

# 人工バリア性能確認モニタリング に関する研究

概要

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2002年2月

株式会社 大林組

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319 - 1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

**Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:**  
**Technical Cooperation Section,**  
**Technology Management Division,**  
**Japan Nuclear Cycle Development Institute**  
**4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184**  
**Japan**

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2002

## 人工バリア性能確認モニタリングに関する研究 概要

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

長谷川 宏 、納多 勝 、本田 ゆう子

### 要 旨

地層処分システムは本質的かつ受動的に安全に設計され、モニタリングを含めた制度的管理に依存すべきではないということは、国際的なコンセンサスが得られた前提条件として存在する。しかしながら、近年、諸外国の例を見ると、社会的な要求などを背景に、処分場における種々のモニタリングが求められつつある。高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分場の閉鎖の判断を行うための情報を得る1つの手法としてモニタリングが想定される。本研究は、諸外国におけるモニタリングの考え方などについて調査を行うとともに、人工バリアの性能を確認するためのモニタリングに関するロジックを構築し、第2次取りまとめで示された処分概念に適用する人工バリア性能確認モニタリングについて検討を行ったものである。

諸外国におけるモニタリングに関する調査の結果、現時点において、人工バリアの性能確認を目的としたモニタリングが明確に位置づけられているのは米国だけである。その他の国については、人工バリアの性能確認をモニタリングの明確な目的として定義していないが、各国とも、モニタリングと処分事業の可逆性とを関連づけて、地層処分プログラムの意思決定プロセスにモニタリングを組み込む方向で検討が進められ始めている。

処分場の閉鎖前のモニタリングに関しては、立地段階から処分場の建設を経て操業終了時までの数十年間にわたりモニタリングによって取得、蓄積される原位置のデータは、安全評価による地層処分の安全性の確認とその信頼性の向上に寄与する。本研究では、人工バリア性能確認モニタリングの目的は、人工バリアが性能を発揮するための前提条件と、性能発揮にともなう挙動が予測した範囲内にあることを確認することと定義した。人工バリア性能確認モニタリングでは、人工バリアの性能発揮に関連する項目と人工バリアの性能発揮にともなって変化する項目を、人工バリア周辺の岩盤内から間接的に測定する方法を提案し、技術課題の解決方策の一例として、幌延深地層研究センターでの試験を視野に入れた原位置試験案について検討した。

---

本報告書は、株式会社大林組が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター  
処分研究部 処分バリア性能研究グループ  
株式会社大林組

**Study on the engineered barriers performance confirmation monitoring  
(Document Prepared by Other Institute, based on the Trust Contract)**

Hiroshi Hasegawa \*, Masaru Noda \* and Yuko Honda \*

**Abstract**

There is an international consensus that the geological disposal should be essentially passive and safe without relying on the institutional control including monitoring. However, in recent years, many organizations have been discussing on a various types of monitoring in a repository from a societal demand etc. This study investigates the concept of monitoring in foreign countries and builds logic for monitoring designed to confirm the performance of the engineered barriers. This study also investigates the methodology for the engineered barriers performance confirmation monitoring applicable to the geological disposal concept shown in the H12 report.

As a result of the investigation about the monitoring concept in foreign countries, the monitoring aiming at the performance confirmation of the engineered barriers is clearly defined only in the United States at present. However, each organization begins to discuss in the direction where the monitoring would be built into a decision-making process with a relation to reversibility in geological disposal program. With respect to the pre-closure monitoring, in-situ monitoring data acquired and accumulated for several decades from a siting stage, through the construction stage, to the end of operation will contribute to confirmation of safety and improvement of reliability of geological disposal by safety assessment. The purpose of the engineered barriers performance confirmation monitoring is defined to confirm that prerequisites for providing the engineered barriers performance and the behaviors accompanied by exhibition of performance would be within the range of prediction. The indirect measuring method of items both providing the engineered barriers performance and varying with exhibition of performance from the rock around the engineered barriers is proposed for the engineered barriers performance confirmation monitoring. As a measure for resolving the technical issues, the in-situ experimental plan in the Horonobe deep underground research center is also proposed.

