</sub> | —         | —                            | —                             | —                |
|             | CH <sub>4</sub> | —         | —                            | —                             | —                |
| 耕 作 土 壤     | CO <sub>2</sub> | —         | +                            | +                             | +                |
|             | CH <sub>4</sub> | +         | —                            | —                             | +                |
| 下 水 ス ラ ッ ジ | CO <sub>2</sub> | —         | +                            | +                             | +                |
|             | CH <sub>4</sub> | —         | —                            | —                             | —                |
| アスファルト同伴微生物 | CO <sub>2</sub> | (+)       | +                            | +                             | +                |
|             | CH <sub>4</sub> | +         | —                            | +                             | +                |
| 上 記 の 混 合   | CO <sub>2</sub> | (+)       | +                            | +                             | +                |
|             | CH <sub>4</sub> | —         | +                            | +                             | +                |

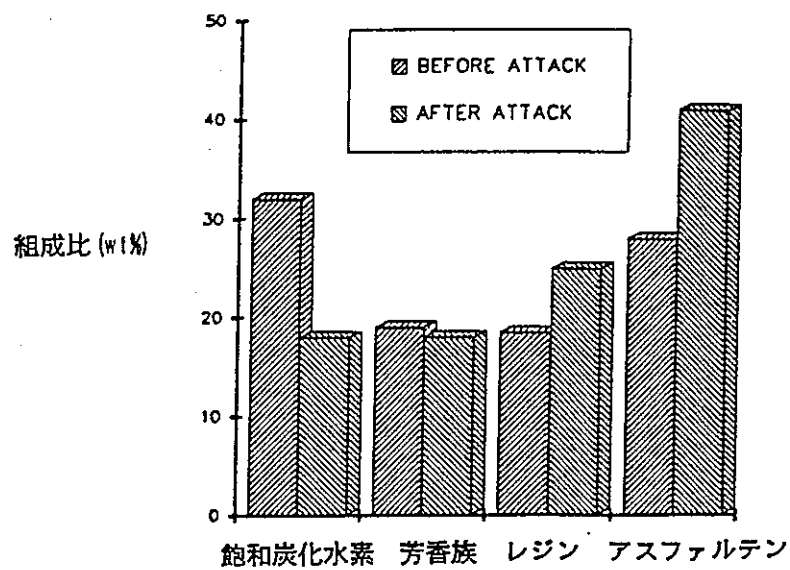
## (ii) フランスにおける研究例

フランスでは放射性廃棄物の固化媒体としてアスファルトを多数の廃棄物に適用しているが、アスファルトの微生物劣化に対する研究は比較的新しく、1984年以降に低中レベル廃棄物の浅地中処分条件下での試験が報告されている<sup>7)</sup>。

以下に微生物劣化速度、微生物劣化による化学組成の変化、微生物による代謝特性の比較、アスファルトの化学組成による微生物活動への影響の把握を目的としてAit-Langomazinosが実施した試験の結果を示す<sup>8)</sup>。

同試験は、嫌気性雰囲気下では劣化速度が小さいとされているところから、好気性雰囲気下のみについてCO<sub>2</sub> 発生量の測定等により微生物の活動を評価している。試料は約 100mgのアスファルト片をそのまま用いており、これを無





ブローンアスファルト R 90/40

図 2.2 - 1 9 微生物分解による成分組成の変化

表 2.2 - 1 4 微生物分解による元素組成の変化

|     | 成 分     | 成 分 比      | 重 量 比 |      |      |      |     |
|-----|---------|------------|-------|------|------|------|-----|
|     |         |            | C     | H    | O    | N    | S   |
| 劣化前 | アスファルテン | 25.3 (w/o) | 82.4  | 7.5  | 2.5  | 1.1  | 4.0 |
|     | 飽和炭化水素  | 35.5       | 87.3  | 12.5 | 0.4  | nd   | nd  |
|     | 芳香族     | 19.6       | 85.5  | 9.8  | 1.0  | 0.2  | 3.3 |
|     | レジン     | 17.6       | 81.1  | 7.5  | 4.3  | 0.7  | 3.4 |
|     | 残 渣     | 2.3        | —     | —    | —    | —    | —   |
| 劣化後 | アスファルテン | 44.3       | 78.5  | 7.3  | 6.1  | <0.7 | 6.2 |
|     | 飽和炭化水素  | 20.5       | 87.1  | 13.1 | <0.1 | <0.7 | nd  |
|     | 芳香族     | 13.2       | 83.6  | 10.5 | 0.15 | nd   | 5.7 |
|     | レジン     | 19.1       | 73.4  | 8.9  | 9.5  | 1.5  | 6.7 |
|     | 残 渣     | 2.8        | —     | —    | —    | —    | —   |

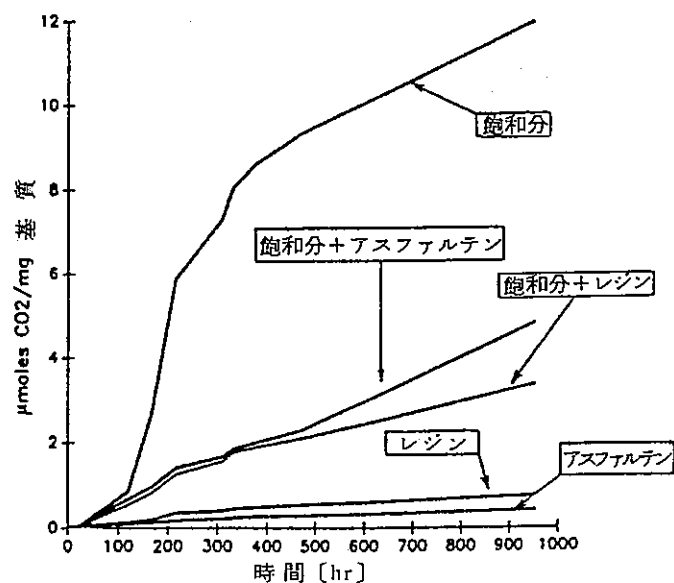


図 2.2 - 2 0 アスファルト成分の劣化特性

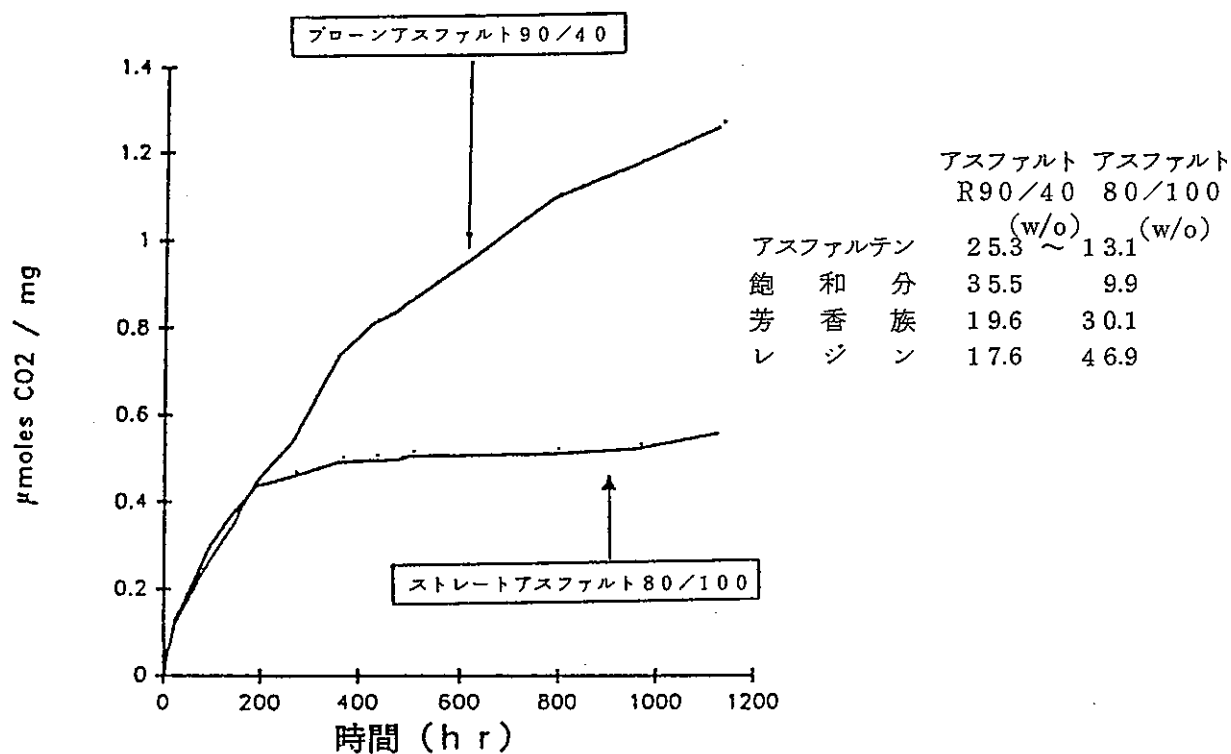


図 2.2 - 2 1 アスファルトの種類による劣化特性

— 参考のためアスファルトの成分分類について記す。 —

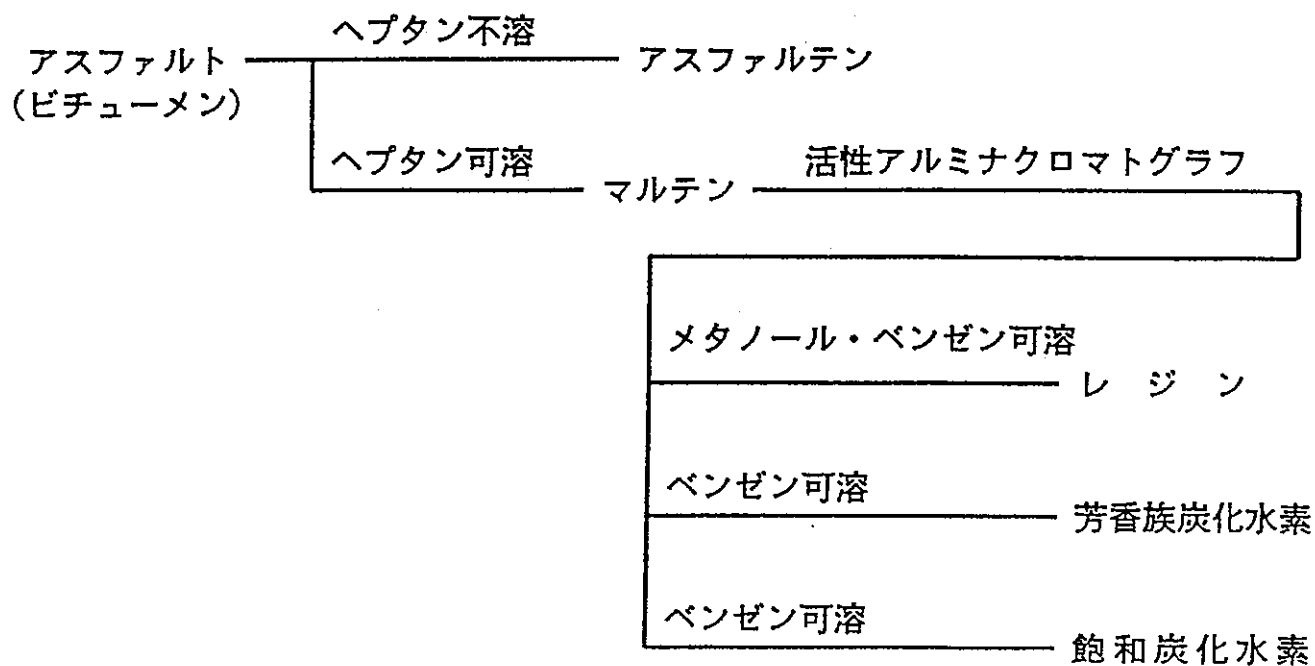


図 2.2 - 2 2 アスファルト成分の分類

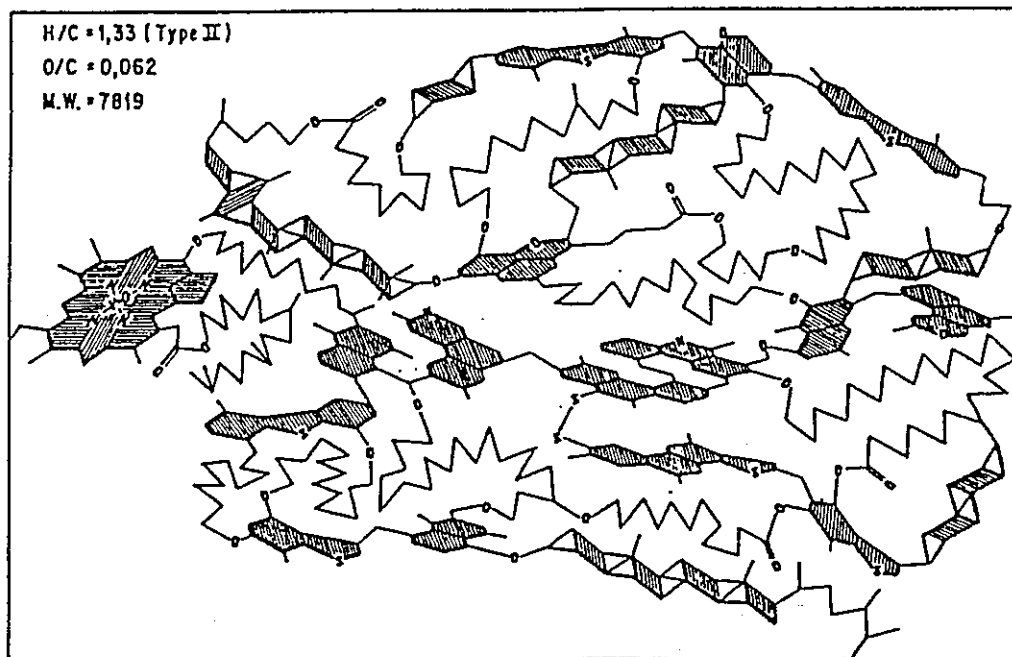


図 2.2 - 2 3 アスファルテンの化学構造例<sup>9)</sup>

### (iii) まとめと今後の課題

図2. 2-22に示すようにアスファルトは多種類の、非常に複雑な構造を有する炭化水素化学物の混合体であり、しかもその組成は生産地、精製条件、加工技術により変動する。したがって微生物の活動による分解の容易さの程度、分解速度を個々の成分ごとに評価することは非常に困難であり現実的でないと考えられる。そこで、上記のように同様の構造を有する成分群をグループ化し、処分場内に存在し増殖可能な微生物群の内、特にこれら成分の分解に寄与する微生物群との対応を明らかにすることにより、劣化速度及びその環境因子による影響を定量化することが必要となろう。

また、成分が多様であることからガスを除く分解生成物も多種多様であることが予測され、それらの成分を総べて同定することはさらに困難であろう。分解生成物についても、分子量、官能基の種類、芳香族性の大小等により分類し、核種の溶解度等に対する影響の大小を把握すると共に、アスファルト成分、微生物種類、生成量との関係を明らかにする必要がある。

さらに、固化体の浸出抑制機能が安全性に大きく影響する場合には、固化媒体として用いられるアスファルトの劣化による、浸出特性に対する影響について把握しておく必要がある。

これらの因子を明らかとするためには処分場雰囲気下における、微生物培養、アスファルト分解試験の実施が不可欠となる。

#### (4) 微生物活動のモデル化

以上に述べてきたように、微生物活動は様々な影響を処分の長期安全性に及ぼす可能性があり、これらを定量的に評価するためには微生物活動をモデル化し、その影響を定量的に予測評価する必要がある。微生物活動は本項の冒頭に記されているように、非常に複雑な化学反応を多段で含むため、放射性廃棄物の処分場環境における微生物活動モデルの開発は限定された範囲に止まっている。

以下に代表的なモデル開発例をスイス、及びイギリスについて示す。

##### (i) スイスにおける開発例

###### a. Groganらのモデル

ここではGroganらが1990年に報告している、スイスの低／中レベル廃棄物処分場条件下における、微生物の有機錯化剤生成とその影響の評価を目的として作成されたモデルの概要を示す<sup>10)</sup>。なお、スイスではこの他に微生物によるガスの発生については別途評価が行われており、本モデル中にガス発生の評価は含まれない。NAGRAでは微生物活動の影響を評価するためのモデル概念として図2.2-24に示すものを考えており、今回報告対象となるモデルはその一部である。

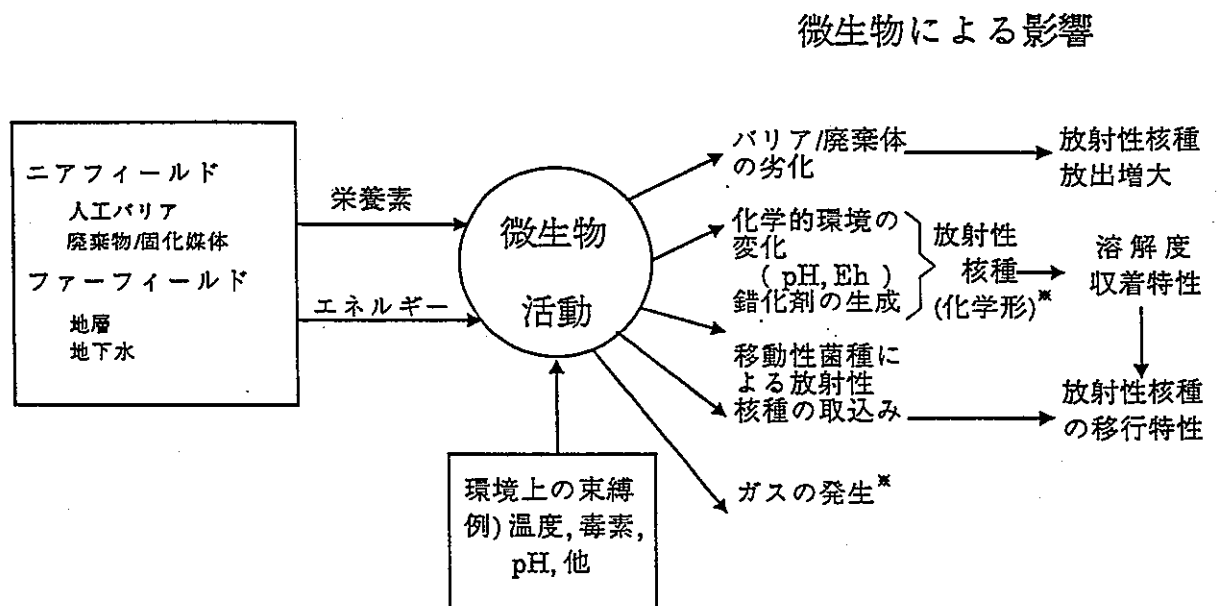


図2.2-24 NAGRA で考慮される微生物活動モデル概念（低／中レベル廃棄物）

栄養素の供給と消費については簡潔なボックスモデルを用いており、重要栄養素としてC, N, P, Sを選定し、処分場エリア内のインベントリを(1)式により求めている。

$$I_x(t) = V \cdot \theta \cdot X_A + V(1 - \theta) \cdot X_s + F \cdot t(X_i - X_o) \quad (1)$$

$I_x(t)$  ; 時間  $t$  における成分  $x$  の存在量 (kmol)

$V$  ; 対象エリアの体積 ( $m^3$ )

$\theta$  ; 間隙率 (-)

$X_A, X_s, X_i, X_o$  ; 成分  $x$  の各々処分場液相濃度, 処分場固相濃度, 流入地下水中濃度, 流出地下水中濃度 ( $kmol / m^3$ )

$F$  ; 地下水流速 ( $m^3 / y$ )

なお、固相からの栄養素の供給はより現実的手法として放出係数、あるいは指数関数的減衰放出モデルの適用が考慮されている。この場合の供給量算定式を(2)(3)に示す。

$$R_x = F(X_i - X_o) + K_x \cdot V(1 - \theta) X_s \quad (2)$$

$$K_x = F(X_i - X_o) + V(1 - \theta) X_s \cdot \exp(-E_x \cdot t) \quad (3)$$

$R_x$  ; ボックス内における成分  $x$  の供給速度 ( $kmol/y$ )

$K_x$  ; 固相からの成分  $x$  の放出率 ( $1/y$ )

$E_x$  ; 固相からの成分  $x$  放出の減衰定数 ( $1/y$ )

得られたインベントリは 100%の効率で微生物によって消費されるものとし、典型的な微生物の化学組成を  $C_{160} (H_{280} O_{80}) N_{30} P_2 S$  と仮定して、これと比較することによって、制限因子となる元素と最大存在可能微生物量を算定する手法を採っている。

また、微生物の繁殖に必要なエネルギーは処分場内の物質、及び地下水中に溶存する物質が微生物の触媒作用による酸化還元反応を起こすことによって生じる自由エネルギー変化から得られるものとし、これらに含まれる物質の組合せから微生物が利用可能な最大の自由エネルギーを求めて、これを微生物の維持と合成に必要な最低エネルギーとの比較し、生息可能な微生物量を評価している。この際必要な最低エネルギーとして 64MJ/kg 微生物、また利用可能な最小反応エネルギーを 15MJ/kmol電子とし、これを下まわる自由エネルギー変化の反応はエネルギー源とな

らないものとしている。モデル概念を図2.2-25に示す。

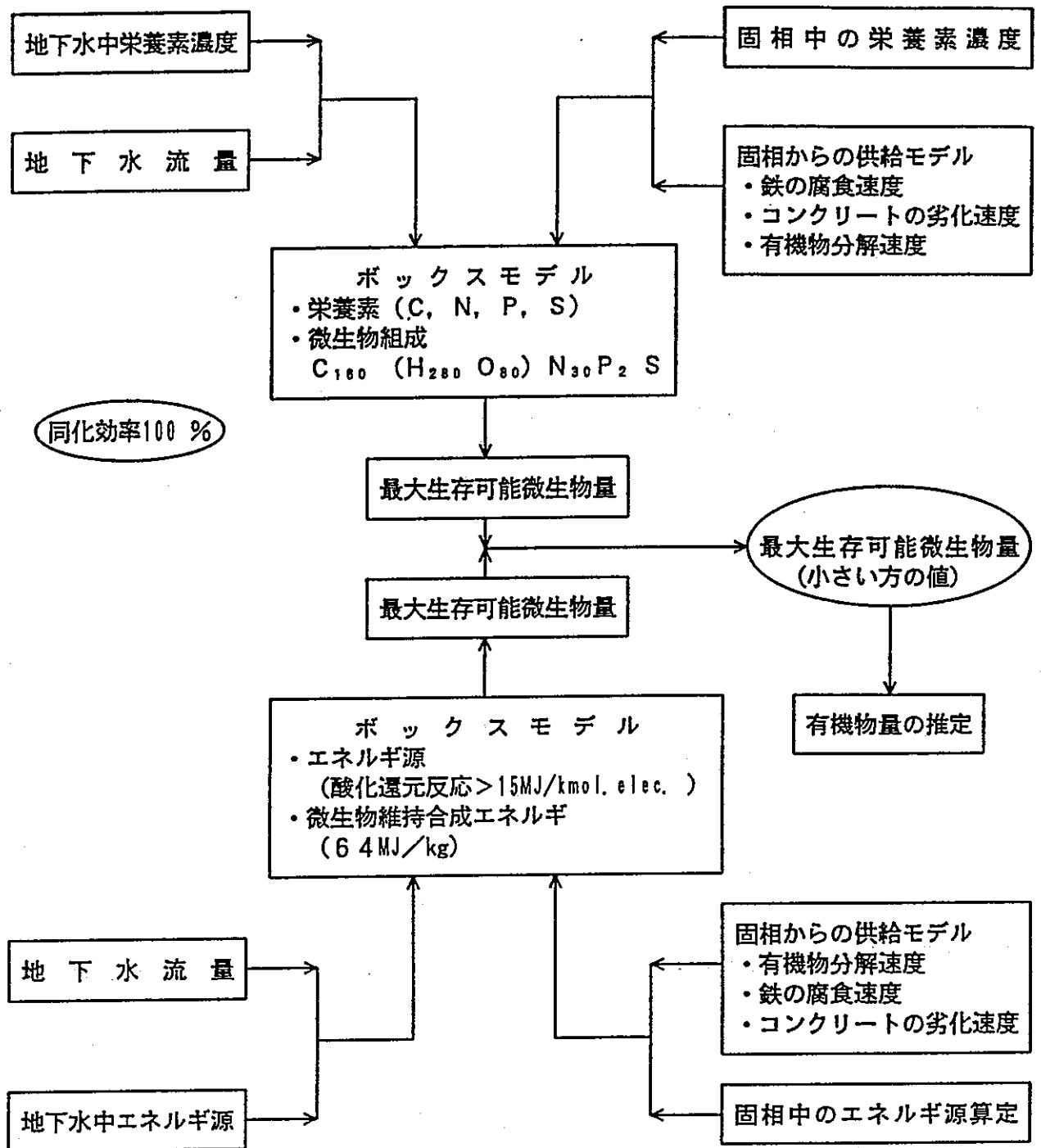


図 2.2-25 Grogan による微生物活動モデル

Groganらはこのモデルをイオン交換樹脂のセメント固化体の処分に対して適用して微生物活動の評価を行っており、その結果は以下の通りである。

対象とする処分概念及び地下水流速（ダルシー速度）を図2.2-26に示す。微生物活動は処分坑道内  $1 \text{ m}^3$  当りに規画化して評価を行っている。