This work was performed by Obayashi Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division,

Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

\* Obayashi Corporation

目 次

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1. はじめに                          | 1  |
| 2. 研究の目的                         | 2  |
| 3. 研究の範囲                         | 3  |
| 4. 研究の概要                         | 4  |
| 4.1 地層処分におけるモニタリングに関するロジックの構築    | 4  |
| 4.2 人工バリア性能確認モニタリングの検討           | 5  |
| 5. 地層処分におけるモニタリングに関するロジックの構築     | 6  |
| 5.1 概要                           | 6  |
| 5.2 諸外国における人工バリアに関わるモニタリングに関する調査 | 6  |
| 5.2.1 国際機関における考え方                | 6  |
| 5.2.2 諸外国における考え方                 | 10 |
| 5.3 人工バリア性能確認モニタリングのロジックの構築      | 15 |
| 5.3.1 モニタリングに関する現状の理解            | 15 |
| 5.3.2 人工バリア性能確認モニタリングのロジック       | 19 |
| 6. 人工バリア性能確認モニタリングの検討            | 26 |
| 6.1 概要                           | 26 |
| 6.2 モニタリング項目の検討                  | 26 |
| 6.2.1 オーバーパック                    | 26 |
| 6.2.2 緩衝材                        | 29 |
| 6.3 測定項目、計測技術に関する情報の整備           | 31 |
| 6.3.1 試験の目的                      | 31 |
| 6.3.2 測定項目および現状の計測技術情報           | 31 |
| 7. おわりに                          | 34 |
| 参考文献                             | 38 |

図 目 次

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 図 6-1 | 原位置試験のレイアウト案       | 32 |
| 図 7-1 | 処分事業スケジュールと研究成果の反映 | 37 |

## 表 目 次

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 表 5.2- 1 | パラメータと計測方法                               | 8  |
| 表 5.2- 2 | 諸外国におけるモニタリングの考え方 総括表(1)                 | 12 |
| 表 5.2- 3 | 諸外国におけるモニタリングの考え方 総括表(2)                 | 13 |
| 表 5.2- 4 | 諸外国におけるモニタリングの考え方 総括表(3)                 | 14 |
| 表 5.3- 1 | 現時点における処分場の各段階の安全確保およびモニタリング<br>の考え方 (1) | 17 |
| 表 5.3- 2 | 現時点における処分場の各段階の安全確保およびモニタリング<br>の考え方 (2) | 18 |
| 表 5.3- 3 | 処分場の各工程ごとの安全確保のあり方 (1)                   | 22 |
| 表 5.3- 4 | 処分場の各工程ごとの安全確保のあり方 (2)                   | 23 |
| 表 5.3- 5 | 処分場の各工程ごとの安全確保のあり方 (3)                   | 24 |
| 表 5.3- 6 | 処分場の各工程ごとの安全確保のあり方 (4)                   | 25 |
| 表 6.2- 1 | オーバーパックモニタリングの要素試験                       | 28 |
| 表 6.3- 1 | オーバーパックの測定項目                             | 33 |
| 表 6.3- 2 | 緩衝材の測定項目                                 | 33 |

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の進め方として、近年、諸外国においては、段階的に得られる情報をその都度評価し、つぎのステップに段階的に進めるといった考え方（Stepwise Implementation, Stepwise decision-making process；たとえば OECD/NEA, 1995）が採用されるようになってきている。このような段階的アプローチでは、ステップごとに意思決定が行われるものと想定され、モニタリングは、各段階における意思決定を支援するうえで重要な役割を果たすものと考えられる。

とくに、処分場の操業段階から閉鎖段階に進む際には、処分場の閉鎖の判断情報を与えるものとして、人工バリアが初期の性能を確保し、処分場が要件を満たして機能しており、安全性が確保されていることを示す必要があると考えられる。その1つの手法として、人工バリアにおける実現象が予測される挙動範囲内にあることを示すこと（人工バリア性能確認モニタリング）が想定される。

本研究では、処分場の長期安全性の確保の観点から人工バリアの性能を確認するためのモニタリングに関するロジックを構築し、我が国の処分システムに適用するモニタリングシステムについて検討を行った。