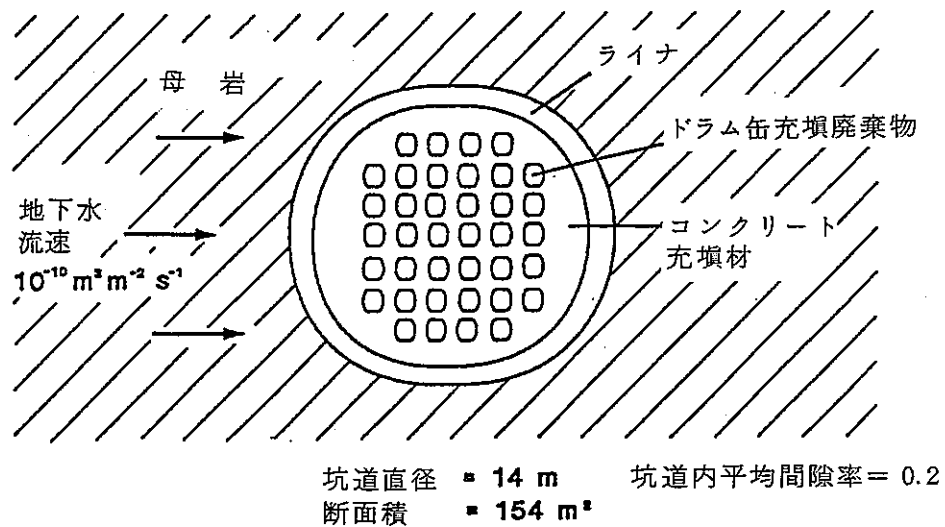


図2.2-26 評価対象処分場概念

#### ○ 栄養素の供給

栄養素の供給は、固相中元素について廃樹脂の微生物分解、鋼構造物の腐食、コンクリートからの溶出、及び地下水中溶存成分の流入によるものとし、各材料からの放出率を各々  $3.7 \times 10^{-3}/\text{y}$ ,  $3.3 \times 10^{-4}/\text{y}$ ,  $10^{-4}/\text{y}$ , と設定して(2)式により固相からの供給量を求めている。

得られた栄養素の供給量を表2.2-15に示す。

表2.2-15より微生物活動の制限因子はPの供給量であり、Pの全量が生物組織に同化されたとしても、最初の $10^4$ 年間の微生物の生成量は  $0.7\text{g/y}$  と評価できる。その後は地下水のみからの供給となり、生成量は  $0.009\text{g/y}$  となる。

表2.2-15 栄養素供給量の評価結果

| 栄 養 素       | 供 給 量 (kmol)         |                      |                      |                      | 生成可能生物体量(g/y)                |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
|             | C                    | N                    | S                    | P                    |                              |
| 廃 樹 脂       | $1.4 \times 10^{-2}$ | $7.4 \times 10^{-4}$ | $7.4 \times 10^{-4}$ | —                    | 0.7                          |
| 鋼 材         | $3.3 \times 10^{-6}$ | $2.9 \times 10^{-7}$ | —                    | —                    |                              |
| コ ン ク リ ー ト | $2.7 \times 10^{-5}$ | $1.8 \times 10^{-7}$ | $1.2 \times 10^{-5}$ | $3.4 \times 10^{-7}$ |                              |
| 固相からの供給     | $1.4 \times 10^{-2}$ | $7.4 \times 10^{-4}$ | $7.5 \times 10^{-4}$ | $3.4 \times 10^{-7}$ | 0.7                          |
| 地下水からの供給    | $1.6 \times 10^{-6}$ | $5.2 \times 10^{-7}$ | $7.5 \times 10^{-6}$ | $4.6 \times 10^{-9}$ | 0.009                        |
| 合 計         | $1.4 \times 10^{-2}$ | $7.4 \times 10^{-4}$ | $7.6 \times 10^{-4}$ | $3.5 \times 10^{-7}$ | 注)コンクリートからの<br>供給は $10^4$ 年間 |

#### ○エネルギーの供給

処分場閉塞後の極く初期では、処分場内にトラップされた酸素による鉄の酸化とイオン交換樹脂の放射線分解による硫酸イオン、亜硫酸イオンの還元によりエネルギーが供給されるとしているが、全エネルギー供給量からみれば極僅かである。

その後の期間は、最初の270年間についてはイオン交換樹脂の交換基部分の加水分解による $\text{SO}_3^{2-}$ の鉄（固相）による還元、その後3000年まではコンクリート、地下水成分中の $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 等の鉄（固相）による還元が、また、その後は地下水中の $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ の廃イオン交換樹脂炭化水素成分による還元反応がエネルギー源として利用可能なエネルギー量を算定している。

表2.2-16～18にエネルギーとなる酸化還元反応、供給源と供給量、及び期間毎の反応関与物質とエネルギー量、さらにそれに対応する代謝の維持が可能な微生物量を示す。

これらの表により、微生物のエネルギー源としては鉄（固相）が還元剤として作用する反応を利用する微生物は最もエネルギーの供給が豊富であり、その活動による影響が大きくなる可能性が示されている。また、代謝の維持が可能な微生物量は0.01～2.3g/yの範囲にあり、前述の栄養素及びエネルギー源の供給の双方が、微生物活動の制限因子となり得ることが示されている。

なお、この評価ではコンクリート中、地下水中の栄養素濃度、固相中からのエ

エネルギー源の供給率，微生物がエネルギー源として利用可能な酸化還元反応，生物体の合成に必要となる微量物質，代謝の効率等について，保守側の設定を行っており，これらの数値は，上記条件下での最大値に近いものとして考慮すべきものである。

表2.2-16 考慮した酸化還元反応の自由エネルギー変化（例）

（反応に寄与する電子/mol当り） [kJ/mol]

|                                       |                                         |        | $\Delta G_r$ (pH=12)<br>n |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|--------|---------------------------|
| $H_2O_2 + 2e^- + 2H^+$                | $\rightarrow 2H_2O$                     | -101.7 |                           |
| $NO_2^- + 3e^- + 4H^+$                | $\rightarrow \frac{1}{2}H_2(g) + 2H_2O$ | - 56.1 |                           |
| $O_2 + 4e^- + 4H^+$                   | $\rightarrow 2H_2O$                     | - 50.1 |                           |
| $NO_3^- + 5e^- + 6H^+$                | $\rightarrow \frac{1}{2}H_2(g) + 3H_2O$ | - 37.9 |                           |
| $NO_3^- + 2e^- + 2H^+$                | $\rightarrow NO_2^- + H_2O$             | - 10.6 |                           |
| $NO_3^- + 8e^- + 9H^+$                | $\rightarrow NH_3 + 3H_2O$              | - 1.4  |                           |
| $NO_2^- + 6e^- + 7H^+$                | $\rightarrow NH_3 + 2H_2O$              | 1.8    |                           |
| $<HCHO> + 4e^- + 4H^+$                | $\rightarrow CH_4(g) + H_2O$            | 29.1   |                           |
| $S(s) + 2e^- + H^+$                   | $\rightarrow HS^-$                      | 40.2   |                           |
| $SO_3^{2-} + 6e^- + 7H^+$             | $\rightarrow HS^- + 3H_2O$              | 44.5   |                           |
| $<HCHO> + 2e^- + 2H^+$                | $\rightarrow <HCH_2OH>$                 | 46.1   |                           |
| $SO_4^{2-} + 8e^- + 9H^+$             | $\rightarrow HS^- + 4H_2O$              | 53.0   |                           |
| $CO_3^{2-} + 8e^- + 10H^+$            | $\rightarrow CH_4(g) + 3H_2O$           | 56.3   |                           |
| $Fe(OH)_3 + 2e^- + 3H^+$              | $\rightarrow Fe(s) + 3H_2O$             | 57.1   |                           |
| $SO_4^{2-} + 6e^- + 8H^+$             | $\rightarrow S(s) + 4H_2O$              | 57.3   |                           |
| $CO_3^{2-} + 6e^- + 8H^+$             | $\rightarrow <CH_2> + 3H_2O$            | 59.3   |                           |
| $2SO_4^{2-} + 8e^- + 10H^+$           | $\rightarrow S_2O_3^{2-} + 5H_2O$       | 59.4   |                           |
| $2CO_3^{2-} + 8e^- + 11H^+$           | $\rightarrow CH_3COO^- + 4H_2O$         | 61.4   |                           |
| $CO_3^{2-} + 5e^- + 7H^+$             | $\rightarrow <CH> + 3H_2O$              | 61.6   |                           |
| $3CO_3^{2-} + 14e^- + 19H^+$          | $\rightarrow CH_3CH_2COO^- + 7H_2O$     | 61.7   |                           |
| $CO_3^{2-} + CH_3COO^- + 6e^- + 8H^+$ | $\rightarrow CH_3CH_2COO^- + 3H_2O$     | 62.1   |                           |
| $H^+ + 1e^-$                          | $\rightarrow \frac{1}{2}H_2(g)$         | 68.5   |                           |
| $CO_3^{2-} + 6e^- + 8H^+$             | $\rightarrow <HCH_2OH> + 2H_2O$         | 71.0   |                           |
| $Fe_3O_4(s) + 8e^- + 8H^+$            | $\rightarrow 3Fe(s) + 4H_2O$            | 76.5   |                           |
| $CO_3^{2-} + 4e^- + 6H^+$             | $\rightarrow <HCHO> + 2H_2O$            | 83.5   |                           |
| $CO_3^{2-} + 2e^- + 4H^+$             | $\rightarrow <HCOO> + H_2O$             | 96.1   |                           |
| $\alpha FeO(OH)(s) + 1e^-$            | $\rightarrow Fe(OH)_3 - H_2O$           | 99.9   |                           |
| $\alpha Fe_3O_4(s) + 2e^- - H^+$      | $\rightarrow 3Fe(OH)_3 - 5H_2O$         | 134.7  |                           |

表2.2-17 エネルギー供給源／供給量

| エネルギー源              | 反応物質                             | 含有量<br>(mol)      | 供給量<br>(mol/y)       | 供給期間<br>(Y)     |
|---------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------|
| 鋼<br>(121kg)        | Fe (s)                           | $2.2 \times 10^3$ | $7.2 \times 10^{-1}$ | $3 \times 10^3$ |
| コンクリート<br>(2138kg)  | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>    | 87                | $8.7 \times 10^{-3}$ | $1 \times 10^4$ |
|                     | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>    | 232               | $2.3 \times 10^{-2}$ | $1 \times 10^4$ |
|                     | Fe <sup>3+</sup>                 | 328               | $3.3 \times 10^{-2}$ | $1 \times 10^4$ |
| 有機物 (廃樹脂)<br>(73kg) | <C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> > | 400               | 1.48                 | 270             |
|                     | <CHCH <sub>2</sub> >             | 400               | 1.48                 | 270             |
|                     | <N(CH) <sub>3</sub> >            | 200               | 0.74                 | 270             |
|                     | <SO <sub>3</sub> >               | 200               | 0.74                 | 270             |
| 地下水                 | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>    |                   | $7.5 \times 10^{-3}$ |                 |
|                     | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>     |                   | $4.9 \times 10^{-4}$ |                 |
|                     | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>     |                   | $3.2 \times 10^{-5}$ |                 |

表2.2-18 反応物質と供給エネルギー量，対応する微生物量

| 処分場閉塞後期間                                                            | 酸化剤                            | 還元剤    | エネルギー<br>(KJ/y) | 微生物量<br>(g/y) |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------|-----------------|---------------|
| a) 0-270年<br>(地下水中NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> は無視)                 | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | Fe (s) | 3.0             |               |
|                                                                     | SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>  | Fe (s) | 142.2           |               |
|                                                                     | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>  | Fe (s) | 4.0             |               |
|                                                                     | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | Fe (s) | 0.3             |               |
|                                                                     |                                |        | 149.5           | 2.3           |
| b) 270~ $3 \times 10^3$ 年<br>(地下水中NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> は無視) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | Fe (s) | 3.0             |               |
|                                                                     | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>  | Fe (s) | 4.0             |               |
|                                                                     | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | Fe (s) | 0.3             |               |
|                                                                     |                                |        | 7.3             | 0.1           |
| c) $3 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ 年                             | (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | <CH>   | 1.12 *)         |               |
|                                                                     | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | <CH>   | 0.24            |               |
|                                                                     | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | <CH>   | 0.01            |               |
|                                                                     |                                |        | 0.25            | 0.004         |
| d) $1 \times 10^4$ 年以降                                              | (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | <CH>   | 0.52 *)         |               |
|                                                                     | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | <CH>   | 0.24            |               |
|                                                                     | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | <CH>   | 0.01            |               |
|                                                                     |                                |        | 0.25            | 0.004         |

\*) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+<CH>はエネルギー変化が 8.6kJ/mol elec と小さいため除外

○ 錯化剤生成による影響

Groganらは上記微生物活動モデルの評価結果を基に、以下の条件を設定することにより、微生物活動の影響を検討している。

- ・ 考慮する現象は微生物活動によって生成した有機物と放射性核種との錯体形成のみを対象とする。
- ・ 有機物の生成量は生物体の生成量と同一であり、微生物の存在量は定常状態にあるものとする。
- ・ 微生物の生成量を  $0.7\text{g/y m}^3$  とすると、地下水流量より地下水中濃度は  $2.4\text{g/l}$  となる。
- ・ 生成する有機物の組成が不明であるため錯体形成化学基当たりの分子量を 100 とすると、錯化剤は  $24\text{mM}$  となる。
- ・ 生成する錯化剤を蔭酸又はエチレンジアミンとして、過去の研究例を基にヒドロキソ錯体と有機錯体の濃度比を予測（表2.2-19）。
- ・ これによれば、Am (III), Pd (II) では有機錯体の影響はヒドロキソ錯体に比較して重要となる場合があり、Pu (IV), Pd (II) ではヒドロキソ錯体の影響が大きく、Np (V) では同程度の影響が予想される。

以上に記した錯体による影響も、モデルとした錯化剤の特性により影響が大きく異なる他、pHによる錯体濃度の変化が大きいものもあり、まだ直接溶解度あるいは収着特性を予測するモデルの整備には至っていない。

表2.2-19 無機錯体との影響の比較

| 元 素                                                                  | ヒドロキソ錯体                         | 有 機 錯 体                          | 錯体濃度比<br>$\log (\text{無機/有機})$ |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Am III                                                               | $\text{Am}(\text{OH})_6^{3-}$   | $\text{Am}(\text{OH})_3^{3-}$    | - 4.6                          |
|                                                                      | $\text{Am}(\text{OH})_6^{3-}$   | $\text{Am}(\text{OH})_3^{3+}$    | -20.2                          |
| Np V                                                                 | $\text{NpO}_2(\text{H})_3^{2-}$ | $\text{NpO}_2(\text{OX})^-$      | 0.1                            |
|                                                                      | $\text{NpO}_2(\text{H})_3^{2-}$ | $\text{NpO}_2(\text{EN})_2^{2-}$ | 0.2                            |
| Pd II                                                                | $\text{Pd}(\text{OH})_4^{2-}$   | $\text{Pd}(\text{OH})_2^{2-}$    | 30.3                           |
|                                                                      | $\text{Pd}(\text{OH})_4^{2-}$   | $\text{Pd}(\text{EN})_2^{2+}$    | - 7.8                          |
| Pu IV                                                                | $\text{Pu}(\text{OX})_6^{2-}$   | $\text{Pu}(\text{OX})_3^{2-}$    | 28.7                           |
|                                                                      | $\text{Pu}(\text{EN})_6^{4+}$   | $\text{Pu}(\text{EN})_3^{4+}$    | 8.4                            |
| OX = $(\text{C}_2\text{O}_4)^{2-}$ EN = $(\text{CH}_2\text{NH}_2)_2$ |                                 |                                  |                                |

以上に示すモデルは非常に単純なものであり、以下の点をさらに明確化し、モデルに反映させる必要があるものとしている。

- ・微生物活動に係わるエネルギー収支
- ・微小範囲での不均質性の影響（pH変化等）
- ・時間による条件変化の影響（pH変化等）
- ・微生物による分解生成物の錯体形成特性の把握
- ・ガス発生、微生物の移動、間隙の閉塞等による影響の評価

#### b. Arterらのモデル

NAGRAではGroganらのモデルを基礎として、チューリッヒ大学植物生物学研究所に委託することによりさらにモデルの改良を行っている<sup>11)</sup>。

以下に改良されたモデルの概要を示す。

モデルはGroganらと同様に、有機物は微生物によって総べて分解されるものとして、そのプロセスの速度については考慮しないものである。また、空間的な均一性を前提とし、有機物の劣化機構は電子受容体の種類により決定される。

現時点でのモデルの機能は廃棄物の組成（元素）、電子受容体含有量（ $O_2$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $CO_2$ ）より、被分解有機物量、分解生成物としての $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $H^+$ の量、微生物量の変化を算定するものである。微生物の増殖率の評価はこれまで広く用いられているモノーのモデルを採用している。これは幾つかの基質が微生物の生長速度を制限する場合、増殖速度を以下の式で表わすものである。

$$R_x = \frac{k \cdot X \prod_{n=1}^x S_n}{\prod_{n=1}^x (K_n + S_n)}$$

$R_x$  ; 生長率 (g/t)

$x$  ; 微生物数 (g)

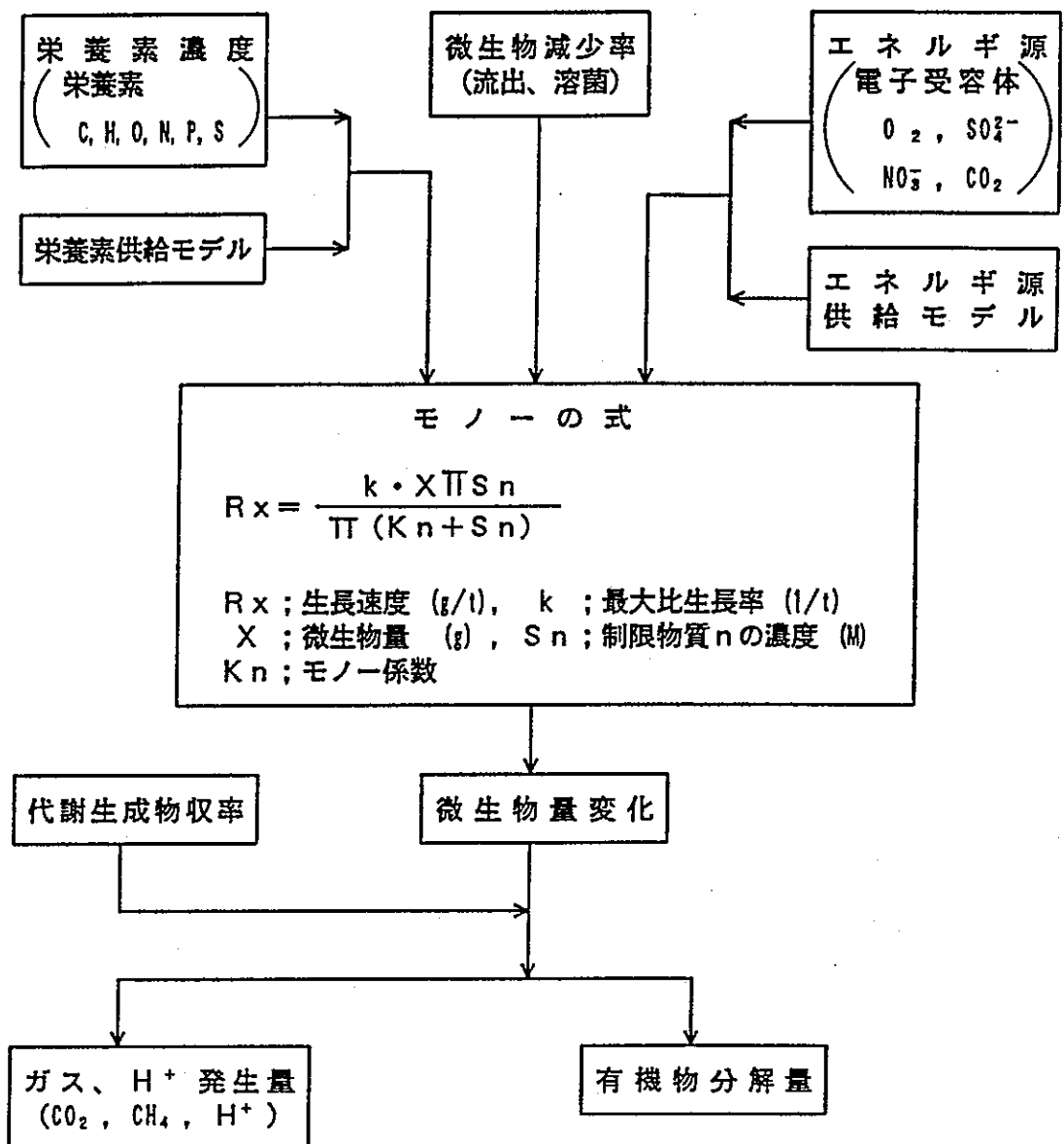
$k$  ; 最大比生長率 (1/t)

$S_n$  ; 制限基質濃度 (M)

$K_n$  ; モノー係数 (最大生長速度の1/2 に対応する基質濃度, M)

電子受容体としての  $\text{SO}_4^{2-}$  の供給率については、セメントからの放出係数、 $\text{CaSO}_4$  の溶解度より決定し、 $\text{O}_2$  の消費については鉄の腐食速度を考慮した消耗も考慮される。

ただし、微生物の最大比増殖率については十分なデータが存在しないため、現状では以下に示すように相対時間軸での評価に止まっている。モデル概念を図2.2-27に示す。



現状 ; 生長率に関するデータが不足

図 2.2-27 Arterらによる微生物活動モデル

廃棄体中の有機物組成をセルロース、及びアスファルトで代表させ、既存の文献値を用いた場合の微生物の生長、劣化生成物の放出の様子を図2.2-28に示す。極初期の酸素を酸化剤とする期間（DCV = 1 に対応）の後、硫酸塩還元による生長期（DCV = 0.9）において著しい微生物の生長が生じ、硫酸塩が消費された後はメタン生成期（DCV = 0.8）に入り、最終的に廃棄物中の有機物が枯渇した後は、溶菌による有機物の供給が生じるものの流出等により微生物数は減少するものと予測されている。

セルロースとアスファルトの比較では、アスファルトの方がより還元状態にあり、モノー係数を基質によらず一定としたため、より生長が早く評価されている。

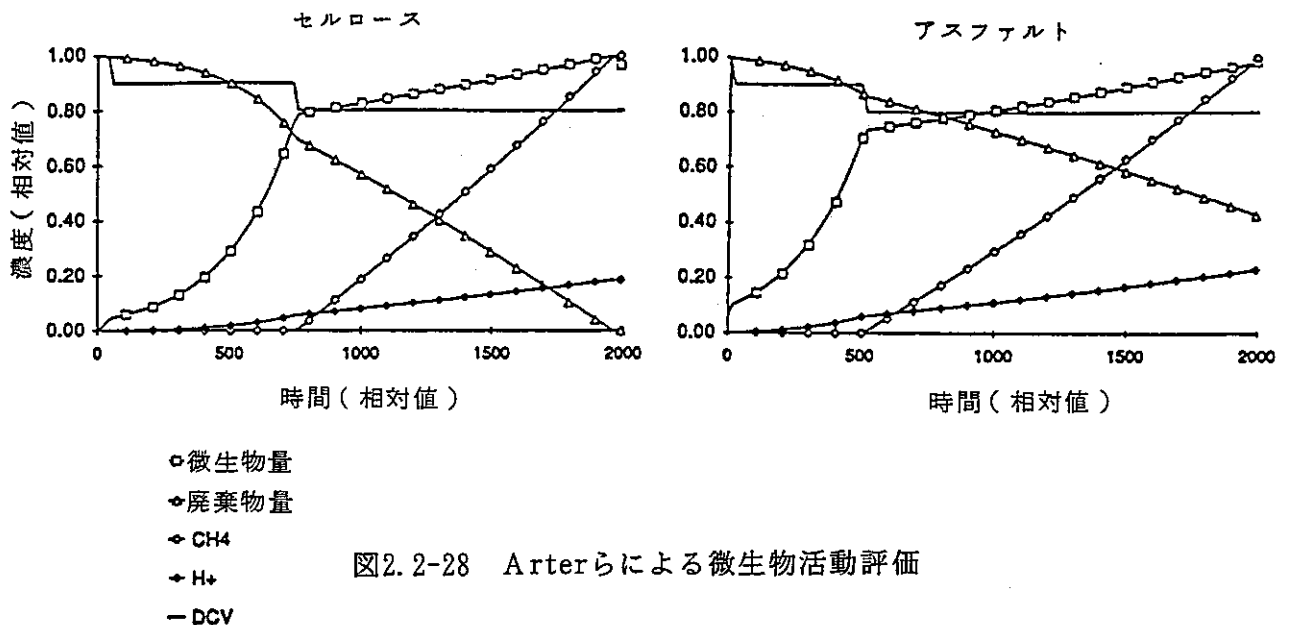


図2.2-28 Arterらによる微生物活動評価

上記の研究では、今後の課題を以下のように上げている。

- ・実験データの充実により微生物活動の速度論的パラメータ、基質との新和性を反映させる。
- ・実験データの充実により空間的不均一性及び環境パラメータの経時変化とその影響を評価可能とする。
- ・微生物の遺伝学的変化による長期的な代謝機能の変化の考え方を明確化する。
- ・廃棄体中の耐分解性の有機物に対する微生物活動データの充実。

## (ii) イギリスにおける開発例

低中レベル廃棄物の処分実施主体であるNIREXでは、同国における処分対

象廃棄体特性、及び処分概念を考慮した処分場環境条件下での微生物活動のモデル化について研究開発を実施している<sup>12)</sup>。

ここで目標としているモデルは、微生物活動による生成物の発生速度・量を測定可能なパラメータを用いて予測することにより、ニアフィールド条件の評価を行うものである。

現在開発されているモデルは、セルロースを主要な炭素源と仮定したものであり、そのモデル概念を図2.2-29に示す。

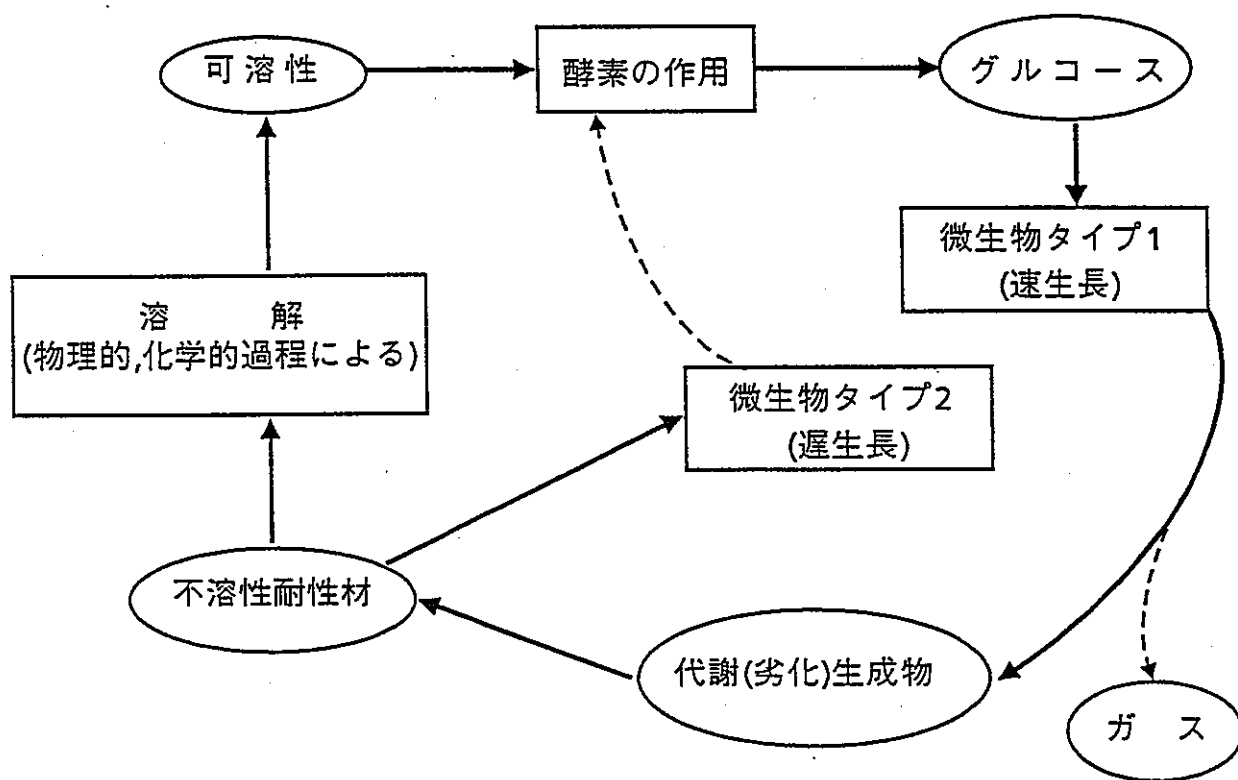


図2.2-29 NIREX の微生物活動モデル概念

可溶性の分解可能な形態となったセルロース分解生成物は、微生物によって生体構成物質、中間生成物、ガス等、多種類の工程により多くの生成物を生じるが、ここでは好気性分解、嫌気性分解ごとに代表的な少数の最終生成物を考慮するものとしている。

微生物活動はArterらと同じくモノーの式を用いて評価しており、セルロースの可溶化による半減期を8年とした場合の評価結果を図2.2-30に示す。モデル及び算定条件の詳細は明らかでないが、図は嫌気性雰囲気下において、嫌気性セルロース劣化型、エタノール利用型、の2種類のタイプの細菌の活動をシミュレートしたものである。1990年時点でこれらのモデルは*Bacillus subtilis*を用いた確証が行われている<sup>4)</sup>。

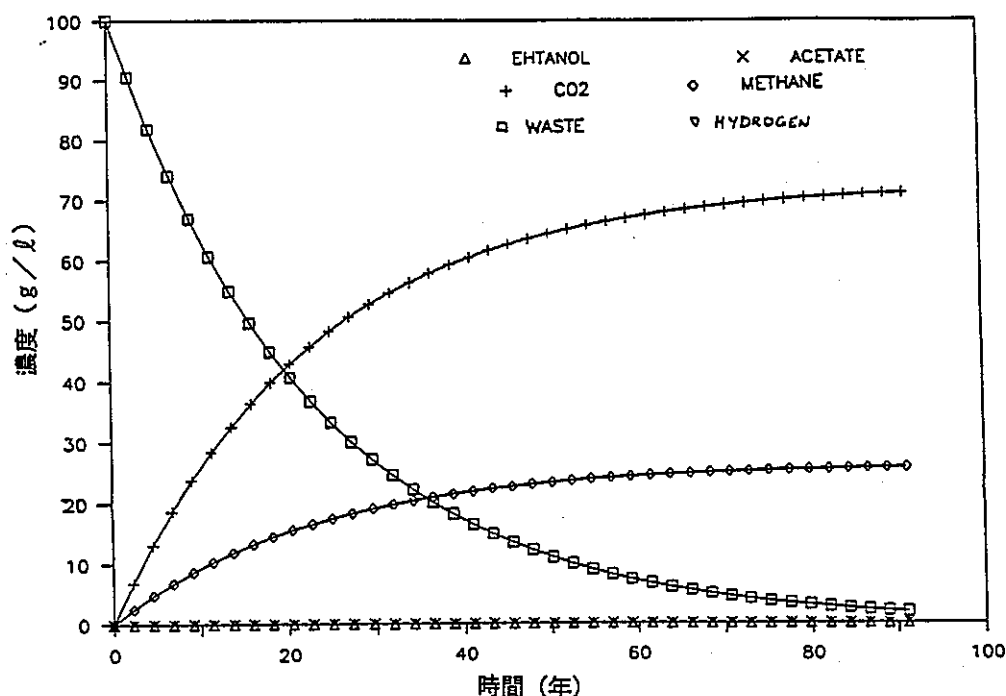


図2.2-30 NIREX による微生物活動予測例

NIREXでは温度及びpHの生長速度への影響についてモデルの改良を実施しており、さらに金属の腐食によって生じた水素の微生物活動による消費についてモデル化の計画がある。

### (Ⅲ) まとめと今後の課題

微生物活動をモデル化する上での問題点は、特に環境の不均質性及び長期的な微生物の代謝機構の変化を、どの様に反映、評価するかという点にある<sup>13)</sup>。現在、試験によって得られている生長速度は、多くが均質な系におけるデータであり、異種微生物間の相互作用による効果も重要であるとされている。

また、長期的な処分環境条件の変化による微生物活動への影響や長期的な代謝機構の変化については、モデル化を行う上で不明な部分が多い。

これらの他にも微生物活動に関しては、アスファルトの分解に関する項でも述べたように、生長速度に係るデータ、微生物による基質との新和性、エネルギー収支に係るデータが不足している。したがって現時点でのモデルは均質系における相当保守側での想定に基づいた評価を行うものであり、今後、上記の因子、パラメータについて明らかにすると共に、得られた試験データを用いた活動モデルの検証を実施する必要があると考えられる。

さらに、微生物活動に必要な基質の消費と代謝産物の生成、及びそれらによる環境条件の変化については、各種条件下における、最終あるいは主要代謝産物とその特性について把握する必要がある。今後、処分場環境下における微生物培養試験、分解生成物の分析、及び後段で述べるような生成物の特性調査に係る試験によるデータの集収が待たれるところである。

#### 2.2.4 有機物の影響

処分場環境中には廃棄物に含有される有機物の他に、これらの化学分解生成物、及び前述の微生物活動による分解生成物、代謝産物として生成する有機物、さらに天然の有機物が存在し得ると考えられている。

これらの有機物はニアフィールドにおいて以下の影響を生じる可能性がある。

- ・有機物の酸化によるpHの低下と核種溶解度の増加、収着性の変化、腐食の促進
- ・有機物との錯体形成による核種溶解度の増加、収着性の変化
- ・代謝産物等による表面被覆、間隙閉塞から生じる物質移行の変化

以上の知見から、これまで試験が行われている有機物による溶解度及び収着性への影響について以下に代表的な研究例を示す。

##### (1) 処分場地下水中に存在する有機物

有機物が放射性元素と錯体を形成し上記の影響を及ぼすためには、これらの有機物が可溶性であって地下水中に浸出しなければならない。したがって廃棄物に含まれる有機物ではEDTA、シュウ酸等のキレート剤の影響が大きいと考えられている。廃棄物を構成するその他の有機物には、1章で示したように紙、布等のセルロース、ポリエチレン、塩化ビニール、ネオプレン等があるが、これらについて化学的、生物学的、あるいは放射線化学的に分解された水溶性の劣化生成物が、核種の溶解度、バリアの収着特性に影響を及ぼすものと考えられ、その他にも元来地下水中に存在するフミン酸、フルボ酸なども同様の効果があるものとされている。

これらのうち、ここではニアフィールドでの有機系廃棄物に起因すると考えられる溶解度等に対する影響試験例を示す。

##### (i) 処分場地下水中の有機物の分析

深地層地下水中の有機物の分析例としては、スウェーデンにおいて数ヶ所のボーリング孔から採取された地下水の分析例がよく知られており、これを表2.2-20に示す<sup>1)</sup>。

表2.2-20 スウェーデンにおける地下水中の有機物

| ボーリング孔 | 深さ [m] | TOC [mg/ℓ] | フミン系炭素の割合 [%] |
|--------|--------|------------|---------------|
| A      | 349    | 6.7        | 35            |
| B      | 402    | 1.6        | 25            |
| C      | 409    | 3.3        | 53            |
| D      | 420    | 7.9        | 37            |
| F      | 562    | 15         | 3             |
| G      | 376    | 4.0        | 3             |

A～F ; Fjällveden      G ; Kamlunga

TOC ; 総有機炭素濃度

これによれば、深部地下水にも10mg/ℓ程度の有機物が含まれ、その3～50%程度が動植物の分解生成物であるフミン物質であるとしている。また、イギリスにおいて分析された地下水の組成においても、1～10mg/ℓの溶存有機炭素が含有されており、その多くが酸性官能基を複数有する高分子量物質であることが明らかにされている<sup>2)</sup>。

TRU廃棄物の処分施設は現在諸外国でも存在せず、低レベル廃棄物の地層処分施設についてもスウェーデンのSFR等地下処分施設は存在するものの、運開後間もないため、TRU廃棄物、あるいは地層処分場からの浸出液に対する分析については、試験例が見られない。したがって、ここではアメリカの低レベル廃棄物処分場からの浸出液について含有有機物を分析した例を表2.2-21に示す。また、これらの有機物を含む浸出液を嫌気性雰囲気下で培養し、細菌群によって分解させた場合の成分の変化も併せて表2.2-22に示す<sup>3)</sup>。

表 2.2-21 浅地中処分場からの

## 浸出液中有機物

|                                 |                                  |
|---------------------------------|----------------------------------|
| 酸                               | Diacetone alcohol                |
| Benzoic acid                    | Dibutyl ketone                   |
| Butanoic acid                   | Fenchone                         |
| Decanoic acid                   | Methyl ethyl ketone              |
| 2-Thylhexanoic acid             | Methyl isobutyl ketone           |
| Hexanoic acid                   |                                  |
| Hydroxybenzoic acid             | アミン                              |
| 3-Methoxy-4-hydroxybenzoic acid | Aniline                          |
| 2-Methylbutyric acid            | Cyclohexylamine                  |
| 3-Methylbutyric acid            | Dicyclohexylamine                |
| 2-Methylhexanoic acid           | Methyldicyclohexylamine          |
| 2-Methylpentanoic acid          |                                  |
| 3-Methylpentanoic acid          | 芳香族                              |
| 2-Methylpropionic acid          | Benzene                          |
| Nonanoic acid                   | Biphenyl                         |
| Octanoic acid                   | Dimethylnaphthalene              |
| Pentanoic acid                  | Naphthalene                      |
| Phenylacetic acid               | Toluene                          |
| Phenylbutyric acid              | Xylene (isomers)                 |
| Phenylhexanoic acid             |                                  |
| Phenylpropionic acid            | エステル                             |
| Toluic acid (isomers)           | Butyl phthalate                  |
|                                 | Diethyl phthalate                |
| アルコール                           | Several unidentified phthalates  |
| Borneol                         | Tributyl phosphate               |
| 2-Butanol                       | Triethyl phosphate               |
| Cyclohexanol                    | Triphenyl phosphate              |
| 2-Ethylhexanol                  |                                  |
| 3-Ethylhexanol                  | エーテル                             |
| 2-Hexanol                       | Anisole                          |
| 3-Hexanol                       | Bis(2-chloroethyl)ether          |
| 2-Methyl-2-butanol              | Bis(2-chloroethoxy)methane       |
| Methylcyclohexanol              | Bis(2-ethoxyethyl)ether          |
| Octanol                         | 1,1-Diethoxyethane               |
| 2-Phenylcyclohexanol            | 1,1-Diethoxy-2-chloroethane      |
| (Propylene glycol)n             | 1,4-Dioxane                      |
| $\alpha$ -Terpineol             | Tetrahydrofuran                  |
| 3,3,5-Trimethylcyclohexanol     | Tripropylene glycol methyl ether |
| アルデヒド・ケトン                       | フェノール                            |
| p-Hydroxybenzaldehyde           | Cresol (isomers)                 |
| Paraldehyde                     | Octylphenol                      |
| Vanillin                        | Phenol                           |
| Acetovanillon                   | 4-t-Butylphenol                  |
| Camphor                         | Tetramethylbutylphenol           |

表 2.2-22 浸出液の微生物分解

## による効果

| 化 合 物                              | 初期濃度<br>(mg/l) | 含有率の<br>変 化<br>(%) |
|------------------------------------|----------------|--------------------|
| 2-methylpropionic acid             | 5.9            | -2                 |
| 2-methylbutyric acid               | 20.6           | -52                |
| 3-methylbutyric acid               | 9.9            | 0                  |
| Valeric acid                       | 5.5            | +27                |
| 2-methylpentanoic acid             | -              | -24                |
| C <sub>6</sub> acid (unidentified) | -              | -27                |
| Phenol                             | 1.1            | -27                |
| Hexanoic acid                      | 5.1            | -45                |
| 2-methylhexanoic acid              | 3.0            | -10                |
| Cresol (isomers)                   | 3.9            | -21                |
| C <sub>8</sub> acid (unidentified) | -              | -13                |
| Benzoic acid                       | 1.9            | -26                |
| Octanoic acid                      | 1.9            | -21                |
| Phenylacetic acid                  | 3.8            | -50                |
| Phenylpropionic acid               | 9.3            | -53                |
| Phenylhexanoic acid                | -              | -11                |
| $\alpha$ -Terpineol                | 0.26           | -12                |
| Tributylphosphate                  | 0.24           | 0                  |

表2.2-21に示す浸出液はアメリカのMaxey Flats 及びWest Valley 処分場からのものである。アメリカの低レベル処分場では発電所廃棄物ばかりでなく、研究、産業界からの様々な放射性廃棄物を埋設してきたことから、廃棄物中のインベントリと浸出液中成分の対応は不明であり、分解生成物の特定はできないが、表2.2-22より、分子量の大きい酸がより低分子量の炭化水素等に分解されていることが予測できる。

イギリスにおいても廃棄体中主要有機物の微生物分解試験を行い、セルロース、ビニル類等の有機物は、最終的に $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 等のガス、及び炭素数1～7の代謝脂肪酸に分解されるものと予測しているが、確認されている成分はガスの他にはアセテート、*n*-ブチレート、プロピオネート等である<sup>2)</sup>。

## (2) 廃棄体劣化生成有機物による影響

廃棄体に含有される有機物の劣化生成物による影響については幾つかの試験研究が行われているが、ここでは最も活発な研究活動が実施されている機関の1つであるイギリスのNIREXにおける成果の概要を示す。

### (i) 核種の溶解度に対する影響

NIREXではセメントによるバリアを想定して、高pH、還元性雰囲気下の処分場環境に、廃棄物に含まれる有機物の劣化生成物が混入した場合の主要核種に対する溶解度の影響に関して試験を行っている。化学的分解生成物による影響試験の結果を表2.2-23に示す<sup>2)</sup>。

表2.2-23 化学的劣化生成物による溶解度への影響

| 放射性核種    | 溶 解 度 ( $\text{mol/m}^3$ ) |                    |                                       |
|----------|----------------------------|--------------------|---------------------------------------|
|          | セルロース                      | 塩化ビニール             | 無 添 加                                 |
| Pu (IV)  | $10^{-2}$                  | $10^{-4}$          | $5 \times 10^{-7}$                    |
| Am (III) | $10^{-3}$                  | $5 \times 10^{-7}$ | $5 \times 10^{-8}$                    |
| Th (IV)  | $10^{-2}$                  | $10^{-6}$          | $< 8 \times 10^{-7}$                  |
| Np (IV)  | $2 \times 10^{-3}$         | $10^{-4}$          | $8 \times 10^{-6}$                    |
| Tc (IV)  | $10^{-3}$                  | $2 \times 10^{-3}$ | $2 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$ |

普通ポルトランドセメント／フライアッシュ浸出液

| 放射性核種     | 溶 解 度 (mol/m <sup>3</sup> ) |                  |                        |
|-----------|-----------------------------|------------------|------------------------|
|           | セ ル ロ ー ス                   | 塩化ビニール           | 無 添 加                  |
| P u (IV)  | 10 <sup>-1</sup>            | 10 <sup>-6</sup> | 5 × 10 <sup>-7</sup>   |
| A m (III) | 3 × 10 <sup>-3</sup>        | 10 <sup>-7</sup> | 10 <sup>-7</sup>       |
| T h (IV)  | 10 <sup>-1</sup>            | 10 <sup>-5</sup> | < 8 × 10 <sup>-7</sup> |

普通ポルトランドセメント／高炉スラグ浸出液

これによればセルロースの分解生成物を加えた場合では、A m、P u、T h の溶解度は5桁近く増加し、その他の核種についても同様の傾向が見られる。この原因物質は特定されていないが、セルロースはアルカリ・嫌気性雰囲気下で、特にカルシウムイオンが豊富に存在する場合には、加水分解によりアルダリン酸、グルコニックアシド等の糖酸を生成することが知られており、これらが総体的に作用しているものと考えられている。

N I R E Xでは一方において、微生物分解生成物による溶解度への影響についても試験を行っており、その結果を表2.2-24に示す<sup>4)</sup>。

表2.2-25に示すように微生物分解生成物が比較的多いと考えられるAWのみの場合、87日後の溶解度が3桁ほど増加しているが、その後時間の経過により減少しており、他のケースと有意な差は見られない。現時点ではデータ不足のため明確な議論はできないとしながらも、N I R E Xではこれらのデータより以下の結論を示している。・微生物分解生成物が、化学的分解生成物より溶解度を上昇させる証拠はない。・化学的劣化によって生じた強い錯化剤としての糖酸に対する、微生物分解特性を把握する必要がある。

表2.2-24 微生物分解生成物によるPu溶解度への影響

| カ ラ ム               | 溶 解 度 (nM) |       |       |
|---------------------|------------|-------|-------|
|                     | 試 験 期 間    |       |       |
|                     | 25 日       | 87 日  | 149日  |
| Aged LLW(AW)        | 0.113      | 4900  | 0.28  |
| AW+OPC              | 0.386      | 1.23  | 1.08  |
| Fresh LLW(FW)       | 0.39       | 0.23  | 0.2   |
| FW+OPC              | 0.09       | 0.3   | 0.55  |
| OPC                 | 0.065      | 0.04  | 0.12  |
| AW+OPC leachate(OL) | 0.16       | 0.167 | 0.11  |
| FW+OPC leachate     | 0.58       | —     | 0.065 |
| FW leachate — OPC   | 0.049      | 0.19  | 2.46  |
| OL—FW—OL            | 0.136      | 0.152 | 0.03  |

FW ; 模擬廃棄物 (新) , OPC ; 普通ポルトランドセメント (破壊)  
 AW ; 模擬廃棄物 (時間経過) , OL ; 普通ポルトランドセメント浸漬液  
 模擬廃棄物組成 (いずれも細断片) , 分解生成物濃度

セルロース 37% 0.07~ 0.7mM  
 塩化ビニル 35%  
 ポリエチレン 14%  
 ハイパロン 7%  
 ネオプレン 7%

## (ii) 核種の収着性に対する影響

収着性に対する影響についても測定例は少ない。本分野もNIREXにおいて研究が実施されており、高pH(8~11)、セメント平衡浸出液、嫌気性雰囲気下において、U、アクチニド、FP元素について分配係数の変化を測定している例がある<sup>5,6)</sup>。劣化生成物としては模擬劣化生成物としてグルコネートを、また実劣化生成物としては、木片をセメント水熱条件下で処理した浸出液を用いている。収着材としては、ロンドンクレイ(ブラッドウェル産)、ケイスネスフラッグストーン(ドーンレイ産)を用いている。試験結果を表2.2-25に示す。