## 2. 研究の目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分場の閉鎖の判断情報を与えるものとして、人工バリアが所期の性能を確保し、処分場が要件を満たして機能しており、安全が確保されていることを示す必要があると考えられる。この安全担保を示す1つの手法として、人工バリアにおける実現象が予測される挙動範囲内にあることを示すこと（人工バリア性能確認モニタリング）が想定される。

そこで本研究では、安全確保の観点から人工バリアの性能を確認するためのモニタリングに関するロジックを構築し、我が国の処分システムに適用するモニタリングシステムについて検討を行う。

3. 研究の範囲

- (1) 地層処分におけるモニタリングに関するロジックの構築
- (2) 人工バリア性能確認モニタリングの検討

#### 4. 研究の概要

##### 4.1 地層処分におけるモニタリングに関するロジックの構築

地層処分の長期安全性を示すためには、処分の各工程（地質環境調査、設計、製作・施工、操業、閉鎖）においてそれぞれどのように安全を確保するのかを示す必要がある。そこで、処分場の各工程ごとの安全確保のあり方を取りまとめ、人工バリア性能確認モニタリングに着目してモニタリングのロジックを構築する。

ロジックの構築にあたっては、第2次取りまとめ（JNC, 1999）や HLW 事業化技術（電力中央研究所・電気事業連合会, 1999）などの流れを踏まえるとともに、今後の安全規制などの議論に材料を提供できるように配慮する。処分場の各工程ごとの安全確保のあり方を取りまとめることに関しては、人工バリアの設計や製作・施工の各工程で人工バリアの所期の性能を発揮させるために何に着目し、何を確認したうえで次工程に進めるのかなどについて検討・整理する。その整理した内容を踏まえて、人工バリア定置後の性能確認モニタリングで何を確認するのかや、人工バリア性能確認モニタリングの位置づけ、目的などについて検討するとともに、実証エリアを設けて代表させる人工バリアでモニタリングを行うのかなどについても検討を行う。以上の検討結果を論理立て流れをもって示すことによって、ロジックを構築するものとする。

また、人工バリア性能確認モニタリングのロジックの構築の参考とするために、海外の考え方（たとえば米国の Performance Confirmation Program の目的や考え方の背景など）やモニタリング項目などについて下記のような参考文献を中心に調査を行うこととする。

- ・ Nuclear Regulatory Commission : Proposed Rule : 10 CFR Part 63 “Disposal of High-Level Radioactive Waste in Geologic Repository at Yucca Mountain, NEVADA”, Subpart F ( 1998 ).
- ・ U.S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management : “Yucca Mountain Science and Engineering Report”, Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration, DOE/RW-0539 ( 2001a ).
- ・ Environmental Protection Agency : Proposal Rule 40 CFR Part 194 “Criteria for the Cation and-Certification Of The Waste Isolation Pilot Plant’s Compliance with The 40 CFR Part 191 Disposal Regulations” ( 2001b ).
- ・ Environmental Protection Agency : Proposal Rule 40 CFR Part 191 “Environmental Radiation Protection Standards for Management and Disposal Of Spent Nuclear Fuel, High-Level and Transuranic Radioactive Wastes ” ( 2001c ).
- ・ Environmental Protection Agency : Proposal Rule 40CFR PART197 “Public Health and Environmental Radiation Protection Standards For Yucca Mountain,

Nevada” (2001b).

- ・その他、仏国、スイス、ドイツの考え方など

#### 4.2 人工バリア性能確認モニタリングの検討

4.1 で構築したモニタリングに関するロジックに基づき、人工バリア性能確認モニタリングによる安全確保のための具体的なモニタリング項目を抽出する。

また、人工バリア性能確認モニタリングは、処分場を対象として検討を行うが、原位置試験として計画されている幌延深地層研究施設での人工バリア試験を視野に入れ、幌延での試験に適用する具体的な測定項目、それらの現状での計測技術に関する情報を整理する。