U(4価)について、粘土に対する分配係数はグルコネート、木片劣化生成

表2.2-25 化学的劣化生成物による収着性の変化

| 元 素 | 初期濃度<br>(M)       | 収 着 材    | 収着剤/水 | 最終pH | 劣化生成物<br>(M)               | 分配係数 [cm <sup>3</sup> /g] |                      |
|-----|-------------------|----------|-------|------|----------------------------|---------------------------|----------------------|
|     |                   |          |       |      |                            | 遠心分離法                     | 0.45μmフィルタ           |
| U   | 10 <sup>-6</sup>  | ロンドンクレイ  | 50/1  | 11.1 | —                          | 10 <sup>4</sup>           | 10 <sup>4</sup>      |
|     |                   |          |       | 11.7 | グルコネート (10 <sup>-3</sup> ) | 2.0×10 <sup>3</sup>       | 2 ×10 <sup>3</sup>   |
|     |                   |          |       | 12.3 | 木片劣化生成物                    | 2.5×10 <sup>3</sup>       | 2 ×10 <sup>3</sup>   |
|     |                   | フラッグストーン | 50/1  | 11.9 | —                          | 4.5×10 <sup>3</sup>       | 4.5×10 <sup>3</sup>  |
|     |                   |          |       | 12.0 | グルコネート (10 <sup>-3</sup> ) | 3.5×10 <sup>2</sup>       | 3.5×10 <sup>2</sup>  |
|     |                   |          |       | 12.4 | 木片劣化生成物                    | 4.5×10 <sup>2</sup>       | 7.0×10 <sup>2</sup>  |
| P u | 10 <sup>-10</sup> | ロンドンクレイ  | 50/1  | 11.0 | —                          | 6.5×10 <sup>3</sup>       |                      |
|     |                   |          |       | 10.8 | グルコネート (10 <sup>-3</sup> ) | 3.0×10 <sup>2</sup>       | 1.5×10 <sup>2</sup>  |
|     |                   |          |       | 8.9  | 木片劣化生成物                    | >10 <sup>4</sup>          | >10 <sup>4</sup>     |
|     |                   | フラッグストーン | 50/1  | 11.2 | —                          | 10 <sup>4</sup>           |                      |
|     |                   |          |       | 11.2 | グルコネート (10 <sup>-3</sup> ) | 3.0×10                    | 10                   |
|     |                   |          |       | 10.0 | 木片劣化生成物                    | 2.5×10 <sup>2</sup>       | 1.5×10 <sup>2</sup>  |
| S n | 10 <sup>-7</sup>  | ロンドンクレイ  | 50/1  | 10.9 | —                          | 8.4×10 <sup>4</sup>       | 1.0×10 <sup>5</sup>  |
|     |                   |          |       | 10.3 | グルコネート (10 <sup>-3</sup> ) | 2.3×10 <sup>3</sup>       | 2.5×10 <sup>3</sup>  |
|     |                   |          |       | 11.9 | 木片劣化生成物                    | 1.1×10 <sup>4</sup>       | 1.6×10 <sup>4</sup>  |
|     |                   | フラッグストーン | 50/1  | 12.0 | —                          | 1.4×10 <sup>4</sup>       | 1.4×10 <sup>4</sup>  |
|     |                   |          |       | 12.0 | グルコネート (10 <sup>-3</sup> ) | 3.2×10 <sup>2</sup>       | 3.5×10 <sup>2</sup>  |
|     |                   |          |       | 12.1 | 木片劣化生成物                    | 1.2×10 <sup>4</sup>       | 1.2×10 <sup>4</sup>  |
| R a |                   | ロンドンクレイ  | 50/1  | 12.0 | —                          | 4.0×10 <sup>3</sup>       | >5.0×10 <sup>3</sup> |
|     |                   |          |       | 11.9 | グルコネート (10 <sup>-3</sup> ) | 3.8×10 <sup>3</sup>       | 4.3×10 <sup>3</sup>  |
|     |                   |          |       | 12.0 | 木片劣化生成物                    | 5.0×10 <sup>2</sup>       | 5.5×10 <sup>2</sup>  |
|     |                   | フラッグストーン | 50/1  | 12.1 | —                          | 2.0×10 <sup>3</sup>       | 1.8×10 <sup>3</sup>  |
|     |                   |          |       | 12.1 | グルコネート (10 <sup>-3</sup> ) | 1.7×10 <sup>3</sup>       | 1.8×10 <sup>3</sup>  |
|     |                   |          |       | 12.0 | 木片劣化生成物                    | 6.4×10 <sup>3</sup>       | 7.8×10 <sup>2</sup>  |

注) ・グルコネート濃度  $2 \times 10^{-3}$  Mは溶存有機炭素として140ppmに相等

・木片劣化生成物濃度は溶存有機炭素として~3,000ppm

物ともその存在により1/10程度になっている。フラッグストーンに対してはグルコネートの添加により分配係数は1/10以下に、木片劣化生成物でも1/10程度に減少している。

さらに同研究では本条件下における主要化学種を $\text{UO}_2(\text{OH})^+$ ,  $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5^+$ として熱力学モデルによる解析を行っている。

PuについてもU(4価)とほぼ同様の挙動を示しているが、粘土について木片劣化生成物による分配係数の変化はほとんどない。またフラッグストーンの場合、木片劣化生成物の添加により分配係数が1/10近くに減少するのに対し、グルコネートではその変化が $1/10^3$ 近くになる。さらにSnについても同様の挙動を示しているが、これはこれらの元素の収着機構が表面錯化によるものであり、グルコネートがより効果的な配位子を有するため、収着特性を低下させるものと予測している。

一方、Raについてはグルコネートがほとんど分配係数を変化させない。これはRaの収着機構がイオン交換によることと、Ra(2価)の有機配位子との錯体安定度定数が、より酸化状態の高い他のイオンに比べ非常に小さいことによるためと推測している。

### (3) 有機キレート剤による影響

有機キレート剤は設備・機器の除染剤、及び元素の抽出溶媒として使用され、金属イオンと複数の配位子による安定な錯体を形成することにより、金属の溶解度を増加させ、あるいはバリア材の収着性に影響を及ぼすことが知られている。代表的な有機キレート剤としては、蓚酸、クエン酸、EDTA、NTA、HEDTA等があり、これらの化学物質による固化体からの浸出性に係る試験、溶解度、収着特性の影響に関する試験が実施されている。

処分場環境条件下におけるキレート剤の影響についての試験は、最近ではCECの研究計画として岩塩層中への中／低レベル廃棄物処分を対象として実施されている例がある<sup>7, 8)</sup>。

Keilingらはキレート剤として蓚酸、クエン酸、DBP、PTB、EDTAを用いており、溶解度及び収着特性を測定する元素としてI, Cs, U, Np, Pu, Am, Euを選択してゐる。その結果ヨウ素(AgI)、セシウム(Cs

$\text{NO}_3^-$ ) の溶解度はキレート剤に強い影響を受けないが、アクチニドに対しては、EDTA, DBP, クエン酸, 蔞酸が強い影響を及ぼすことが明らかにされている。

なお、本試験では各有機キレート剤を飽和させた条件での影響であり、キレート剤濃度は  $5 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1} \text{M}$  と比較的大きい。キレート剤の濃度による影響については、NIREXにおいてPuに対する高濃度領域における溶解度への影響は著しいものの、痕跡程度では全く影響を及ぼさないとしている。したがって処分環境におけるキレート剤濃度の予測が重要であり、今後キレート剤濃度と影響の関係をさらに明らかにして行く必要がある。

U, Puの試験結果を代表として図2.2-31に示す。

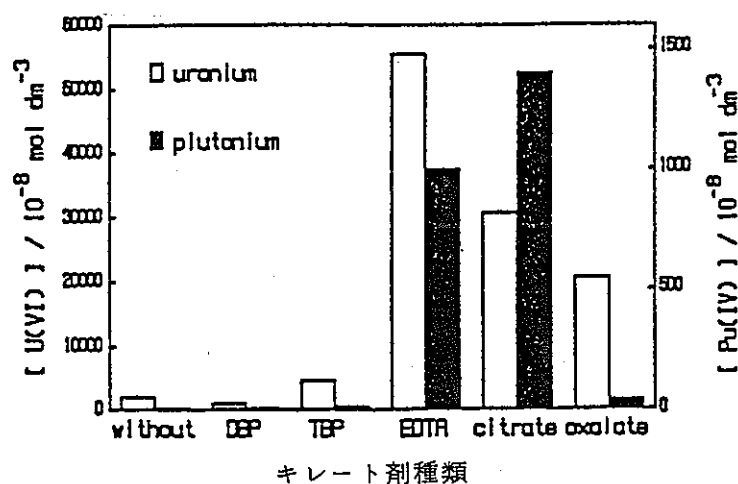


図2.2-31 NaCl 飽和セメント浸出液中での溶解度

#### (4) まとめと今後の課題

深地層中の有機物としては放射性核種と錯体を形成する可能性が高いフミン物質の存在が知られているが、フミン物質は類似の化学物質の総称であり、その構造、組成、特性、地下水中濃度については不明な点が多い。したがって地下水中天然有機物の種類、化学組成、濃度、核種の溶解度・吸着性等移行特性に対する影響を把握する必要がある。

また、廃棄体中に含有する有機物については、錯化（キレート）剤の存在にお

処分場環境下における核種移行特に対する影響についてデータが不足するため、今後これらについて確認する必要があるものと考えられる。

廃棄物に含有する有機物の劣化生成物については、セルロースについてその影響が確認されつつある段階であり、分解生成物の同定、生成物質ごとの移行特性に対する影響度の把握はなされていない。特に処分場環境下においては、 $pH$ 、 $Eh$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $CO_3^{2-}$ 等の共存イオンによる相互の影響、効果の重畳が考えられ、特定の分解生成物による効果の弁別が困難であるところから、主要な分解生成物の同定と、それらによる核種移行特性への影響を個別に把握し、その後、混合系での影響評価を実施すべきものと考えられる。

### 3. 研究計画に関する検討

### 3. 研究計画に関する検討

廃棄体特性及び処分環境に特有な条件等を反映し得る、長期の性能評価手法を確立するために、実施すべき各種研究開発内容について検討を行う必要がある。そこで、ここでは前章で検討した各種の現象やその影響評価の考え方等を整理し、長期研究計画策定の基礎とすべく、T R U廃棄物の処分研究で開発すべきモデルや得るべきデータについて検討、摘出を行った。

#### 3.1 研究開発課題の整理

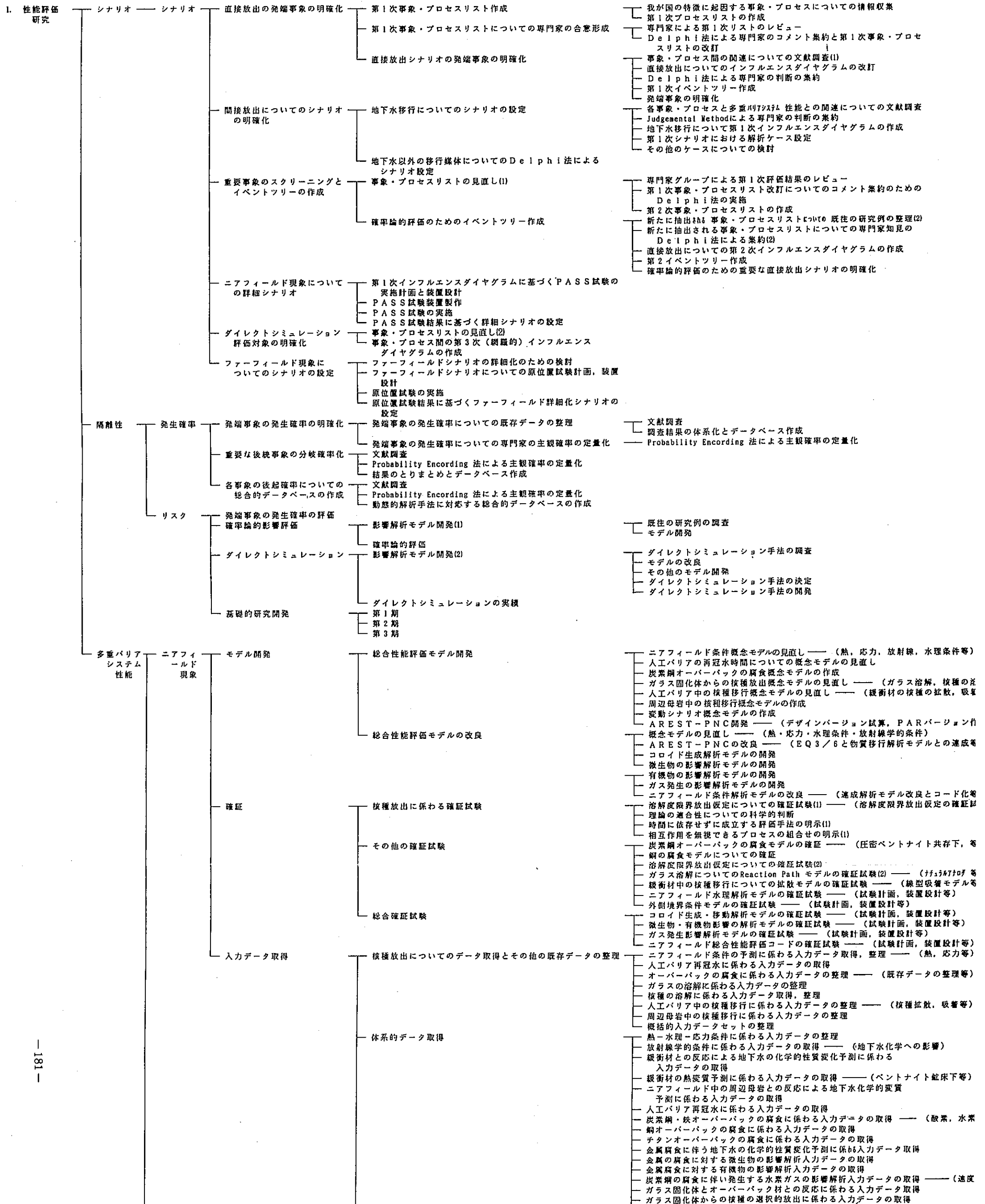
2章での検討結果等を基礎とする他、既存の高レベル放射性廃棄物の処分に関する研究開発項目の体系を参考に、T R U廃棄物処分の性能評価に特有、重要な研究開発課題を系統的に分類・整理することにより、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発との対応を明確にし、相互の研究成果の取入れを容易にする他、研究管理の効率化に資する。

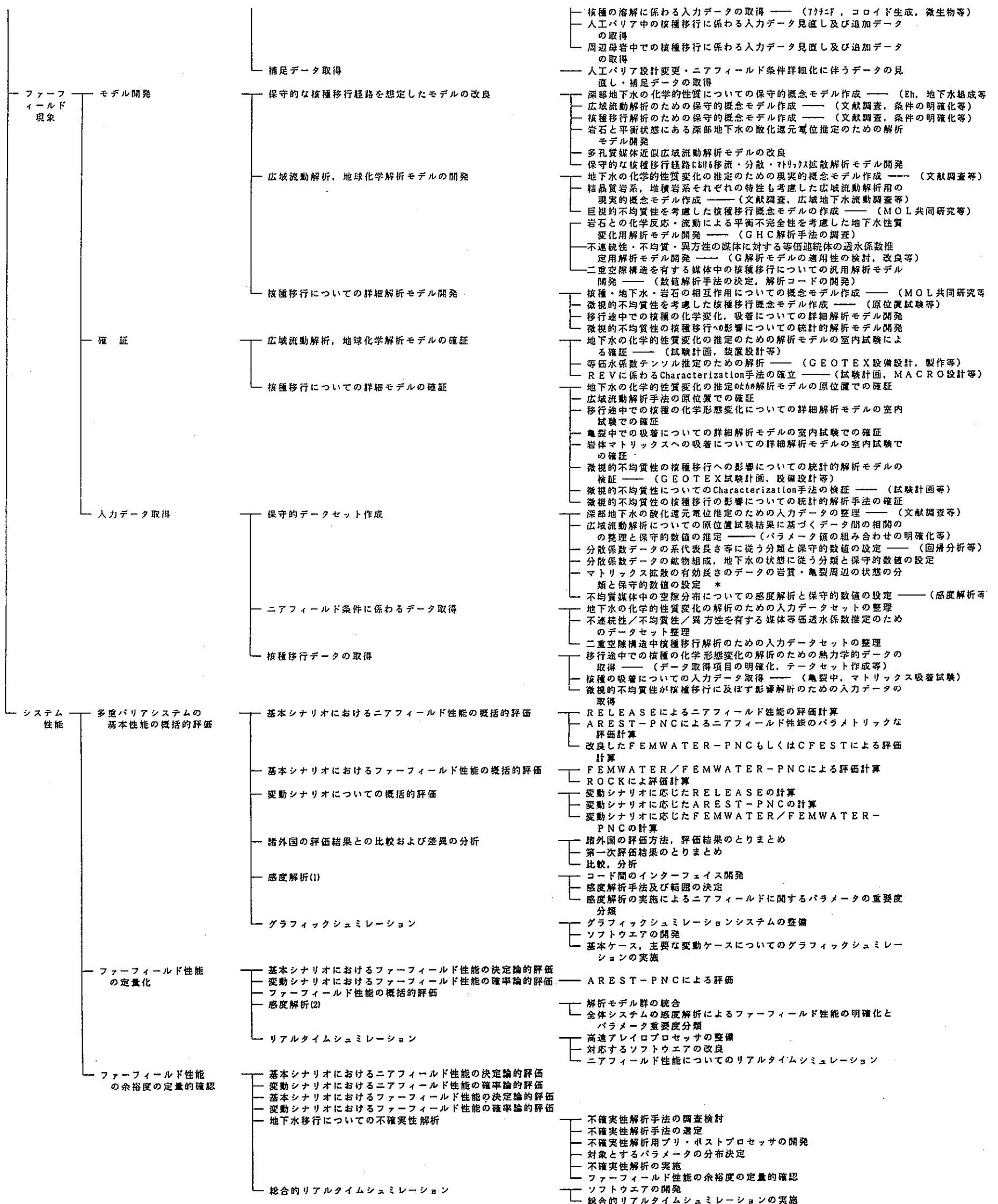
##### 3.1.1 高レベル放射性廃棄物に対する研究開発課題体系

前述のようにT R U廃棄物の研究開発課題を選定、整理する上では、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の成果を取込みつつ、効率的な研究開発を進める必要があるとされている。したがって、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発内容等との重複を避けると共に、それらと相互補完する実施項目を選定すべく、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発課題の体系を参考として、T R U廃棄物及びその処分システムの特殊性を反映したT R U廃棄物の処分研究開発課題の分類、整理を行うことが合理的である。

表3.1-1 に我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の開発項目体系を整理した。

表3.1-1 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発体系









### 3.1.2 廃棄物に対する研究開発課題の整理

全体性能評価システムの構築のためには3.1.1 で整理した我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発項目の概略体系との比較において、1章及び2章において摘出、整理を行った性能評価に係わる評価項目のうち、影響の大きいと考えられる現象を選択してモデルを簡略化した上で組合せ、さらに確率論的手法も取入れる等した全体性能評価システムの構築が必要である。また、高レベル放射性廃棄物の処分施設とは異なる概念で処分を実施するためには、処分場の掘削、人工バリアの製作技術等を開発、実証する必要もあり、これらの項目を実施する処分技術開発を加えたものがTRU廃棄物処分研究開発項目となる。

#### (1) 研究開発課題の整理

「TRU廃棄物の処分に関する調査研究(Ⅱ)」において検討を行ったTRU廃棄物の処分に係る研究開発課題を基礎として、2.1.2ではTRU廃棄物の処分研究として実施すべき研究開発課題を以下のように整理した。

#### I ソースターム研究

##### a) 廃棄体特性評価

###### ①核種インベントリ

###### ②物理的特性

###### ③化学的特性(化学組成, 分子構造, 核種保持機能等)

##### b) 廃棄体技術開発

###### ①廃棄体製造技術

###### ②品質保証技術

#### II 性能評価研究

##### a) シナリオ研究(人間侵入, 浅地層シナリオ解析等)

##### b) ニアフィールド核種移行

##### i 廃棄体からの核種放出

###### ①廃棄体からの放射性核種の浸出(固化体の劣化, 微生物の影響, 不均一性, ナチュラルアナログ含む)

②ガス発生（微生物，腐食等）

ii 人工バリア中の核種移行

①拡散移行

②溶解度（有機物，劣化生成物，バリア材の影響）

③収着特性（有機物，劣化生成物の影響，バリア材の影響，I<sup>129</sup>，C<sup>14</sup>）

④コロイド生成・移行（錯体）

⑤ガスの蓄積・移行

⑥バリア材の劣化（ベントナイトとコンクリートの両立性，有機物の微生物分解，等）

c) ファーフールド核種移行

①移流分散（浅地層処分の場合の不飽和水理・核種移行）

②収着特性（有機物，劣化生成物の影響，I<sup>129</sup>，C<sup>14</sup>）

③コロイド生成・移行

④ガスの移行

d) 全体システム性能評価

（評価手法の開発，総合性能評価手法の整備，総合性能評価）

III 処分技術開発

a) 処分システム設計

①人工バリアシステム（高度化含む）

②処分場（大空洞，個別・総合方式）

b) 技術開発

①人工バリア製作施工技術

②建設・操業・閉鎖技術（大空洞等）

③経済性評価

IV 地質環境条件の研究（比較的浅い地層への処分の場合）

①地下水化学（酸化－還元雰囲気変遷）

②浅層水理（不飽和水理，還流）

③岩盤特性（浅地層）

## (2) 処分の安全性についての研究開発の現状

次節にて実施する我が国での T R U 廃棄物の処分研究として実施すべき研究開発内容の検討、摘出の参考とするため、安全評価上必要となる研究開発課題として前述のように体系化された研究開発課題に含まれる分野に対し、諸外国の研究開発状況について調査しその概要を整理した。

### I. ソースターム研究

#### a) 廃棄体特性評価

##### ①核種インベントリ

H L W : ・使用済燃料に関しては測定例も多く、燃焼計算コードの使用により容易に近似値が把握される。

・ガラス固化体についても再処理プロセス内でのサンプリングによって廃液中核種組成が把握されている。又、実固化体についても主要核種濃度が分析・測定されている。

T R U : ・米国では W I P P の処分対象廃棄物について主要  $\alpha$  核種、F P に関する  
/ I L W データベースが整備されているが<sup>1)</sup>、フランスではプロセス廃液固化体について実測値を基礎としているものの、ハル・エンドピースのインベントリは放射化計算及び分配による計算値を用いている<sup>2)</sup>。イギリスにおいても安全評価において一定の仮定に基づいて算出された値を用いており、主要な廃棄物についても実測値のない物がある<sup>3)</sup>。M O X 廃棄物についてはその性質上、P u 回収の研究などからデータは比較的多い。

##### ②物理的特性

H L W : ・使用済燃料、ガラス固化体については構成物質が作製時に制御されるため把握は比較的容易。

・ガラス固化体では密度、化学組成、発熱量、熱伝導率等の熱的性質、強度等機械的性質についてデータが取得されている。

T R U : ・廃棄体としてコンディショニングされていない種類の廃棄体もあり、総

／ I L W      べての実廃棄物についてデータが採取されているわけではないが、フランス、イギリスにおいては海外委託再処理廃棄物の仕様提示のため、機械的性質、熱的性質について主要廃棄体の特性が評価されている。

### ③化学的特性

H L W : ・使用済燃料、ガラス固化体については構成物質が作製時に制御されるため把握は比較的容易。

・使用済燃料中のU等の化学組成については知見が得られている。

・ガラス固化体中の核種の化学形は通常酸化物として示されるが、原子配列、結合状態については明確ではない。但し、Pu等の核種の溶解度は浸出液側の条件によりほぼ決定されることが知られている。

T R U : ・W I P Pの処分対象廃棄物について、R C R Aの関係から重金属、毒性  
／ I L W      有機溶媒の含有量がプロセス使用量等より推定され<sup>1)</sup>、又、気体発生量評価のため、鉄、セルローズ等有機物の量が同様に推定されている<sup>4)</sup>。  
イギリス、スイス等においても同様の想定が行われているが、発生時点での記録に基づくより詳細なデータはない。

・I / L L Wについて炭素の化学形態に対して測定が行われている。ヨウ素等についてはAg Xにトラップされた場合の存在形態について研究例があるが<sup>5)</sup>、その他のF P、C Pについてはデータの採取例は少ない。

## II. 性能評価研究

### a)シナリオ解析

H L W : ・地層処分の隔離性評価については、I A E Aをはじめとして、幾つかの事象・プロセスリストやシナリオ解析手法が提案されており、その影響解析が試みられている。とくに、人間侵入シナリオの影響については、様々な議論がなされているところである。

T R U : ・T R U廃棄物処分を対象としたシナリオ解析例にはW I P Pについて実  
／ I L W      施された例があるが<sup>6)</sup>、ニアフィールドの詳細な現象を対象としたものではない。浅地中処分の濃度上限値設定上の人間接近シナリオに対する

影響評価としては、OECD/NEAの検討例がある。

## i ニアフィールド核種移行

### a) 廃棄体からの核種放出

#### ①廃棄体からの放射性核種の浸出

HLW：・ガラス固化体については、模擬、実固化体とも短期及び長期浸出試験が行われており、浸出率データは多いが、処分環境条件（低Eh、ペントナイト共存）下でのデータは少ない。

- ・ガラス固化体浸出モデルの開発については、表面層の形成による影響等を考慮した浸出モデル、速度論的解析モデルが検討されている。

TRU：・イギリス等においてセメント固化体の浸出試験が実施され、データが得られているが<sup>7)</sup>、処分場雰囲気下でのデータはまだ相対的に少ない。長期浸出試験の計画を実施<sup>8)</sup>。

／ILW

- ・長期浸出モデルは確立されていない。
  - ・フランスでは周囲のコンクリート等による地球化学的条件の変化により核種の水中濃度を決定するソースターム評価コードが開発されている<sup>9)</sup>。
  - ・不均質性による固化体浸出挙動への影響のモデルは確立されていない。
- 又、金属鑄塊等の熔融固化体についてのデータ取得、浸出モデルの検討は実施されていない。

（固化体の劣化の影響）

- ・アスファルトの微生物分解<sup>10)</sup>、アスファルト固化体の膨潤<sup>11)</sup>について定量的データが得られている。
- ・アスファルトのナチュラルアナログについては、フィンランド等で実施されている<sup>12)</sup>。

#### ②ガス発生

HLW：・現象としてはオーバーパック材として鉄を用いる場合の腐食によるH<sub>2</sub>発生速度、放射線分解によるH<sub>2</sub>等の発生について検討されているが、影響の大きいとされる前者については経験式によるモデルで極めて保守側の評価が行われている。

・フランスではこの他に、人工バリアの温度上昇によるガスの発生も重要としている。

TRU : ・鉄の腐食による  $H_2$  の発生については H L W と同様の研究が進められて  
/ I L W いる<sup>4, 13, 14)</sup>。

・有機物の分解によって発生する  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  等の気体についても影響が大きいとされるが、発生機構自体が明確でなく、定量的データはほとんどない。

・微生物活動による有機物分解モデルが英国において開発されつつある。<sup>15)</sup>

・アスファルトの微生物分解について定量的データが得られている<sup>10)</sup>。

・アメリカの W I P P において、ガス吸収あるいは発生抑制のための添加剤について検討された例がある<sup>4)</sup>。

#### b) 人工バリア中の核種移行

##### ① 拡散移行

H L W : ・拡散と線形可逆吸着を考慮した数値解法による解析コードが多数存在する。

・ベントナイト中の主要核種について、拡散係数が数多く測定されているが、還元性雰囲気でのデータは少ない。

・充填材としてベントナイト等粘土物質の透水性についてもデータが得られているが温度、圧力、pH、Eh等の条件を反映した処分場環境条件下でのデータは少ない。

TRU : ・I L W 処分場評価例の一部については、構造物、充填材として用いられ  
/ I L W るセメント／コンクリートの拡散特性を反映するため、関連データを評価している<sup>16, 17)</sup>。

・充填材としてベントナイト等粘土物質の透水性についてもデータが得られているが温度、圧力、pH、Eh等の条件を反映した処分場環境条件下でのデータは少ない。

・セメントの劣化による  $CaCO_3$  の析出による透水性の低下が示唆され

ているが定量的データはまだない。

- $\text{SO}_4^{2-}$  によるセメント／コンクリートの劣化についてスウェーデンで研究評価が実施されている。

## ②溶解度

H L W : • 多成分系での溶解量評価モデルは開発されているが、アクチニドに関する処分環境条件下のデータは非常に少ない。

T R U : • イギリスにおいてセメント／コンクリートがバリア材料として多用され  
／ I L W た場合の高  $\text{pH}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  存在下でのデータ取得が実施されつつある<sup>8)</sup>。

- スイスにおいて地球化学コードを用いた溶解度モデルへの適用のため、高アルカリ域での熱力学的データを取得しつつある<sup>18)</sup>。
- アメリカにおいて W I P P サイトにおける地下水に対する溶解度データが取得されている<sup>4)</sup>。

(セメントの化学的緩衝作用)

- イギリス、スイス等において  $\text{Ca}$  イオンの選択的溶解モデルによる処分場間隙水の長期  $\text{pH}$  変化が評価されている<sup>19, 20)</sup>。

## ③収着特性

H L W : • 多くは Henry 型の吸着による経験的モデルが適用されているが、表面錯体理論による理論的モデルも開発されている。

- 核種ごとの理論的吸着モデルを設定するための、有効間隙水の化学的性質、吸着平衡、及び吸着速度に関する基礎データの取得が必要とされている。
- 経験的モデルによる分配係数の測定値は多いが、多くは空気飽和条件下でのデータであり処分環境条件下でのデータは少ない。
- $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$  との錯体形成も重要であるとされているが、定量的データは少ない。

(劣化生成物の生成)

- ・スウェーデン等において放射線分解生成物及び鉄の腐食による地球化学的条件の変化が解析されている。

TRU : 固化媒体, 充填材として用いられるセメントの吸着特性が評価されている<sup>16, 17)</sup>。  
/ ILW

- ・地球化学コードへのイオン交換モデル, 表面錯体モデルの組み込みが実施されている<sup>8)</sup>。

(各種影響物質による影響)

- ・イギリスではセルロースの分解生成物であるグリコラート, グルコネート, アジパート, サッカレート存在下での熱力学データを取得している<sup>8)</sup>。
- ・イギリスでは既存のLLW処分場における有機物, 微生物の採取, 分析を行っている<sup>6, 8)</sup>。
- ・微生物活動モデルの開発が実施され, 酢酸, 酪酸, プロピオン酸, 蟻酸, エタノール, メタール等の最終生成物が発生するものとして検討が行われている<sup>8)</sup>。
- ・サッカレート存在下でのPuの溶解度が $10^4$ 倍以上となることが測定されている他, 微量成分としてのEDTA, シトレート, シュウ酸の存在下による溶解度, 収着性に対する影響についてデータが収集されつつある<sup>8)</sup>。
- ・考古学サイトから発掘されたセルロース分解生成物による試験が実施されている。
- ・イギリスにおいて100年前のモルタルに対する硫酸塩の影響についてナチュラルアナログ研究を実施している。

(金属の腐食, 有機物分解による地球化学的条件への影響)

- ・スイスにおいて $O^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ の消費によるEhの低下の効果が指摘されているが, モデル化に到っていない<sup>21)</sup>。

#### ④コロイド生成・移行

HLW：・アクチノイドについて真性コロイドの生成が知られているが、定量的なデータは得られていない。

- ・擬似コロイド生成物質についてはオーバーパック材の酸化物、水酸化物、緩衝材等が考えられているが定量的なデータは得られていない。
- ・緩衝材、周辺母岩中とも移行に関するデータはほとんどない。
- ・コロイドの移行については、吸着、フィルトレーション、移流等の現象が関与すると考えられているが、コロイドと移行媒体の特性とを関連付けた解釈は未検討の段階にある。

TRU：・廃棄体中のコロイド生成物質について総べてが把握されているわけではない。  
/ ILW

- ・WIPPにおける評価、イギリス、フランス、スイス等においてもコロイドによる移行の評価の必要性は述べられているが、いずれも試験研究を実施あるいは計画中であり<sup>18)</sup>、定量的モデル、データはほとんど存在しない。

#### ⑤ガスの蓄積・移行

HLW：・スウェーデンではベントナイトの透気性について測定、評価が実施されている。

- ・ドイツ、フランスにおいて岩塩中でのガス発生量、放出量、岩塩層への影響について検討されているほか、花崗岩の透気係数等が測定されている。
- ・ドイツでは岩塩中でのガスの移行が評価されているが、分散の効果を考慮する必要があるとしている他、フランスにおいても坑道内でのガスの流れを解析している。
- ・カナダにおいても坑道からのガスの放出に関して、ガスの流速、透気係数等に付いて試験、モデル化が実施されている。

TRU：・アメリカのWIPP、スイス、イギリス、ドイツ等において処分空洞内  
/ ILW の圧力上昇とガス放出量に関する試験、2層流移行に関するモデル化、

評価が行われている<sup>4), 13), 22~27)</sup>。

- スウェーデン、スイスでは充填材コンクリート中の $H_2$ ガスの移行をモデル化し、評価を行っている<sup>28), 29)</sup>。
- ベルギーではイギリス、イタリアと共に粘土層中のガス移行試験が原位置で実施され、気泡移行評価コードを開発している<sup>30)</sup>。
- スウェーデン、フィンランド、スイス等では処分施設の健全性確保のため、サイロ頂部にガス抜き弁を設置する等の対処を行い、その効果を評価している<sup>31), 32)</sup>。
- イギリスではドリッグLLW処分場でのガス発生量測定が実施され、廃棄物劣化モデルが開発されているほか、微生物劣化と金属腐食を対象とした解析モデルの開発が行われている<sup>34)</sup>。

#### ⑥バリア材の劣化

- $SO_4^{2-}$ によるセメント、コンクリートの劣化についてスウェーデンで研究評価が実施されている<sup>35)</sup>。
- 考古学サイトから発掘されたセルロース分析生成物に関する研究が実施されている<sup>15)</sup>。
- イギリスにおいて100年前のモルタルに対する硫酸塩の影響についてナチュラルアナグロ研究を実施している<sup>15)</sup>。
- ベントナイトの長期安定性を評価する研究の一環として、ベントナイトの主成分であるスメクタイトのイライト化に関する研究や、炭素鋼オーバーパックの天然環境下における長期的な腐食挙動の調査が実施されている。
- コンクリート等の劣化に関する調査試験やモデル化研究が進められている<sup>36)</sup>。

## ii ファーフィールド研究

### a) 地層中の核種移行

#### ① 移流分散

H L W : ・各国において各種の地質特性, 評価目的等に応じて, 多孔質等価媒体モデル, 二重間隙モデル, 亀裂ネットワークモデル等が開発, 応用され, 各種解法により地下水流・核種移行の解析が行われている。

- ・ファーフィールドにおける水理・核種移行解析コードの確証は, HYDROCOIN, INTRAVAL, Stripaプロジェクト等の国際共同研究により実施されている。
- ・分散の効果については, アメリカ, スウェーデン, スイス等において実地層について研究が行われ, 地下水流速, 移行距離との関係が明らかにされつつある。
- ・熱-水-応力-化学との連成解析コードが開発されつつある。

T R U : ・ファーフィールドにおける核種移行解析においては, 放射性廃棄物の種  
／ I L W 類によらず, 地質条件との適合を考慮することにより H L W と共通のモデルが開発, 確証され, 評価に適用されている。

#### ② 収着特性

H L W : ・核種ごとの理論的吸着モデルを設定するための, 有効間隙水の化学的性質, 吸着平衡, 及び吸着速度に関する基礎データの取得が必要とされている。

- ・経験的モデルによる分配係数の測定値は多いが, 多くは空気飽和条件下でのデータであり処分環境条件下でのデータは少ない。
- ・ $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$  との錯体形成も重要であるとされているが, 定量的データは少ない。

T R U : ・地球化学コードへのイオン交換モデル, 表面錯体モデルの組込みが実施  
／ I L W されている<sup>15)</sup>。

(各種影響物質による影響)

- ・イギリスではセルロースの分解生成物であるグリコラート，グルコネート，アジパート，サッカレート存在下での熱力学データを取得している<sup>8)</sup>。
- ・イギリスでは既存のLLW処分場における有機物，微生物の採取，分析を行っている<sup>8)</sup>。
- ・考古学サイトから発掘されたセルロース分解生成物による試験が実施されている<sup>15)</sup>。

### ③コロイドの生成・移行

HLW：・地下水中のフミン酸，フルビン酸がアクチニドと錯体を形成することから溶解度，及び移行に影響することが知られている他，微生物が有機物として作用することによる影響が知られているが，データは少ない。

- ・アクチノイドについて真性コロイドの生成が知られているが，定量的なデータは得られていない。
- ・擬似コロイド生成物質についてはオーバーパック材の酸化物，水酸化物，緩衝材等が考えられているが定量的なデータは得られていない。
- ・緩衝材，周辺母岩中ともコロイドの移行に関するデータはほとんどない。
- ・コロイドの移行については，吸着，フィルトレーション，移流等の現象が関与すると考えられているが，コロイドと移行媒体の特性とを関連付けた解釈は未検討の段階にある。

TRU：・コロイドの生成についてはHLWと同様の現象が検討されている段階で  
/ ILW あり，定量的データはない<sup>15, 18)</sup>。

- ・廃棄体中のコロイド生成物質についても総べてが把握されているわけではない。
- ・WIPPにおける評価，イギリス，フランス，スイス等においてもコロイドによる移行の評価の必要性は述べられているが，いずれも試験研究を実施あるいは計画中であり，定量的モデル，データはほとんど存在しない。

#### ④ガスの移行

H L W : ・ドイツ、フランスにおいて岩塩中でのガス発生量、放出量、岩塩層への影響について検討されているほか、花崗岩の透気係数等が測定されている。

・ドイツでは岩塩中でのガスの移行が評価されているが、分散の効果を考慮する必要があるとしている他、フランスにおいても坑道内でのガスの流れを解析している。

・カナダにおいても坑道からのガスの放出に関して、ガスの流速、透気係数等に付いて試験、モデル化が実施されている。

T R U  
／ I L W ・アメリカのW I P P、ドイツのコンラッド、スイス等において、二相流評価コードを用いた、ガスによる水の移行に対する影響が評価されている<sup>27, 37, 38)</sup>。

・スイス、アメリカの合同による二相流の原位置試験を実施し、解析結果の評価を行っている<sup>24)</sup>。

・ベルギーではイギリス、イタリアと共に粘土層中のガス移行試験が原位置で実施され、気泡移行評価コードを開発している<sup>30)</sup>。

### Ⅲ 全体システム性能評価手法

H L W : ・D O Eにおいては、最も複雑な個別モデルから、複数シナリオに対応したプロセス、事象を評価する簡略されたモデルまで3段階の階層でモデルを開発中。

・C E Cでは各国の候補地層について、P A G I S計画により総合安全評価に到るコードを体系化しているが、ガス発生等個々の影響因子については現在モデル化、試験を実施中の課題が多い。又、処分環境条件下でのデータ採取も今後の課題である。

T R U  
／ I L W ・アメリカではW I P PのS E I Sに適用するためのモデル開発を実施<sup>4)</sup>。

・C E Cでは各国の候補地層について、P A C O M A計画により総合安全評価に到るコードを体系化しているが<sup>2, 39)</sup>、有機物、ガス等個々の影

響因子については現在モデル化，試験を実施中の課題が多い。又，処分環境条件下でのデータ採取も今後の課題である。

- ・特にH L W / T R U廃棄物を同一坑道内に定置する概念を示しているベルギーにおいて，熱の影響，セメントによるp Hの影響，アスファルト等有機物の分解，N a N O<sub>3</sub>の存在による影響等について試験，研究が行われている<sup>18)</sup>。

### Ⅲ．処分技術開発

#### a) 処分システムの設計研究

##### ①人工バリアシステム

H L W : ・人工バリアの基本概念が各国において検討され，固まりつつある。主要な例は以下の通りである。

スウェーデン ; 銅製キャニスタ，圧密ベントナイト製緩衝材

スイス ; 鋳鉄製オーバーパック，圧密ベントナイト製緩衝材

アメリカ ; 鋼製コンテナ

フランス ; 粘土物質等による緩衝材

ドイツ ; 鋼製オーバーパック（又は無し），岩塩による埋戻し材

- ・スウェーデン，スイス，フランス等においてニアフィールド内の水理，緩衝材の熱的安定性に対して検討が行われている。

T R U : ・人工バリアの基本概念が各国において検討され，処分が実施されつつある<sup>40, 41)</sup>。主要な例は以下の通りである。

/ I L W

スウェーデン ; コンクリート又はベントナイト製充填材，コンクリート製躯体

スイス ; コンクリート又はベントナイト製充填材，コンクリート製構造物

アメリカ ; 岩塩による埋戻し材

フランス ; コンクリート又はベントナイト製充填材，コンクリート製構造物

ドイツ ; 岩塩又は石灰岩による埋戻し材

イギリス ; コンクリート製充填材

- ・ドイツにおいてはニアフィールドにおける地下水の移行を段階的に記述したモデルが開発されているが，一般にニアフィールド内の詳細な水理は研究対象とされていない<sup>42)</sup>。

## ②処分場

H L W : ・各国において処分概念が検討され、固まりつつある。スウェーデン、フランス、アメリカは坑道から垂直（又は水平）の処分孔を掘削して定置する概念を、スイス、ベルギーは坑道内に水平に定置する概念について、ドイツは双方の概念を検討している。

・処分概念の検討に従い、アメリカ、スイス、スウェーデン、フランス等において、熱的安定性、処分上スケールの水理、及び経済性等の評価が行われている。

・ベルギーではI L Wと同一坑道への処分が、フランスではI L Wと同一サイト隣接エリアへの処分が、スウェーデンにおいてはL / I L Wと同一サイト近隣エリアへの処分が検討されている。

TR U : ・各国において処分場概念が検討され処分が実施されつつある<sup>40, 41)</sup>。  
/ I L W     ドイツ、アメリカは坑道内への定置を、スイス、スウェーデン、フランスは坑道内又は地下サイロ内への定置を検討しており、スウェーデンではサイロ、ボルトへの廃棄体の受入を開始している。

・処分概念の検討に従い、アメリカ、スイス、スウェーデン、フランス等において、熱的安定性、空洞安定性、処分場スケールの水理、及び経済性等の評価が行われている。

・ドイツ、ベルギーでは地下実験場において、熱、放射線による影響等に対する試験が行われている他<sup>18, 43)</sup>、スウェーデン等においても同様の計画がある。

・ベルギーではH L Wと同一坑道への処分が、フランスではH L Wと同一サイト隣接エリアへの処分が、スウェーデンにおいてはH L Wと同一サイト近隣エリアへの処分が検討されている。

・個別の廃棄物毎に概念を設定し、それらを統合・最適化する手順をとっている国はない。

(b) 技術開発

①人工バリア技術

H L W : ・フランス, アメリカ等において緩衝材の製作, 実規模定置試験が実施されている他, スウェーデン等においてパッケージの製作試験が実施されている。

T R U : ・スイス, スウェーデン等において, ガスの透過性, 強度等に着目したコ  
／ I L W ンクリート系充填材の開発が行われている<sup>33, 35)</sup>。

・スウェーデン, スイス等においては処分施設からのガス抜きのためベントの開発が行われている<sup>31, 32)</sup>。

・ドイツのコンラッド処分場では埋戻し技術の評価が行われている。

②建設・操業・閉鎖技術

H L W : ・スイス, スウェーデン, ベルギー等においては現状技術の地層処分への適用性が評価され, 監督機関において審査が行われている<sup>40, 41)</sup>。

・スウェーデン, カナダ, ベルギーにおいて地下実験場が建設され, 建設, 閉鎖技術の実規模試験が実施されつつあり, フランスにおいても同様の計画がある。

T R U : ・スイス, スウェーデン, ベルギー等においては現状技術の地層処分への  
／ I L W 適用性が評価され, 監督機関において審査が行われている。

・スウェーデン, カナダ, ベルギーにおいて地下実験場が建設され, 建設, 閉鎖技術の実規模試験が実施されつつあるが, 大深度大断面処分空洞の建設については実証されていない。

・スウェーデン, フィンランドではサイロ型, ボールト型の施設が地下数十mの深度で既に建設されている<sup>40, 41)</sup>。

・ドイツでは岩塩鉱内においてL / I L Wの試験的処分を実施した経験がある<sup>41)</sup>。

・アメリカではWIPPサイトにおいて建設, 廃棄体定置, 埋戻し技術等について各種試験が実施されている。

### 3.2 研究開発内容の検討

ここでは前節において摘出，整理された研究開発課題に対し，諸外国において考慮されている研究開発計画，現象の理解とモデル化に係る研究開発の進捗状況を参考として，各課題ごとの実施内容，研究成果・目標を定性的に検討，設定した。

3.1.2 に示した研究開発項目に対応する研究内容を以下に摘出，整理した。

#### I. ソースターム研究

##### a) 廃棄体特性調査

###### ①核種インベントリ

TRU核種を含む廃棄物は，再処理のプロセス廃液，ハル・エンドピースを始めとして多種多様であり，各廃棄物の性状に対して適切な方法を用いて核種分析により基礎データを蓄積すると共に，処分廃棄物のデータベースに必要となる処分対象放射エネルギーの把握，及び分別管理のため，より効率的な非破壊測定システムの開発が必要となる。

[実施内容，研究成果／目標]

###### ・測定対象核種の摘出

廃棄物の核種組成を設定し，これを基に長期毒性変化の算定，潜在的影響度の評価を行い，安全評価上クリティカルな核種を摘出する。

###### ・廃棄物毎の分析・測定方法の検討

多種類の物理的／化学的特性が異なる廃棄物について，廃棄体又は処理前の廃棄物等からの試料採取方法，核種の分析測定方法の選定，試料調整方法の検討を行う。

###### ・分析・測定，データ解析

核種インベントリの分析・測定を実施し，データはデータベース化して蓄積，整理する。

###### ・インベントリ評価確認方法の検討

廃棄物の破壊検査によるデータと，非破壊測定によるデータを用いて，スクリーニングファクタ法等による核種濃度の確認方法を検討，設定する。

- ・効率的非破壊測定システムの開発

パッシブγ線法，パッシブ中性子法，アクティブ中性子法による放射線測定データ，及びラジオグラフィー，トモグラフィー技術を用いた内容物特性データにより廃棄体内の核種濃度を評価するシステムの開発を行う。

## ②物理的特性

核種の浸出・移行の評価上必要となる構造，密度，間隙率等のほか，輸送等関連法規や受入れ基準等を参考に廃棄物の取扱に係わる諸特性，処分場操業時の安全性，処分施設設計の基礎となる強度等の機械的特性，熱的特性等について，データを採取しておくことが考えられる。

- ・評価項目，基準，規格の整備

貯蔵，輸送，処分場操業／閉鎖後の各段階における安全確保上の廃棄体要件を摘出し，各工程上の事故解析，放射線管理，臨界安全等の面から評価を行い基準化に必要なデータを得る。

- ・廃棄体毎の測定，評価手法の検討，開発

基準整備等に必要となる形状，寸法，重量，密度，間隙率，強度，熱的特性，照射線量率等について，サンプリング手法，測定技術の検討，選定を行う。

- ・測定・データ解析

各種物理的特性の測定を行い，データはデータベース化して蓄積，整理する。

## ③化学的特性

廃棄体を構成する物質の化学組成・特性について調査を行い，処分の長期安全性に影響を与える可能性のある物質の有無，存在量を把握する。長期安全性に影響を与える物質としては，気体の発生の原因物質となる金属，有機物，ニアフィールドの地球化学的パラメータに影響を与える，錯化剤，キレート剤，その他有機物及びその原因物質の他，コロイド形成物質等も考えられる。