ここでは、人工バリア構成要素ごとに具体的なモニタリング項目を抽出できるか試み、その結果に応じて幌延での試験に適用する具体的な測定項目などの検討を行うこととする。

## 5. 人工バリア性能確認モニタリングの検討

### 5.1 概要

ここでは、現時点における我が国の処分概念に基づき、処分場の各工程ごとの安全確保のあり方を取りまとめ、人工バリア性能確認モニタリングに着目してモニタリングのロジックを構築する。

人工バリア性能確認モニタリングのロジックの構築の参考とするために、海外の考え方やモニタリング項目などについて調査を行う。

### 5.2 諸外国における人工バリアに関わるモニタリングに関する調査

#### 5.2.1 国際機関における考え方

##### (1) IAEA

###### 1) モニタリングの目的

IAEA はモニタリングを「処分場システムの構成要素の挙動または処分場とその操業による影響の評価を助けるための、工学、環境または放射線学的なパラメータの連続的または定期的な観測および計測」と定義している (IAEA, 2001)。

モニタリングの第1の目的は、意思決定を支援するための情報を提供することであると指摘し、主な目的として以下をあげている。

処分場の建設、操業、閉鎖といった段階的な計画における管理上の意思決定を行うための情報を提供すること

処分場のセーフティーケースを開発する際に用いられるシステムの挙動の状況の理解を強化し、これらの状況を予測するモデルをさらに検証できるようにすること

処分場開発計画の主要な段階において意思決定を行うための信頼を広く社会に与えるとともに、社会が望むかぎりできるだけ長期にわたって、人類の健康と環境に望ましくない影響を処分場が及ぼしていないという信頼を強化するための情報を提供すること

将来の意志決定者に有用となるかもしれない、処分場サイトとその環境に関する環境データベースを蓄積すること

処分場が使用済燃料やプルトニウムが豊富な廃棄物などの核分裂性物質を内包するとすると、核物質防護を維持するという要件に取り組むこと

これらの主要な目的に加え、廃棄体定置期間中の純粋な操業上の理由から、モニタリングが実施されるとし、原子力施設や主要な産業と共通な行為が行われると述べている。

法令および規制の要件を遵守するために、職員および公衆に及ぼす（原子力発電所などの原子力施設のような）操業中の処分システムの放射線学的な影響を確定

すること

環境に関する規制の要件（たとえば、掘削と地上での建設工事が地方の給水率と水質に及ぼす影響）を遵守するために、処分場の周辺環境に及ぼす非放射線学的影響を確定すること

地下施設に関する非原子力産業の安全要件（たとえば、粉塵、ガス、騒音など）の遵守を確実にすること。

## 2) モニタリングの背景

処分システムは本質的かつ受動的に安全に設計されるべきであると指摘し、なぜモニタリングに関心が寄せられているのかという背景について、つぎのように述べている。

まず第 1 に、処分場の最終的な閉鎖（処分場開発計画の開始後、数十年間後に実施されるであろう）までの潜在的に長期にわたる期間中、モニタリングは、いくつかの有用な技術的な用途がある。第 2 に、処分場の閉鎖まであるいは閉鎖後になってものすべての段階において、技術的知識と安全性の状況を実証するためという有効で非常に強い社会的要件があるかもしれない。これもまたモニタリング活動を必要とするであろう。

## 3) 人工バリアに関するモニタリングの基本的な考え方

人工バリア性能の確認という観点からのモニタリングに関しては、以下のような考え方が提案されている。

オーバーパックの定置から緩衝材の定置、各種坑道の埋め戻しが進むにつれ、オーバーパックへのアクセスが急激に困難となり、計測の実施の可能性が低くなるとしている。実際には、それらの変遷をモニタリングする目的のための廃棄体への直接的なアクセスは、人工バリアの長期性能への潜在的に否定的な影響を有する、何らかの形で人工バリアの貫通を意味するため、人工バリアのモニタリングは克服できない困難を形成するとされている。

この解決策の 1 つとして、処分場の一部（あるいはさまざまな岩盤の状態を反映するために各部）あるいは同じ母岩の近い場所の専用の実証施設でのモニタリングをあげている。専用の実証施設では、すべての関係する因子が綿密にモニタリングできるように、十分に計測機器を配置できるとし、これによって代表的な処分環境における廃棄体の挙動の理解における必要な信頼・確信を達成する支援となると想定されるとしている。