- ・廃棄体構成物質の調査検討

廃棄体に含まれる物質を確認するため，調査方法を検討し，実廃棄物の調査が必要な場合には，そのサンプリング方法，測定技術を設定する。又，記録

等の調査により把握が可能な場合は、その評価手法について検討する。

- ・長期性能影響物質の調査，抽出，（気体発生，地球化学的パラメータ，透水性）

廃棄体中に含まれる物質，あるいはその劣化生成物について，核種の溶解度，収着特性に影響を及ぼす恐れのある物質を選定する。

- ・廃棄物毎の分析・測定方法の検討

廃棄体あるいは生廃棄物について主成分及び性能影響物質としての金属，セルロース等有機物，炭酸塩，硫酸塩等に対する分析，測定技術について検討する。

- ・分析・測定，データ解析

主要な構成物質の測定，評価を行い，結果をデータベース化し，蓄積，整理する。

又，処分の安全性に影響の大きいと考えられる，存在形態，保持機構を把握する。

- ・評価上重要となり化学形により溶解特性が大きく変化する核種の抽出

固相，溶液側の条件により溶解度の大きく変化する元素を抽出し，溶解度の調査を行う。

- ・分析方法の調査，検討

固相中での化学形分析技術，化合物の形態について分析する技術，試料調整手順について検討する。

- ・測定・分析

廃棄体中での化学形を分析し，溶解度評価の基礎データとする。

## b) 廃棄体技術開発

### ① 廃棄体製造技術

未処理の廃棄物については，TRU廃棄物の処分システムを考慮しつつ，廃棄体として必要な物理的，化学的特性を満足し，経済性にも十分配慮された，最適な固化体を製造するための技術開発を早期に実施することが必要とれる。そのため，TRU廃棄物の廃棄体製造技術研究は，TRU廃棄物の処分研究の進展に呼応し，処分研究と表裏一体化して廃棄体要求性能の設定，減容固化技術の選定／開発，実証試験を鋭意

実施していく必要がある。

## ②廃棄体品質保証

廃棄体の製造技術開発を進めるに当たっては、廃棄体が、貯蔵、処分場への輸送、そして処分において必要とされる特性、すなわち保証されるべき品質を有していることを保証することが重要である。

品質保証上の重要因子／核種の選定、その核種の分析方法又は推定方法、及びその必要精度、許容変動範囲等の標準化、検査／確認体制の整備と維持について検討し、体制を整備する。

## II. 性能評価研究

### i シナリオ研究

比較的浅い地層処分の場合には、高レベル廃棄物隔離性評価研究ではカバーされない、浅地層の事象、プロセスに対するシナリオ解析や、人間侵入シナリオの影響評価が必要となる。

#### ・浅地層処分のシナリオ解析

FEP'sの抽出、選定とそれらの組合せにより評価対象シナリオを選定する。さらに各現象に対する評価モデルを選定、開発し、深度、地質条件による影響評価を行う。

#### ・人間侵入シナリオの影響評価

FEP'sの抽出、選定とそれらの組合せにより評価対象シナリオを選定する。さらに各現象に対する評価モデルを選定、開発し、深度による影響評価を行う。

#### ・データ収集

上記シナリオの評価に必要なモデルパラメータ、生起確率のデータを収集、整理し、データベース化する。

### ii ニアフィールド核種移行

#### a) 固化体からの核種放出

##### ①廃棄体からの放射性核種の浸出

廃棄体からの放射性核種等の長期浸出挙動について試験研究を実施し、長期的な

核種溶出制限機能を把握すると共に、廃棄体の物理的閉込め機能、化学的吸着機能の劣化、不均質性の影響を含めて各種固化体に対するデータの収集、長期浸出モデルについて検討する。

- ・各種廃棄体に期待すべき機能の設定

均質及び不均質な廃棄体について、化学的バリア、拡散、物理的閉込め等期待すべきバリア機能を摘出し、評価モデルの検討に資する。

- ・処分場環境における廃棄体の長期浸出試験（放射性核種、その他化学物質）  
浸出試験対象とする元素、化学物質を設定し、平衡浸出、I A E A、M C C等の手法により浸出量を測定し、核種放出のモデル化に関する基礎データの収集を行う。

- ・長期溶出制限機能影響因子の確認

廃棄体からの核種の浸出挙動に影響すると考えられるセメント、ベントナイト成分、有機物、無機塩類、p H、E h等について、その影響度を確認する。

- ・不均質廃棄物の浸出挙動の調査検討

長期の浸出試験によりデータを収集し、浸出率、拡散、腐食溶解、個別要素、次元解析、確率論等のモデル、手法によるモデル化に資する。

- ・長期浸出モデルの開発

浸出試験結果に基づき、適切なモデルを適用することにより、モデルパラメータ等の設定評価を行う。

- ・固化媒体等のナチュラルアナログ

参考とし得る天然類似現象を摘出し、データを収集することにより、適用した浸出モデル、パラメータの検証を行う。

## ②ガス発生

T R U廃棄物処分場内での気体発生の主要な現象と考えられる、多様な金属の腐食によって発生する $H_2$ 等、有機物の微生物分解によって発生する $CO_2$ 、 $CH_4$ 等の発生機構について調査すると共に、環境条件を反映して気体の発生量、速度を予測するモデルの開発を行う。

- ・気体発生機構の調査値検討

金属腐食、微生物分解、放射線分解によるガス発生機構とそれに対する影響

因子について調査，検討する。

- ・環境条件を反映した気体発生評価モデルの調査／開発

E h, H<sub>2</sub> 分圧等の影響を評価可能な腐食モデル, p H, O<sub>2</sub> 濃度等の影響を評価可能な微生物活動モデル, 反応速度, 熱力学的平衡, 放射線分解に係る G 値等のデータを調査し, ガス発生量の評価モデルを構築する。

- ・気体発生量測定試験

p H, E h, 温度, 圧力, 有機物, 共存イオンの存在等による影響を考慮した腐食試験, 微生物の培養試験により, 速度論的データの収集, ガス発生量評価モデルの検証を行う。

- ・気体発生抑制技術の開発

処分場環境条件の調整による気体の発生速度の抑制, あるいは気体の消費／吸着等により処分場内の気体の蓄積を抑制する技術を開発する。

b) 人工バリア中の核種移行に関する研究

① 拡散移行

充填材, 構造物として用いられる可能性のあるベントナイト等粘土物質, コンクリート, 破碎岩等の透水性, 拡散特性について測定評価を行う。又, 充填材, 構造物の透水抑制機能の劣化と劣化に影響する因子を抽出し, 移行特性試験, モデル化を行う。

- ・充填材材料の検討, 抽出

T R U 廃棄物の処分場において採用されると予想される, セメント／コンクリート, ベントナイト／粘土物質等より, 拡散バリアとして期待すべき材料を抽出する。

- ・透水試験

充填材材料の透水試験を実施し, 透水係数を評価することにより, 拡散バリアとしての機能を確認する。

- ・処分場環境条件下における主要核種に対する拡散特性の測定, 評価

N p, A m, P u, U, I 等の安全評価上クリティカルとなる核種又はその親核種について, 処分場雰囲気下において見かけの拡散係数を測定する。

又、pH、Eh等の影響因子についてその寄与を確認する。

- ・低拡散性材料の開発

I等の陰イオンに対しても高い吸着特性を有し、見かけの拡散定数を低下させることのできる低拡散性材料の開発を行う。

## ②溶解度

コンクリート等のpH影響物質の存在下における溶解度を測定し、処分環境に対応した熱力学的データを整備する。又、廃棄体中含有物質、あるいはその劣化生成物による地球化学的パラメータ及び核種の溶解度、吸着特性への影響を把握する。

- ・処分場環境条件下での難溶性核種の溶解度測定

測定対象とするべき難溶性核種、化学形により溶解性が大きく異なる元素を摘出し、処分場環境を模擬した条件下において溶解度を測定することにより、平衡定数等の熱力学データを収集する。

- ・pH、Eh等地球化学的条件、共存物質への依存性の解析

処分環境下において溶解度に影響を及ぼすと考えられるpH、Eh、及び $\text{Ca}^{2+}$ 等の共存イオン、錯化剤等の影響についてデータの収集、機構の検討を行う。

- ・地球化学モデルの開発

地球化学的条件による溶解度の変化についてモデル化し、熱力学的データを収集、整備することにより環境条件による溶解度の変化を評価可能なモデルを開発する。

TRU廃棄物の固化媒体、処分場の充填材、構造物等に多量に使用される可能性が大きいコンクリートについて、コンクリートが存在することによって生じるpH、地下水組成等処分場環境の変化について予測、評価する手法を整備する。

- ・化学的緩衝作用の機構に関する検討

処分場間隙水を高pHに保持する機構について検討すると共に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、セメント水和物の溶解に係る平衡定数、エンタルピー変化等の熱力学データの収集を行う。

- ・化学的緩衝作用維持期間評価手法の調査検討

化学的緩衝作用と地下水の移行を連成したモデルにより、処分場間隙水中の pH の時間による変化を評価する。

- ・化学的緩衝作用確証試験

セメント組成及び地下水組成による溶解速度に対する影響等について試験を行い、これらの因子による化学的緩衝作用に対する影響を含め、化学的緩衝作用評価モデルの検証を行う。

- ・コンクリートのナチュラルアナログ

歴史的、考古学的コンクリート及び類似物質の組成変化等について調査を行い、コンクリート劣化モデルの構築、検証に資する。

さらに地球化学的条件に大きな影響を与えると考えられる以下の機構について評価を行う。

- ・金属の腐食による地球化学的条件への影響評価モデルの整備・データ取得

金属の腐食による Eh, pH への影響について評価モデルを整備する。又、腐食試験結果によりモデルの検証を行う。

- ・微生物活動による地球化学的条件への影響評価モデルの整備

2-

微生物の活動による Eh, pH の変化,  $\text{SO}_4$  等の影響物質の生成等、微生物

物の活動による地球化学的条件の変化を評価するモデルを整備し、微生物培養試験結果により検証を行う。

### ③収着特性

充填材、構造物として用いられる可能性のあるベントナイト等粘土物質、コンクリート、破碎岩等の収着特性について測定評価を行う。又、充填材、構造物の化学的吸着機能に影響する因子を抽出し、収着特性試験、モデル化を行う。

- ・充填材、構造物材料の検討、抽出

処分場に設置されることが予想される充填材、構造物構成材料のうち、収着特性を期待すべき材料を抽出する。

- ・処分環境条件下における収着特性の測定、評価

Np, Am, Pu, U, I 等の安全評価上クリティカルとなる核種、又はそ

の親核種について、処分場雰囲気下における分配係数、あるいは表面錯体モデルに必要な表面電荷密度等を測定する。

- ・性能劣化機構と影響因子の調査・検討

Eh, pH, 有機物, 無機錯化剤等収着特性に影響する因子を摘出し、影響評価に係るデータを収集する。

- ・長期吸着性能評価モデルの開発

処分場環境下における各種材料の収着特性を、その影響因子の効果を反映して予測可能な評価モデルを整備し、収着特性試験結果により検証する。

#### ④コロイド生成・移行

人工バリア内における腐食生成物等によるコロイド・錯体の生成の機構を明らかにし、その移行を評価すると共に、ニアフィールド内での核種移行に対する影響評価手法について検討する。

- ・処分場環境下におけるコロイド、錯体の生成、特性把握試験

処分場環境化に存在するコロイド、錯体形成物質を摘出し、コロイドの粒径、安定性、錯体の安定度定数等熱力学データの収集を行うことにより評価モデルのデータ整備、検証を行う。

- ・各種のコロイド、錯体生成に対する地球化学モデルの適用

コロイドへの核種の収着、錯体の形成に係る機構を検討し、pH等の影響を評価可能な地球化学モデルを適用可能とすることにより間隙水中での核種濃度の評価を容易にする。

- ・処分場環境条件下におけるコロイド、錯体移行試験

コロイド、錯体の形成による溶解度、収着特性への影響、大分子量のコロイドが移行する際のフィルトレーション効果等について、Eh, pH等環境因子の影響を把握する。

- ・コロイド、錯体移行予測モデルの開発

コロイド、錯体の地下水による移行について、移流、分散、フィルトレーション等の機構を組み込み、移行試験等より得られたデータによりパラメータの設定、モデルの検証を行う。

- ・コロイド，錯体生成モデルとの連成，検証

コロイド，錯体の生成，放射性核種との相互作用とコロイドに収着あるいは錯化した核種の地層中の移行挙動との連成方法について検討し，コロイド，錯体の影響を総合的に評価可能なモデルを開発する。

#### ⑤ガスの蓄積・移行

処分施設内での気体の発生による内圧上昇（人工バリア等の気体の透過挙動）について検討し，それに伴うバリアの破損の程度とバリア機能への影響を明らかにする。又，処分施設内に流出した気体によって生じる，放射性核種の移行に及ぼす影響について評価を行う。

- ・人工バリアの透気試験

気体を蓄積する可能性のある人工バリア材に対して， $H_2$ ， $CO_2$ ， $CH_4$ に対する透過性を測定する。材料の水による飽和度の影響を明かにし，ガス蓄積評価モデルに必要となる毛管圧等に係るデータを収集する。

- ・ガス蓄積影響因子の確認

バリア材によるガスの吸着，地下水への溶解等，ガスの蓄積に影響する因子を抽出し，データ収集，評価を行う。

- ・内圧上昇によるバリア機能への影響の検討

ガス蓄積量を評価し，昇圧による人工バリア，周辺岩盤への影響を評価する。

- ・ニアフィールド内の気体及び汚染地下水の移行評価手法の検討，モデル化

二相流評価コードを整備することにより，地層中のガス／水の流速，流量を評価する。多孔質媒体，亀裂中の流れについて評価する必要がある。

- ・ガスの蓄積移行による核種移行への影響評価

気体状放射性核種の移行量，及び水中に溶解したイオン状の放射性核種の移行を評価するため，二相流／収着挙動を連成した評価コードの開発を行う。

#### ⑥バリア材の劣化

バリア材と廃棄物の劣化，及び劣化生成物は核種の拡散，収着特性等のバリア性能に大きな影響を及ぼすことから，バリア材等の劣化機構と劣化生成物の評価につ

いてモデル化を行う。

- ・性能劣化機構と影響因子の調査，試験研究

セメントの化学的緩衝作用，セメント／ベントナイトの収着特性，ベントナイトの透水性等に対する  $pH$ ， $Eh$ ，共存イオン等の影響因子を抽出し，劣化の機構について試験，検討を行う。

- ・ナチュラルアナログ研究

各種バリア材について，天然類似現象の調査を行うことにより，劣化機構の検討，劣化モデルの開発，検証に資する。

- ・コンクリートとベントナイトの両立性の評価

セメントに対する  $CO_3^{2-}$ ， $SO_4^{2-}$ ，ベントナイトに対する  $Ca^{2+}$ ， $Mg^{2+}$ 等の共存イオン， $pH$ ，微生物作用による影響を，加速試験による収着特性，透水性等の変化として測定，評価する。

- ・劣化生成物の生成機構に関する調査研究

微生物活動，有機物の化学分解，腐食によるバリア材，廃棄物の劣化生成物，及びその生成機構について調査検討する。

- ・微生物活動モデルの調査，開発

微生物の代謝特性，エネルギー収支，生長率等に係るデータを収集し，エネルギー／栄養源の消費と代謝産物の生成，増殖速度について評価可能なモデルについて調査，検討する。

- ・劣化生成物生成モデルの整備

微生物活動モデル，地球化学モデルによる化学的分解評価，及び腐食モデルによって構成される劣化物生成評価モデルを構築すると共に，各種影響因子に係るデータの収集を行い処分場内における劣化生成物量の評価を行う。

## (ii) ファーフィールド研究

HLWでは考慮されていない I-129，C-14等の核種の挙動，共存物質による影響を中心として以下の項目に対する研究を実施する。

### ① 移流分散

不飽和帯における核種移行評価手法を調査すると共に，確証試験によって，デ

ータを収集し、評価モデルの検証を行う。

## ②収着特性

廃棄物中に含まれる有機物、あるいはそれらの劣化生成物、及び地層中に存在する物質による地層中での収着特性への影響を把握する。

- ・収着性に対する影響物質の調査、抽出

フミン物質等天然有機物、廃棄物及び人工バリアに起因する物質、 $\text{CO}_3^{2-}$ 等錯体形成物質等の影響物質を抽出し、pH、Eh等による影響について調査検討する。

- ・影響物質存在下での収着特性測定試験

I, Cを含む安全評価上クリティカルな元素について、分配係数、イオン交換容量、表面錯体モデルパラメータの測定と、地球化学的条件による影響を把握する。

- ・影響物質の移行に関する試験・評価

pH、有機物等錯化剤、その他共存イオンの移行による、収着特性の変化を評価するため必要データを収集する。

- ・地球化学解析コードへの適用

各種影響物質に関するデータを収集し、地球化学コードへ適用することにより、ファーフールドでの収着性の変化について評価する。

## ③コロイド生成・移行

地層中での核種の収着・遅延機能に影響を及ぼす、廃棄物に含まれる錯化剤、コロイド形成物質等に関し調査、試験を行い、その影響を評価する

- ・地層中核種移行影響物質の生成・特性把握試験

地下水中コロイド、錯化剤について調査し、コロイドの粒径、安定性、錯体安定度定数等の熱力学データを収集する。

- ・地層環境下におけるコロイド、錯体の生成・移行試験

地層環境中におけるコロイド、錯体が核種の収着性、溶解度に及ぼす影響について測定、評価する。

フィルトレーション効果について確認し、必要であれば移行モデルに組込む

ようデータを整備する。

- ・地層環境下におけるコロイド、錯体の生成・移行モデルの整備

コロイド、錯体の生成モデルとこれらの移流、分散、フィルトレーション等による移行モデルとを連成する手法を検討する。

### ③ガスの移行

処分施設内での気体の発生により処分施設内から流出した気体によって、地層中の放射性核種の移行に及ぼす影響について評価を行う。又、昇圧による天然バリアの破損の程度とバリア機能への影響を明らかにする。

- ・岩石の透気試験

我が国の代表的な岩石について、 $H_2$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$ の透過試験を行い、水の飽和度の影響の把握、毛管圧等の評価を行い、ガス／水移行評価、モデルの検証に資する。

- ・気体及び汚染地下水の移行評価モデルの開発

二相流評価モデルを用い、地層中のガス／水の移行を評価可能とする。多孔質媒体、亀裂中の流れについて評価が必要である。

- ・内圧上昇による天然バリア機能への影響評価

ガスのニアフィールド内での蓄積を評価し、圧力の上昇による周辺の岩盤に対する影響を評価する。

- ・ガスの蓄積移行による核種移行への影響評価

ニアフィールドと同様、気体状放射性物質と水中に溶存する放射性核種の移行を評価可能な二相流流体シミュレーションコードに収着モデルを連成する。

### d) 全体システム性能評価手法の確立

T R U廃棄物の特徴を考慮して開発された個別モデルを統合し、高レベル放射性廃棄物の地層処分安全研究の成果を取入れつつ、T R U廃棄物の廃棄体特性及び処分環境に特有な条件に反映し得る長期安全性の評価方法を確立する。

#### ①性能評価手法の設計研究

- ・T R U廃棄物処分に係るシナリオ解析

現象の摘出、分類、選別、相互関連について検討し、インフルエンスダイアグラムを構築し、評価対象シナリオを選定する。

- ・各個別現象モデルの開発評価

地球化学的因子の影響，微生物，金属腐食等の影響の寄与度を評価，比較し，評価上重要なモデルの選定に資する。

- ・確率論的評価手法の検討

データの不確実性等の評価のため確率論的手法を導入し，安全性への影響について評価を行う。

- ・高レベル放射性廃棄物処分安全研究成果の反映方法の検討

取入れるべきモデルの選定，開発スケジュールの整合について検討すると共に，共通的に使用可能なパラメータを抽出する。

- ・総合的性能評価体系，手順の検討

中核モデル，周辺サブモデルによるシステム構成，システム整備手法等について検討する。

## ②総合的性能評価手法の整備

- ・モデルの選定・統合方法の検討

安全性に対する影響の大きい現象，モデルを抽出し，全体システム概念を検討する。

- ・各個別モデルの改良，簡略化

重要なパラメータを絞り込み，評価モデルを簡略化し，効率的な評価システムの構築に備える。

- ・各個別モデルの統合

システム詳細設計に基づき，全体性能評価システムのコーディング，試験を行い，総合的性能評価手法を整備する。

## ③総合性能評価

T R U 廃棄物の特性に対応して人工バリアの材料，構成等を設定することにより，廃棄物（グループ）毎に個別の処分概念の検討を行う。さらに，これをできるだけ少数の合理的処分方法に統合化する可能性を検討し，全体的な処分の最適化を図る。

- ・個別処分にに関する総合性能評価

各廃棄物（グループ）毎の処分に対する安全性の評価を行う。

- ・一括処分にに関する総合性能評価

T R U 廃棄物相互，H L W との統合処分による影響を反映するため，熱，廃棄体構成物質，バリア材料，劣化生成物等考慮した評価を行う。

### Ⅲ. 処分技術開発

#### a) 処分システムの設計研究

##### ①人工バリアシステム

T R U 廃棄物処分システムの具体的概念を構築しその技術的実現性を示すことを目的として，各バリアに要求される機能を発揮させるための各種設計解析手法の開発・適用性の検討，及び評価データの収集を行うと共に，解析結果に基づき処分システム設計仕様の設定を行う。

- ・人工バリアシステム基本概念の作成

- ・人工バリアシステムの設計条件の設定，設計データの整備

熱的安定性の検討，長期構造力学解析，地下水流動に関する評価，ニアフィールド水理，核種移行の解析，人工バリアシステムの設計仕様の設定を行う。

##### ②処分場

T R U 廃棄物処分場について処分形態，レイアウト，空洞形状等の具体的概念を構築し，その経済性を含めた実現性を示すため，各施設，設備，及び地層に要求される機能と処分により予想される影響を確認するための各種設計・評価手法の適用性について検討を行うと共に，処分場仕様の設定を行う。

- ・設計条件，設計データの整備，設計技術の確立

空洞安定性の検討，熱的安定性の検討，地下水流動に関する評価

- ・建設，操業，閉鎖計画，安全性の評価

- ・安定性の検討

- ・経済性の検討

- ・処分場仕様の設定

## b) 技術開発

T R U廃棄物の地層処分システムの概念を構築し、要求される機能を満足させる仕様を設定すること、又、各種バリア、装置を実際に製作する事によりその実現性を確認、明確化すると共に、性能評価に必要となるデータの提供を目的として以下の項目について技術開発を行う。

### ①人工バリア技術

- ・人工バリアの物性試験
- ・人工バリア製作技術の開発

### ②建設・操業・閉鎖技術

- ・現状技術による実現可能性評価
- ・各種要素技術開発
- ・実規模試験による施工技術の実証と最適化

## IV. 地質環境条件の研究（浅い地層）

我が国の浅い地層領域（数 10～数100m）での地質環境条件を明かにし、天然バリアに関するデータを整備する。

### a)地質環境データ

#### ①地下水化学（酸化－還元雰囲気変遷）

浅地層の酸化－還元雰囲気変遷領域における地下水の地球化学データを整備し、データベース化する。

- ・浅地層地下水の地球化学データの取得
- ・核種移行解析関連データの取得

#### ②浅層水理（還流、不飽和水理）

物理的・化学的風化作用により破片化（柔弱化）した岩石は、岩石の構造・組織により破片化が不連続的に進行すると言われており、ここでは地表部や深部の地下環境とは相当異なる水理・地質が存在するものと予想される。地下水の流動をモデル化するためにも、岩盤の透水係数や地下水位、動水勾配等に関するデータが不可欠であるが、これに関するデータも皆無に近く、この領域における水理

のデータを取得，整備する必要がある。

- ・風化層の不飽和水理のデータの取得

### ③岩盤特性（浅地層）

浅い地層での地質は温泉等のボーリングによりデータが集積されていることから，文献調査等で包括的なデータの収集を図るとともに，一部データを取得しながら，データベース化する。

- ・浅地層の岩盤特性のデータベース化

### b)天然事象の長期予測

地層における深度は，浅くなるほど一部の天然事象に対するバリア機能が低下することが考えられる。したがって，天然事象が処分の安全性に及ぼす影響を深度との関係から影響解析すると共に，事象の発生する確率との両面から評価する必要がある。

- ・処分場機能に及ぼす影響の評価
- ・事象の生起確率の評価

以上に示した研究開発内容のうち，ソースターム，ニアフィールドに関連する部分を簡潔にまとめ，開発因子，取得すべき代表的パラメータ，対象核種等を加えたものを表3.2-1に示す。

さらに，TRU廃棄物処分の研究開発課題を高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発体系を参考として分類し，それらの実施内容，開発目標／成果等の概要を追記した体系表を表3.2-2に示した。

今後は表3.2-2と表3.1-1との対応をより明確にすると共に，総合的安全評価手法の開発計画に従って，研究開発項目の区分，相互利用について検討し，個別現象に対する研究開発状況の進展も踏まえ，より詳細，具体的，実地的な研究開発計画を検討，作成する必要がある。

表 3.2-1 TRU 廃棄物の地層処分に関する研究開発課題（ソースターム／ニアフィールド）

( 1 / 3 )

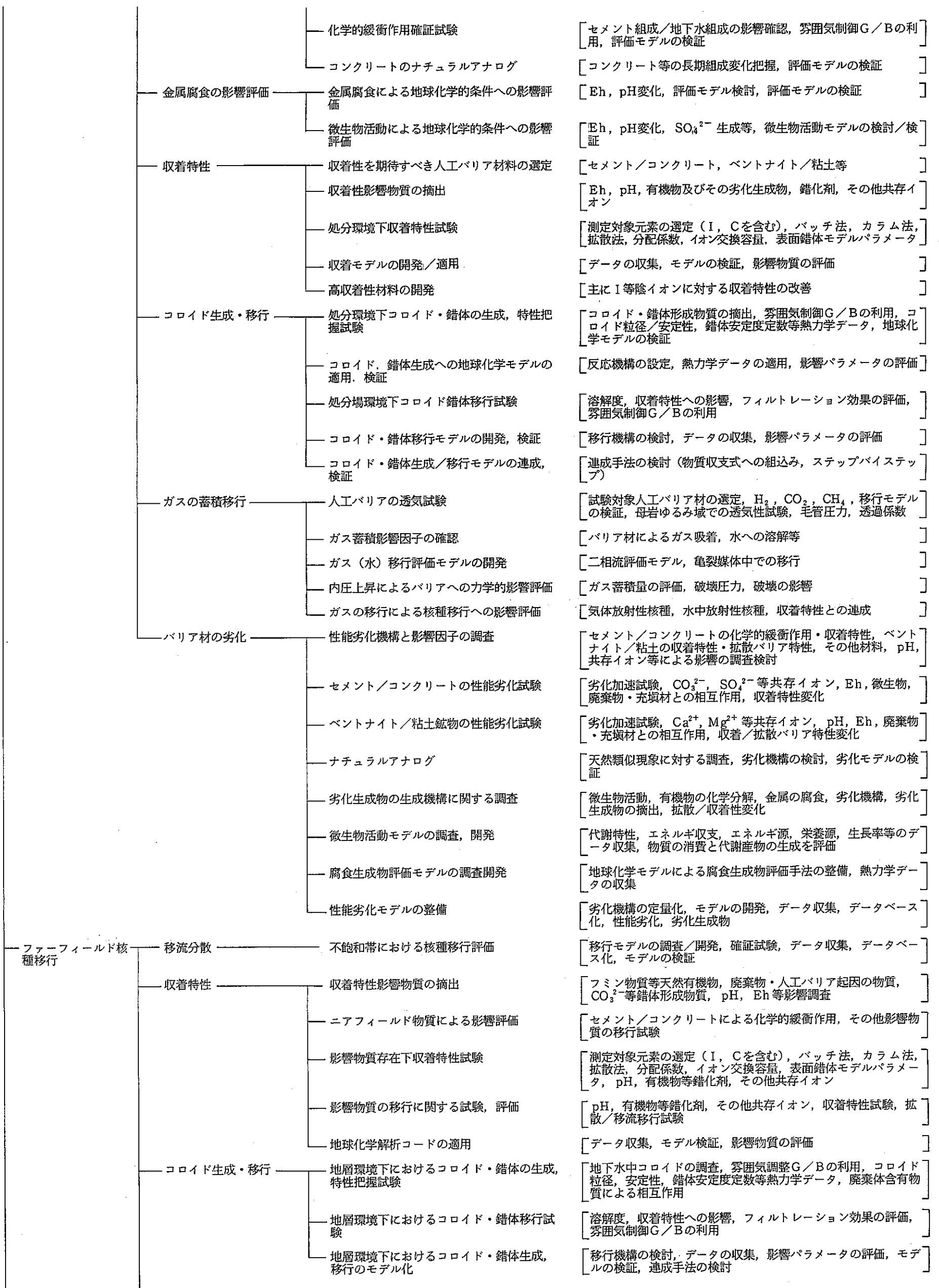
| 研 究 開 発 項 目                                                                                                                                  | 研 究 開 発 内 容 ・ 目 標                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. ソースターム研究<br>(1) 廃棄体特性評価<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>(2) 廃棄体技術開発<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>2. 性能評価研究<br>(1) シナリオ研究 | <div data-bbox="555 362 853 396">① 核種インベントリ</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分の安全評価上クリティカルな核種の抽出<br/>(U-233, 234, 235, 236, 238, Pu-239, 240, 241, Am-241, Np-237, Se-79, Zr-93, Tc-99, I-129, Cs-135, etc.)</li> <li>・サンプリング方法, 試料調整技術, 特性測定技術の設定</li> <li>・非破壊測定技術の開発</li> <li>・核種濃度評価システムの整備 (品質保証体系), データベース化</li> </ul> <div data-bbox="555 592 770 624">② 物理的特性</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵, 輸送, 処分, 各段階で必要となる廃棄体特性因子の抽出<br/>(形状, 寸法, 重量, 密度, 間隙率, 拡散係数, 機械的強度, 熱的特性, 線量率, etc.)</li> <li>・サンプリング方法, 試料調整技術, 特性測定技術の設定</li> <li>・物理的特性評価システムの整備 (品質保証体系), データベース化</li> </ul> <div data-bbox="555 785 770 816">③ 化学的特性</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>・廃棄体構成物質の調査, サンプリング方式, 測定技術の設定</li> <li>・長期的性能影響物質の抽出<br/>(金属, セルロース, 錯化剤, <math>\text{NO}_3^-</math>, <math>\text{NO}_2^-</math>, <math>\text{CO}_3^{2-}</math>, <math>\text{SO}_4^{2-}</math>, etc.)<br/>(pH, Eh, 収着性, 溶解度, 微生物活動, 腐食, コロイド形成, ガス発生)</li> </ul> <div data-bbox="555 992 831 1023">① 廃棄体製造技術</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>・貯蔵, 輸送, 処分, 各段階で必要となる廃棄体特性因子の抽出<br/>処分; 浸出/核種保持特性, 均質性, 有機物, 金属形態, 核種化学形</li> <li>・各廃棄物処理技術開発</li> </ul> <div data-bbox="555 1110 804 1141">② 品質保証技術</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>・品質保証体系の検討整備<br/>品質管理因子抽出, 各特性/因子の測定評価手法標準化, 検査/確認体制の整備, 維持</li> </ul> <div data-bbox="936 1298 1868 1361"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・深度等による地球化学的条件の変化と考慮すべきシナリオとの対応</li> <li>・放射性核種の直接放出シナリオと処分深度との関係</li> </ul> </div> |

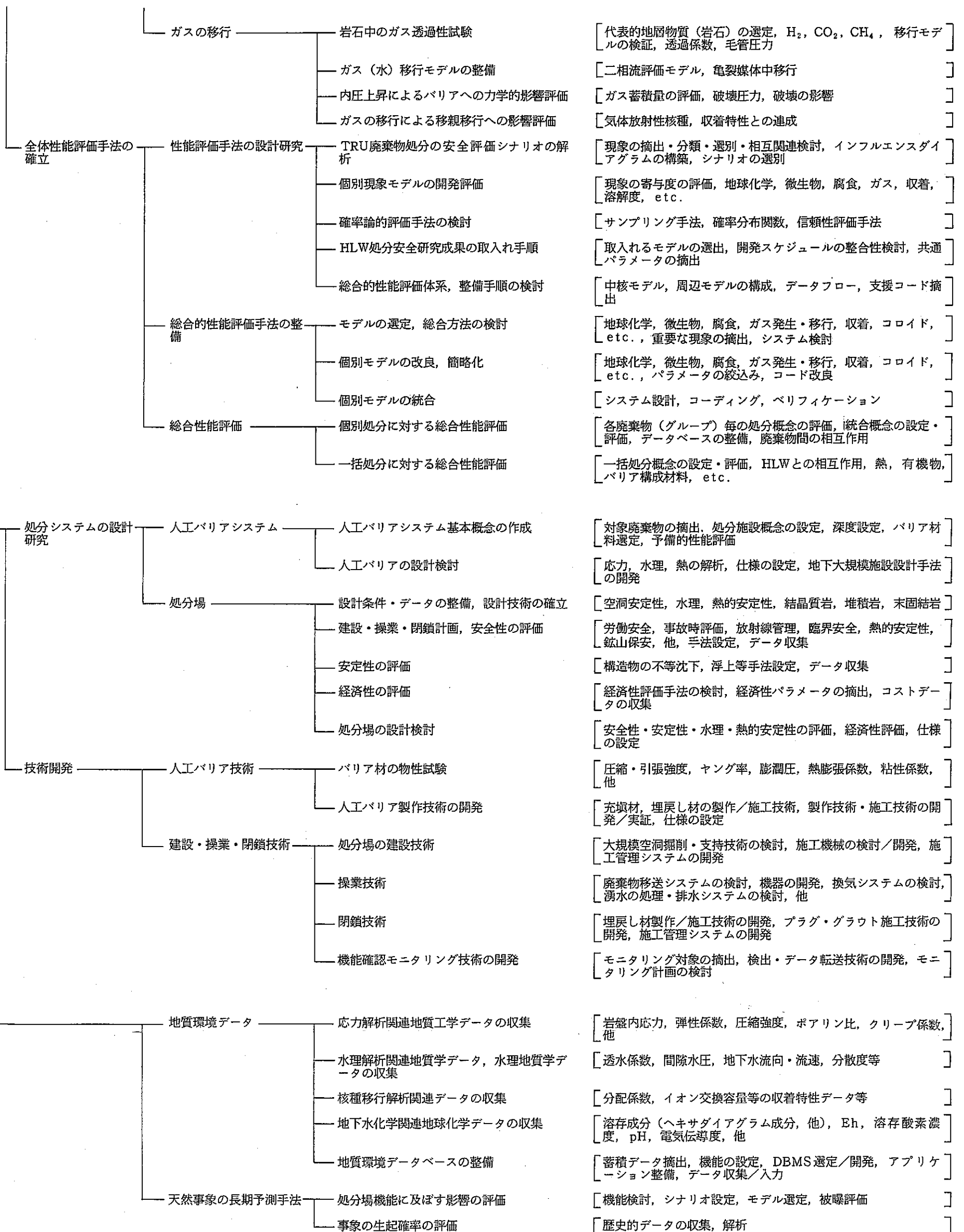
| 研究開発項目                                   | 研究開発内容・目標                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (2) ニアフィールド<br>核種移行<br>i) 固化体からの<br>核種放出 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・測定対象物質の選定（均質，不均質）<br/>（放射性核種，有機物，無機塩類）</li> <li>・処分場環境条件下での浸出特性試験（浸出率，拡散係数，分配係数 or 表面錯体モデルパラメータ）<br/>（高 pH，低 Eh，セメント，ベントナイト，有機物，無機塩類，etc.）</li> <li>・廃棄体の劣化特性の把握，ナチュラアナログ研究</li> <li>・長期浸出モデルの開発（均質，不均質）</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>② ガス発生           <ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス発生機構の調査（金属腐食，微生物活動，放射線分解）</li> <li>・処分場環境条件下でのガス発生試験<br/>（pH，Eh，温度，圧力，セメント，ベントナイト，有機物，無機塩類，etc.）</li> <li>金属腐食；腐食速度／機構，自由エネルギー変化，Redox 電位等，熱力学データの収集</li> <li>微生物活動；微生物活動モデルの開発，速度論的データ等の収集</li> <li>・長期ガス発生モデルの開発</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| ii) 人工バリア中の<br>核種移行                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>① 拡散・移行           <ul style="list-style-type: none"> <li>・人工バリア材料の透水性試験</li> <li>・移行試験対象物，元素の選定（ベントナイト，コンクリート，etc., Se, Zr, Tc, I, Cs, U, Pu, Am, Np, etc.）</li> <li>・人工バリア材料の処分場環境条件下における拡散試験（拡散係数）</li> </ul> </li> <li>② 溶解度           <ul style="list-style-type: none"> <li>・溶解度測定対象元素（化学形，原子価）の設定</li> <li>・処分場環境条件下での溶解度測定試験<br/>（pH，Eh，Ca<sup>2+</sup>，Mg<sup>2+</sup>等共存イオン，錯化剤 etc.）</li> <li>・溶解度影響因子の把握，エンタルピー・エントロピー・自由エネルギー変化／溶解度積等熱力学データの収集，地球化学モデルの検証</li> </ul> </li> <li>③ 収着特性           <ul style="list-style-type: none"> <li>・収着特性試験対象物，元素の選定（ベントナイト，コンクリート，etc., Se, Zr, Tc, I, Cs, U, Pu, Am, Np, etc.）</li> <li>・人工バリア材料の処分場環境条件下における収着特性試験<br/>分配係数，イオン交換容量（表面錯体モデルパラメータ；電気二重（三重）層容量，表面電荷密度，etc.）</li> </ul> </li> </ul> |

| 研 究 開 発 項 目                                           | 研 究 開 発 内 容 ・ 目 標                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>④ コロイド生成・移行</p> <p>⑤ ガスの蓄積・移行</p> <p>⑥ バリア材の劣化</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分場環境下に存在するコロイド、錯体、及びその生成機構の調査<br/>(コロイド、錯体種類、コロイド粒径・安定性、コロイドへの核種収着<br/>錯体安定度定数、Redox 電位等熱力学的データ)</li> <li>・地球化学モデルへの適用、検証<br/>溶解度、収着特性への影響 (pH, Eh, 共存イオン, etc.)</li> <li>・コロイド／錯体の移行機構の検討 (収着, ろ過, 表面電荷等の効果)</li> <li>・コロイド／錯体の生成・移行連成モデルの開発</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>・人工バリア材、岩盤ゆるみ域の透気性試験</li> <li>・人工バリア材等による発生ガス吸着特性試験／モデル化</li> <li>・処分場環境下における発生ガスの溶存特性試験</li> <li>・二相流移行モデルによるガス／水移行の評価、検証</li> <li>・毛管圧力、相対透過係数の測定、評価</li> <li>・亀裂媒体中のガス、水移行モデルの開発</li> <li>・ガス蓄積／バリア機能影響評価手法の検討 (圧力上昇、構造的破壊、<br/>バリアパラメータ変化)</li> </ul> <p>・性能劣化機構と影響因子の調査</p> <p><u>化学変化</u></p> <p>セメント；<math>\text{Ca}^{2+}</math>、<math>\text{SiO}_2</math> 溶出モデルの検討、溶解度積、エンタルピー<br/>変化等熱力学的データの収集<br/>室内試験、ナチュラルアナログによる検証<br/>地下水環境条件への影響 (化学的緩衝作用)、収着性等セメ<br/>ント特性の変化の評価</p> <p>アスファルト；加速試験、ナチュラルアナログによる劣化生成物の生成、<br/>浸出特性に対する影響の評価</p> <p>ベントナイト；セメント共存下におけるイオン交換による特性影響試験<br/>(収着性、透水性、拡散特性)</p> <p><u>微生物活動</u></p> <p>微生物活動モデルの整備、室内・原位置試験によるデータ取得、検証<br/>(微生物代謝特性、エネルギー収支、生長率)<br/>(エネルギー源、栄養素、pH、温度、その他雰囲気による影響)<br/>(劣化生成物の同定と特性評価；ガス種類、錯体安定度定数, etc.)</p> |

表 3.2-2 T R U 廃棄物処分研究開発課題

|             |             |                       |                |                                                                                                                        |
|-------------|-------------|-----------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. ソースターム研究 | 廃棄体特性調査     | 核種インベントリ              | 測定対象核種の抽出      | [核種組成の設定, 長期毒性算定, 潜在影響度評価]                                                                                             |
|             |             |                       | 分析・測定方法の検討     | [サンプリング方法, 試料調整方法, 測定技術・装置選定]                                                                                          |
|             |             |                       | 非破壊測定システムの開発   | [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]                                                                      |
|             |             |                       | 核種濃度確認手法の検討    | [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]                                                                                          |
|             |             |                       | 分析・測定, データ解析   | [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 | [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]                                                                                  |
|             |             |                       | 特性評価手法の検討      | [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, データ解析      | [測定, データベース化]                                                                                                          |
|             |             | 化学的特性                 | 廃棄体構成物質の検査検討   | [サンプリング方法, 測定技術, その他評価方法]                                                                                              |
|             |             |                       | 長期性能影響物質の抽出    | [溶解度/収着性への影響物質の選定]                                                                                                     |
|             |             |                       | 分析・測定方法の検討     | [金属, セルロース, プラスチック類, 錯化剤, $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_2^-$ , $\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , 他, 雰囲気制御G/B利用] |
|             |             |                       | 分析・測定, データ解析   | [測定, データベース化]                                                                                                          |
|             |             |                       | 化学形分析対象核種選定    | [溶解度調査, 化学形による溶解度変化]                                                                                                   |
|             |             |                       | 分析測定方法の検討      | [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]                                                                                       |
|             |             |                       | 分析・測定, データ解析   | [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      |                       | 人間侵入シナリオの影響    | [FEP <sub>2</sub> の抽出・選定・組合せ, 評価モデル, 条件の設定]                                                                            |
|             |             |                       | 浅地層処分に対するシナリオ  | [FEP <sub>2</sub> の抽出・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]                                                                |
|             |             |                       | データ収集          | [生起確率, モデルパラメータ, データベース化]                                                                                              |
|             | ニアフィールド移種移行 | i) 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                                                                                                         |
|             |             |                       | 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                                                                                                            |
|             |             | ii) 人工バリア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                                                                                                               |
|             |             |                       | 溶解度            | 処分環境下溶解度試験                                                                                                             |
|             |             |                       |                | 溶解度影響物質の抽出                                                                                                             |
|             |             |                       |                | 地球化学モデルの開発, 検証                                                                                                         |
|             |             |                       | 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                                                                                                         |
|             |             |                       |                | 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/ベントナイト成分, 有機物, 有機塩類, pH/Eh変化                                                                                      |
|             |             |                       |                | 浸出率, 拡散, 腐食溶解, 溶解度限度, 他                                                                                                |
|             |             |                       |                | 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)                                                                   |
|             |             |                       |                | 天然類似現象の抽出, データ収集, モデル検証                                                                                                |
|             |             |                       |                | 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 濃度等の影響), 放射線分解(吸収線量, G値)     |
|             |             |                       |                | 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                                                                                     |
|             |             |                       |                | 反応の抑制, ガスの消費/吸着等                                                                                                       |
|             |             |                       |                | 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, 雰囲気制御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                                                                                                     |
|             |             |                       |                | 測定対象元素・化学形の選定, 雰囲気制御G/Bの利用, 熱力学データの収集                                                                                  |
|             |             |                       |                | Eh, pH, Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> 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                                                                                              |
|             |             |                       |                | 高pH維持機構の検討, Ca(OH) <sub>2</sub> 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, pH <sub>vs</sub> 時間の評価                                                                    |





## 参 考 文 献

## 参考文献

### 1.1

- 1)原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会, “T R U核種を含む放射性廃棄物の処理処分について”(1991)
- 2)東洋エンジニアリング㈱ “T R U廃棄物の処分に関する調査研究”,  
PNC ZJ4277 90-001(1990)
- 3)東洋エンジニアリング㈱ “T R U廃棄物の処分に関する調査研究(11)”,  
PNC ZJ4277 91-001(1991)
- 4)U. S. Nuclear Regulatory Commission, 10CFR60 “Disposal of High-Level  
Radioactive Waste in Geologic Repositories”, Federal Register, 46, 13980(1981)
- 5)Groupe de Travail Preside par le Professeur Goguel, “Stockage des Dechets  
Radioactifs en Formation Geologiques”(1987)

### 1.2

- 1)U. S. Department of Energy, “Final Supplement Environmental Impact  
Statement”, DOE/EIS-0026-FS(1990)
- 2)Lappin A. R., et al., “Systems Analysis, Long-Term Radionuclide Transport and  
Dose Assessments. Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), Southeastern New Mexico”  
SAND 89-0462-UC-70(1989)
- 3)Andersson. J., “The Joint SKI/SKB Scenarto Dvelopment Project” SKB TR 89-35  
(1989)
- 4)U. S. Environmental Protection Agency, 40CFR191 “Environmental Standards for  
the Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level and Transuranic  
Radioactive Wastes” Federal Register, 50(182), 38084(1985)
- 5)U. S. Nuclear Regulatory Commission, 10CFR60 “Disposal of High-Level  
Radioactive Waste in Geologic Repositories”, Federal Register, 46,  
13980 (1981)

- 6) Davis P.A., et.al., "Components of an Overall Performance Assessment Methodology", NUREG/CR-5256 (1990)
- 7) OECD/NEA, "Disposal of Radioactive Waste : Review of Safety Assessment Methods", OECD/NEA Paris (1991)
- 8) OECD/NEA, "Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories Systematic Approaches to Scenario Development", OECD/NEA Paris (1992)
- 9) 動力炉・核燃料開発事業団, "地層処分研究開発の現状(平成元年度)", PNC TN1410 91-009. (1991)

## 2.1

- 1) (財)原子力環境整備センター, 土壌と土壌溶液間の放射性核種の分配係数, 環境パラメータシリーズ2 (1990)
- 2) 田 中 知, 第6回放射性廃棄物セミナー資料集, 八幡平, (1990)
- 3) 田 中 忠 夫, "臨界砂質地層における放射性核種の分配係数に及ぼす地下水中イオン組成の影響" 日本原子力学会誌, Vol 33, No4, pp378-380 (1991)
- 4) 菅 野 卓 治, 放射性廃棄物管理専門研究会資料, 京大, 平成3年12月
- 5) 小 西 正 郎 ら, 日本原子力学会春季大会講演要旨集, (1991)
- 6) 石 黒 勝 彦, 第7回放射性廃棄物セミナー資料集, (1991)
- 7) Colasanti, R., "Microbiology and Radioactive Waste Disposal Review of the Nirex Research Programme January 1989", Harwell Lab., Rep. (1990)
- 8) Ewart, F.T. et al., "Chemical and Microbiological Effects in the Near Field: Current Status, 1989", Harwell Lab., UKAEA, NSS/G111. (1990)
- 9) Clayton, P.R., et al., Harwell Lab., Rep. Sep (1983)

- 10) Pigford, T., et al., "A Study of the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Waste" (1983)
- 11) 田中忠夫ら, "TRU核種の移行評価を目的とした分配係数の実験的取得手法" 日本原子力研究所, JAERI-M, 91-118 (1991)
- 12) Stephen, W., et al., "Phasic Pressure Difference Effect, In Two-Phase Flow for Dissolved Gas Exsolution, US DOE No. DE-Ac 04-76-DP00789 (1990)
- 13) 畠山信夫ら, "大深度エアリフトポンプの揚水特性に関する数値シミュレーション", 資源・素材学会誌, 105, No. 14, pp1051-1057 (1989)
- 14) Wiborgh, M., et al., "Gas Formation in a L/ILW Repository and Gas Transport in the Host Rock", Tech., Rep., NTB 85-17, Sweden (1986)
- 15) 東洋エンジニアリング㈱, "TRU 廃棄物の処分に関する調査研究", PNC ZJ4277 90-001 (1990)
- 16) 東洋エンジニアリング㈱, "TRU 廃棄物の処分に関する調査研究(Ⅱ)", PNC ZJ4277 91-001 (1991)