## 4) 人工バリアに関するモニタリング項目・方法

人工バリアに関するモニタリングの項目と方法として以下があげられている。

表5.2-1 パラメータと計測方法

| モニタリングの<br>カテゴリ/目的  | 典型的なパラメータ                      | アクセス方法                                 | 典型的な計測方法          |
|---|--------------------------------|--|-------------------|
| 廃棄体と緩衝材<br>の挙動<br><br>定置された廃棄<br>体の状態および<br>緩衝材の状態を<br>モニタリングす<br>ること | ひずみ、腐食電流                       | 廃棄体の原位置または<br>遠隔モニタリング                 | ひずみゲージ、電流計        |
|   | オーバーパック温度、<br>オーバーパック近傍の<br>湿度 | オーバーパック近傍の<br>環境の原位置または遠<br>隔モニタリング    | 多くの測定技術が適用<br>可能  |
|   | 排水における放射能                      | 処分場排水の放射能の<br>モニタリング                   | 種々、たとえばガンマ線<br>検出 |
|   | 処分場の空気中での廃<br>棄物起源のガス          | 処分場の空気中におけ<br>る放射性およびその他<br>のガスのモニタリング | ガス分析器             |
|   | 緩衝材中の再飽和およ<br>び膨潤圧             | オーバーパック近傍の<br>環境の原位置または遠<br>隔モニタリング    | 圧力センサー、水分計        |

## (2) OECD/NEA

建設に先立つ期間に始まり閉鎖まで続く、さまざまなサイトと処分場のパラメータのモニタリングは安全評価のための情報を提供するであろう。これは自然のままのサイト条件の確認、処分場の存在に対する天然のシステムの応答の理解、および人工的な要素の初期状態からの変遷の理解を含むかもしれない。多くの設計では、坑道を開放している期間の延長など、再取り出し性を高める措置は、サイト条件を変更し、長期安全性のために目的とされる状態を遅らせるかあるいは妨げるであろう。性能に関連するモニタリングのための計画は、最終的な長期安全性に対して測定されたパラメータの関連性が知られるように適用された、慎重に熟考され合理性に基づいた議論であるべきである。

操業期間中、およびそれに続く延長された坑道開放期間も、岩盤の安定性、地下環境、および廃棄体の状態のモニタリングが必要であろう。このようなモニタリングは、操業時の安全性を確保するとともに、（たとえば岩盤の支保システムの）初期欠陥のいかなるリスクも検知し、与えられた方法に従った廃棄物再取り出しのための条件がその時点でもなお満たされているかどうかをチェックするために必要である。モニタリングの結果は、さまざまなシステムと地下施設要素の維持と改修を計画するために用いられるだろう。また、モニタリングの結果によって、維持と改修のときにかかなりの追加的な費用なしで与えられた段階をどれくらい長く維持することができるかに関する見積りが改良されるため、モニタリング結果は、いつ処分場の閉鎖に向かった次の段階に進むかに関する意思決定に貢献するかもしれない。もし、延長された坑道開放期間が長期あるいは操業時の安全性を損な

うという影響を及ぼすかもしれないことが明らかにされるとすると、モニタリングの結果はある地下開口部の埋め戻しを促すかもしれない。

その後のモニタリング（埋め戻しの状態のモニタリングを含むかもしれない）は、人工バリアの初期状態からの変遷を見守り、安定な物理化学的な状態に向かった予想された進展が進行中であることをチェックするために実行されるかもしれない。また、廃棄物を取り戻すという意思決定が採られるとすると、適用可能な方法に従った廃棄物再取り出しのための条件が満たされているかどうかをチェックするために、モニタリングは利用されよう。使用済燃料と他の核分裂性物質を多く含む廃棄物は、どんな不法な再取り出しも行われなかったことを確かめるために、安全のためのモニタリングと核物質防護モニタリングの双方の対象となるであろう。これは、操業期間中、およびそれに続く延長された坑道開放期間も、他の原子炉プラントで適用されているように、現場における管理と監視という措置によってなされるであろう。現場での遠隔探査技術を用いてモニタリングは閉鎖後の期間も継続することができるであろう。たとえば、音波探査技術、空中写真、衛星画像は、再取り出しを目的としたいかなるボーリングや採掘も特定するために用いられるかもしれない。公衆の関心を緩和するための国家政府によるモニタリングは、安全性、あるいは核物質防護の必要性の理由で、規制者によって提案された期限を超えて継続されるかもしれない。