## 2.2.1

- 1) Mac Donald, C.A., "Gas Production from the Biodegradation of Organic Components of Low-Level Radioactive Waste", Proceedings of the 1989 Joint International Waste Management Conference, Vol. 1, pp301-309 (1989)
- 2) Wiborgh, M., et al., "Radionuclide Release from the Nea Field in SFR", Prog. Rep., SFR 87-10, Sweden, (1986)
- 3) Vieno, T., et al., "Gas Generation and Release from the VLJ Repository", NEA Workshop, Sep., (1991)
- 4) Colasanti, R., "Microbiology and Radioactive Waste Disposal-Review of the Nirex Research Programme-January 1989", Harwell Lab. Rep. (1990)
- 5) Rees, J.H., "Gas Evolution and Migration in Repositories :Current Status, May, 1989, Harwell Lab. (1990)

- 6) Mendenhall, F.T. et al., "Investigation into the Coupled Fluid Flow and Mechanical Creep Closure Behavior of Waste Disposal Rooms in Bedded Salt", NEA Workshop (1991)
- 7) CECILLE, L., "Radioactive Waste Management and Disposal", Proceedings of the Third European Community Conference on Radioactive waste Management and Disposal, Luxembourg, pp343-349, (1990)
- 8) Freiser, H., et al., "イオン平衡", 藤永・関戸訳, 化学同人 (1967)
- 9) 国立天文台編, "理科年表机上版" (1992)
- 10) 福田理, "共水性ガス", 地質ニュース, 地質調査所報告, 第294 (1979)
- 11) Lever, D.A., "Gas Generation and Migration in Waste Repositories", Proceeding of an NEA Workshop, pp115-127 (1988)
- 12) Tomlinson, M.J., "Migration of Gases through Argillaceous Rocks-A Literature Review", Dept. of Geo. logy, University of Exeter, UK, Nov. (1988)
- 13) Aylmore, L.A., "Gas Sorption in Clay Mineral Systems", Clays and Clay Minerals, Vol.22, pp175-183 (1974)
- 14) Gratton, L.C., et al, J. of Geol., 43, 783 (1935)
- 15) Tomas, J., et al, "Internal Surface Area and Porosity in Eastern Gas Shales from Sorption of Nitrogen, Oxygen and Methane-A Status Report", In Proceedings of 1st Eastern Gas Shales Symposium, pp 589-595, US DOE (1978)
- 16) ウランゲン, 吉沢訳, "金属の腐食防食序論", 化学同人 (1970)
- 17) ユーリック, H.H., 岡本訳, "腐食反応とその制御 (第2版)", 産業図書 (1975)
- 18) Agg, P.J., et. al., "Modelling of Gas Generation in Radioactive Waste Repositories", NEA Workshop (1991)

- 19) Pruess, K, "TOUGH User's Guide", NEA Data Bank Nesc No.1098 (1987)
- 20) Puuess., K, "Numerical Modeling of Gas Migration at a Potential Repository for Low and Intermediate Level Nuclear Wastes at Oberbauenstock, Switzerland", NTB, 89-28, 30p (1989)
- 21) Rees, J.H., "Gas Evolution and Migration in Repositories : Current Status", Safety Studies, Harwell lab., UKAEA, (1989)
- 22) SKB Technical Report, "Gas and water transport from the WP-Cave Repository", No.89-07, Part II (1989)
- 23) 慶伊富長, "吸着", 共立全書 (1965)

#### 2.2.2

- 1) Sullivan, T.M. et al, "Low-Level Waste Shallow Land Burial Source Term Container Breach and Waste Form Leaching Model Development", Waste Management '90, Vol.2 (1990)
- 2) Yui, K., et al, "Leaching Rate from Pellet Package", Waste Management '90, Vol.2 (1990)
- 3) 電中研報告 : 385015, "低レベル廃棄物陸地処分施設からの放射性核種漏出量算定手法の開発" 昭和60年9月 (1985)

#### 2.2.3

- 1) Bachofen R., "Microorganisms in Nuclear Waste Disposal", Experientia, 46, 777 (1990)
- 2) McCabe A., "The Potential Significance of Microbial Activity in Radioactive Waste Disposal", *ibid.*, 46, 779 (1990)
- 3) Mckinley I.G., et al., "Consideration of Microbiology in Modelling the Near Field of a L/ILW Repository", *ibid.*, 47, 573 (1991)
- 4) Colasanti R., et al., "Microbiology and Radioactive Waste Disposal ; Review of the NIREX Research Programme - January 1989", NSS/R131 (1990)

- 5) Hundeshagen F., "Behaviour of Asphalt, Bitumen and Coaltar Pitch Toward Microorganisms" , Bautenschutz, 6, 141 (1935)
  - 6) Wolf M., et al., "Microbial Degradation of Bitumen" , Experientia, 47, 542 (1991)
  - 7) Ait N., et al., "Microbial Degradation of Bitumen Used for the Conditioning of Low and Medium Level Radioactive Waste in Testing, Evaluation and shallow Land Burial of Low and Medium Radioactive Waste Forms" , Harwood Academic Punlishers (1984)
  - 8) Ait N., et al., "Microbial Degradation of Bitumen" , Experientia, 47, 533 (1991)
  - 9) Hellmuth K-H., "Natural Analogues of Bitumen and Bitumenized Radioactive Waste" , STUK-B-VALO 58 (1989)
  - 10) Grogan H.A., et al., "An Approach to Microbiological Modelling : Application to the Near Field of a Swiss Low/Intermediate-Level Waste Repository", NTB 89-06 (1990)
  - 11) Arter H.E., et al., "Modelling of Microbial Degradation Processes : The Behaviour of Microorgahisms in a Waste Repository" , Experientia, 47, 578 (1991)
  - 12) Colasanti R., et al., "The Microbiology Programme for UK Nirex" , Expeientia, 47, 560 (1991)
  - 13) Bachofen R., "Microorgnisms in Nuclear Waste Disposal. Conclusions" , ibid., 47, 583 (1991)
- 2.2.4
- 1) Paxéus N., et al., "Humic Substances in Ground Waters" , Scientific Basis for Nuclear Waste Management, IX, 525 (1986)
  - 2) Ewart F.T., "Chemical and Microbiological Effects in the Near Field : Current Status 1989" , NSS/G111 (1989)

- 3) McCade A., "The Potential Significance of Microbial Activity in Radioactive Waste Disposal", *Experientia*, 46, 779 (1990)
  - 4) Colasanti R., et al., "Microbiology and Radioactive Waste Disposal ; Review of the Nirex Research Programme - January 1989", NSS/R131 (1990)
  - 5) Berry J.A., et al., "Studies of the Effects of Organic Materials on the Sorption of Uranium and Plutonium", NSS/R183 (1989)
  - 6) Baston G.M.M., et al., "Studies of the Effects of Organic Materials on the Sorption of tin and Radium", NSS/R224 (1990)
  - 7) Keilng Ch., et al., "Investigations into the Influence of Organic Complexing Agents on the Leaching Behaviour and Mobility of Radionuclides in ILW Forms", *Radiochimica Acta*, 52/53, 287 (1991)
  - 8) Vejmelka P., et al., "Leach Studies of Chelating Agents and Influence on Radionuclide Leaching from Simulated LLW/ILW Cement Waste Forms", *Waste Management '90*, 2, 49 (1990)
- 3.1
- 1) U.S. Department of Energy, "Final Supplement Environmental Impact Statement", DOE/EIS-0026-FS, 2 (1990)
  - 2) Lewi J., et al., "Evaluation des Performances des Depots pour L'Isolation des Dechets de Moyenne Activite et Alpha Enfouis dans Les Formations Geologiques Granitiques", EUR 12993 Fr (1990)
  - 3) Nirex, "Deep Repository Project Preliminary Environmental & Radiological Assessment and Preliminary Safety Report", Nirex Repot No.71 (1989)
  - 4) Lappin A.R., et al., "Systems Analysis, Long-Term Radionuclide Transport and Dose Assessments, Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), Southeastern New Mexico", SAND 89-0462 · UC-70 (1989)
  - 5) Tamura T., et al., "Stability and Chemical Form of Iodine Sorbed on Silver-Exchanged Zeolite X", *J. of Nuc. Science and Technology*, 21 (11), 862 (1984)

- 6) Guzowski R.V., "Preliminary Identification of Scenarios for The Waste Isolation Pilot Plant, Southeastern New Mexico", SAND 90-7090 (1990)
- 7) Broderson K., et al., "Chemical and Thermal Stability of Waste Products", EUR 13389, 242 (1991)
- 8) Cooper M.J., "The NIREX Safety Assessment Research Programme : Annual Report for 1987 / 88", NSS/R133 (1988)
- 9) Lovera P., et al., " $\alpha$  and Long - Lived  $\beta \gamma$  Waste Source Term, A First Generation Model for a Cemented Waste Repository", Proceedings of an NEA Workshop, 173 (1988)
- 10) Wolf M. "Mikrobieller Abbau von Bitumen", NTB 89-14 (1989)
- 11) Nilsson A.C., et al., "On The Swelling of Ion Exchange Resins Used in Swedish Nuclear Power Plants", SKI (1988)
- 12) Hellmuth K-H., "Natural Analogues of Bituminized Radioactive Waste", STUK-3-VAL058 (1989)
- 13) Rees J.H., et al., "Gas Evolution and Migration in Repositories-Current Status", NSS/G104 (1988)
- 14) Wiborgh M., et al., "Gas Formation in a L/ILW Repository and Gas Transport in The Host Rock", NTB 85-17 (1986)
- 15) Nirex, "The Nirex Safety Assessment Research Programme : Annual Report for 1988/89", NSS/R168 (1989)
- 16) SKB, "Progress Report SFR 87-10 Radionuclide Release from The Near Field in SFR" (1987)
- 17) NAGRA, "Projekt Gewähr 85", NGB 85-08 (1985)
- 18) Kowalski E., et al., "Swiss Projects for Radioactive Waste Disposal Move into a New Phase", Waste Management '89, 1, 73 (1989)

- 19) Atkinson A., et al., "Engineered Barriers : Current Status", NSS/G102 (1988)
- 20) Berner U., et al., "The Near-Field Chemistry of a Swiss L/ILW Repository", Proceedings of an NEA Workshop, 197 (1988)
- 21) Zuidema P., et al., "Impact of Production and Release of Gas in a L/ILW Repository A Summary of The Work Performed within The NEA Programme", Proceedings of an NEA Workshop, 97 (1988)
- 22) Rees J.H., "An Overview of Research on Gas Evolution and Migration Relevant to The Disposdal of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes in Clay and Fractured Hard Rocks", Preprint of NEA Workshop on Gas Generation and Release from Radioactive Waste Repositories (1991)
- 23) Davies P.B., et al., "Assessing The Impact of Waste-Generated Gas from The Degradation of Transuranic Waste At The Waste Isolation Pilot Plant : An Overview of Strongly Coupled Chemical, Hydorologic, and Structural Processes", *ibid.* (1991)
- 24) Mishra s., et al., "Modelling Gas Migration from a Low/Intermediate Level Nuclear Waste Repository", *ibid.* (1991)
- 25) Francois O., et al., "Gas Evolution Modellling in an Intermediate Level Nuclear Waste Repository and Consequences for Safety", *ibid.* (1991)
- 26) Kroth K., et al., "Consequences of Gas Formation on Borehole Disposal of ILW Packages", *ibid.* (1991)
- 27) Finsterle S., et al., "Hydrogeologic Site Characterization under Two-Phase Flow Conditions", *ibid.* (1991)
- 28) Carlsson J., et al., "Formuration and Evaluation of Gas Release Scenarios for The Silo in SFR", *ibid.* (1991)
- 29) Resele G., et al., "Modelling of Gas Release from a Nuclear Waste Repository", *ibid.* (1991)
- 30) Volckaert G., "MEGAS : Modelling and Experiments on Gas Migration in Argillaceous Host Rock", *ibid.* (1991)

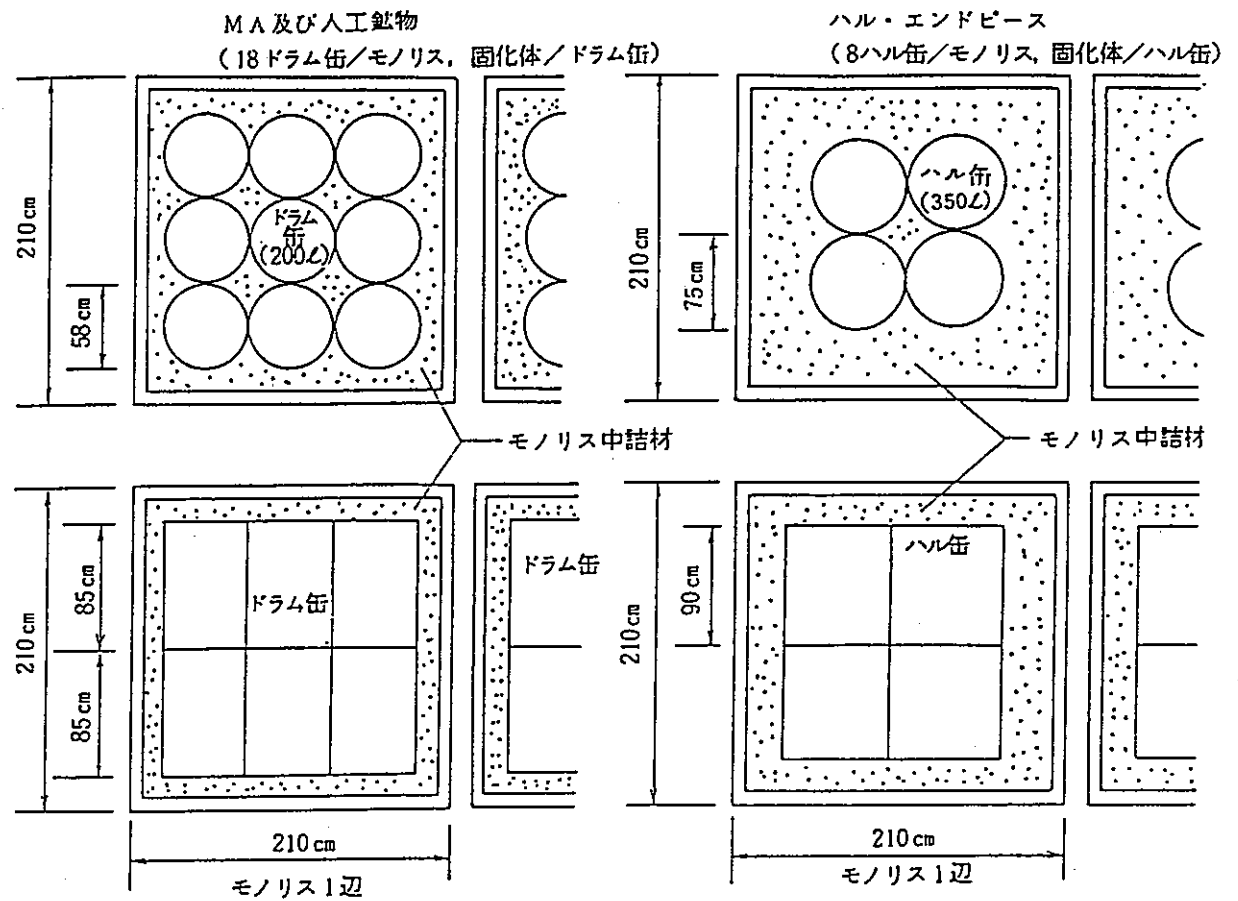
- 31) Neretnieks I., et al., "Gas Production in The SFR Repository and its Possible Consequences for Contaminant Release", Proceedings of an NEA Workshop, 85 (1988)
- 32) Vieno T., et al., "Gas Generation and Release from The VLJ Repository", Preprint of NEA Workshop on Gas Generation and Release from Radioactive Waste Repositories (1991)
- 33) Zuidema P., et al., "Gas Formation and Release in Repositories for Low-and-Intermediate-Level Wastes : An Issue of Potentially Decisive Importance" International Symposium on the Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories (1989)
- 34) Holmes G.G.R., et al., "The Generation And Evolution of Gas from a Low Level Radioactive Waste Repoditory", Preprint of NEA Workshop on Gas Generation and Release from Radioactive Waste Repositories (1991)
- 35) SKI, "Review of Final Repository for Reactor Waste SFR-1", Technical Report SKI 88 : 5 (1988)
- 36) Berner U., "A Thermodynamic Description of The Evolution of Pore Water Chemistry and Uranium Speciation during The Degradation of Cement", NTB 88- 12 (1990)
- 37) Webb S.W., " Sensitivity Study for Gas Release from The Waste Isolation Pilot Plant", Preprint of NEA Workshop on Gas Generation and Release from Radioactive Waste Repositories (1991)
- 38) Muller W., et al., "Gas Formation in Low Level Waste", ibid. (1991)
- 39) Mobbs S.F. ,et al., "Pacoma : Performance Assessment of The Confinement of Medium-Active and Alpha Bearing Waste", EUR 13143 EN (1991)
- 40) 東洋エンジニアリング(株), "TRU 廃棄物の処分に関する調査研究", PNC ZJ4277 90-001 (1990)
- 41) 東洋エンジニアリング(株), "TRU 廃棄物の処分に関する調査研究 (II)", PNC ZJ4277 91-001 (1991)

- 42) Prij J., et al., "Safety Evaluation of Geologic Disposal Concepts for Low and Medium-level Wastes in Rock-Salt (Pacoma Project)", EUR 13178 EN (1991)
- 43) Niephaus D., et al., "Final Disposal of Dissolver Sludges, Claddings, Fuel Hardware and Spent HTGR Fuel Elements in The Federal Republic of Germany", Proceedings of The 1989 Joint International Waste Management Conference, 2, 519 (1989)

## 添 付 資 料

添付資料－1

平成元年度，２年度「TRU廃棄物の処分に関する調査研究」及び本研究において設定した廃棄体定置概念，処分施設概念



図－1 ドラム缶とモノリス

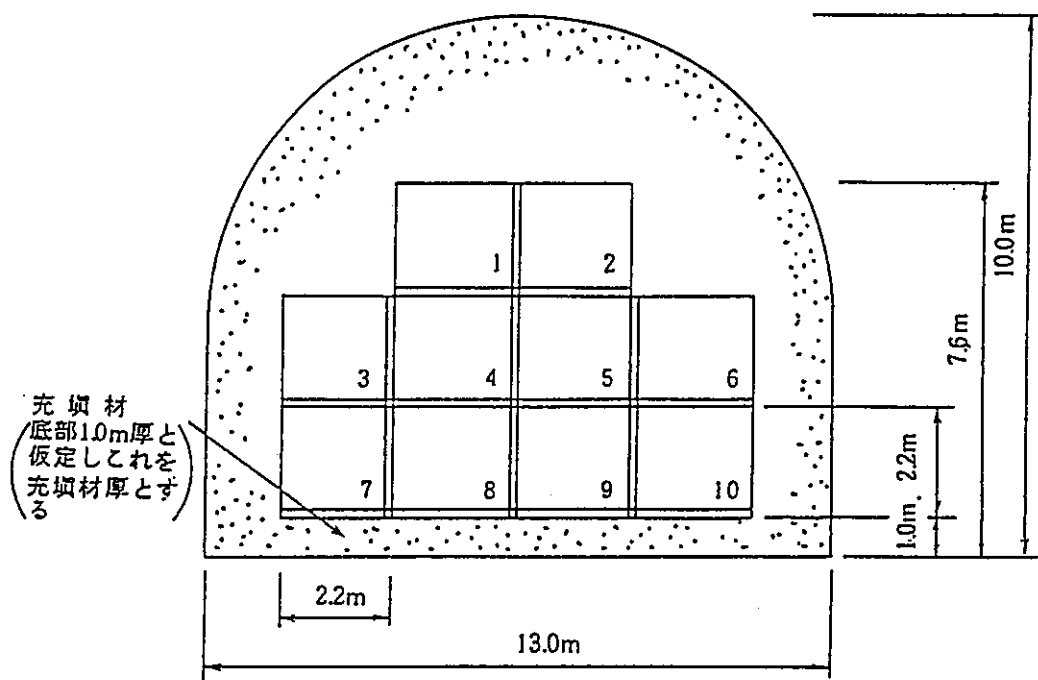


図1-2 モリノスと処分ユニット (10モリノス／断面)

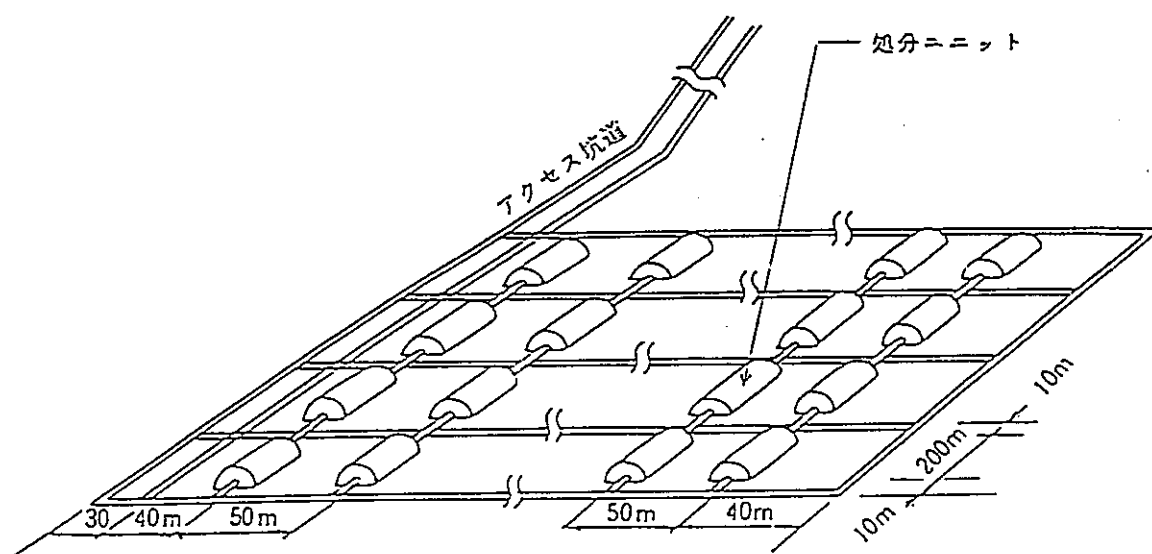


図-3 処分場レイアウト

## PAGIS-Clayによる解析法

PAGIS-Clayによる感度解析の要点を以下に示す。

- ・標準ケースとしてPAGIS-Clayの“ノーマル・シナリオ”井戸水飲用ケースを対象とした。
- ・対象核種はNp-237のみとしている。
- ・一種のパラメータについて基準ケースで様いられたちから変化させ、ファーフールドから放出される核種濃度（ $\propto$ フラックス，被曝線量）を試算。
- ・評価指標は偏導関数法によってファーフールドでの最大濃度（ $\propto$ 被曝線量）の変化率を算出。

評価指標  $S_i$  は以下の方法により求めている。

$$\left. \frac{\partial Y(X)}{\partial x_i} \right|_{x=x^{\circ}} = \frac{Y(X^{\circ}; x_i^{\circ} + \delta x_i) - Y(X^{\circ})}{\delta x_i}$$

$Y$  : 最大線量当量率

$X$  : 評価対象パラメータ

$x_i$  : 評価対象パラメータ値

$\delta x_i$  : パラメータ値の変化量

$^{\circ}$  は基準ケースのパラメータ値を表わす

$S_i$  : 評価指標とする無次元化した偏導関数

$$S_i = \left. \frac{\partial Y(X)}{\partial x_i} \right|_{x=x^{\circ}} \cdot \frac{x_i^{\circ}}{Y(X^{\circ})}$$

以上のようにPAGIS-Clayでは、任意にパラメータを変化させた場合の線量当量の変化率を無次元化して比較している。