### 5.2.2 諸外国における考え方

米国、フランス、ベルギー、スイス、ドイツ、スウェーデン、フィンランドの各国の処分概念におけるモニタリングに対する基準や指針、考え方の動向などに留意して、人工バリア性能確認モニタリングに関連すると考えられる最新の情報を調査・整理した結果を以下に示す。

IAEA の定義によると「処分」とは、一般に再取り出しの意図なく、また長期的なモニタリングおよび保守に頼らない形で放射性廃棄物を処分場に定置することをいう。しかし、近年では、公衆は、処分プロセスの管理およびモニタリング、また、再取り出しのオプションを求めている。

今回の調査で、各国は、モニタリングを検討しはじめていることがわかった。ただし、単にモニタリングといっても、その意味する範囲は広く、品質管理に関わるもの、地質条件、環境モニタリング、作業の安全性など多岐にわたる。本調査では人工バリアに関する性能確認モニタリングを取り扱うが、モニタリング全般の動向に留意して調査を行い、その中で人工バリア性能の確認に関わるモニタリングに関連する考え方やモニタリング項目などを抽出した。

安全性それ自身を担保するものとしてではなく、安全性を補完するために、モニタリングを行う。処分はフェイルセーフシステムとしており、モニタリングを実施しないほうが安全であると考えられている場合も多い。

現在、人工バリア性能確認モニタリングを位置づけているのは米国だけである。その他の国については、モニタリングを人工バリア性能確認の手段としては定義していない。また、モニタリングに対する考え方は、モニタリング技術の検討の進展状況により、表現方法が違ふようである。具体的なモニタリング方法の検討が進んでいる国は処分段階に応じたモニタリング項目があり、そのモニタリングにより得られるパラメータ、使用機器についての検討も進んでいる。逆に、まだ詳細な検討が始まっていない国は、モニタリング項目のおおまかな列挙にとどまっているようである。

以上のことを踏まえて、各国の特徴を述べると、次のようになる。

米国は、モニタリングを性能確認プログラムのための一つ的手段として考えており、規制も整備されている。これは他の諸外国では、考えられておらず、米国では全く異なる観点でモニタリングが考えられている。

フランスは、再取り出し性を補完するものとみなしている。再取り出しを公衆の要求により規制したという経緯があるので、モニタリングも公衆の要求と考えることが妥当と考えられる。

ベルギーは、HADES 研究施設において実績を積んでいる。ここでの計画では、この計測が処分概念の信頼性を公衆に証明することを目的としているため、モニタリングは非常に重要であると考えられている。

スイスは、EKRA の勧告により、「無期限モニタリング付き再取り出し貯蔵」を検討し、モニタリングは処分場の設計と建設、並びに長期安全評価に使用するデータを補完するものであるとし、原子力法のドラフトにモニタリングを実施することを組み入れた。

ドイツは、安全評価や環境評価を行うため、モニタリングを実施する。

スウェーデンは、モニタリングの目的の1つを処分場の安全評価の補完またはモデルや仮定の実証に資するシステム挙動の理解への促進としている。

フィンランドでは、最終処分場地域における環境影響をフォローアップするためのモニタリングを計画している。

国内においても今後、モニタリングを要求する可能性があるが、安全性の担保となるものとしてではなく、安全性を補完するものとして、あるいは、公衆の理解を促進するためのものとして定義することが望ましいと考えられる。

各国の調査結果を要約して表 5.2- 2 ~ 表 5.2- 4 に示す。

表 5.2- 2 諸外国におけるモニタリングの考え方 総括表(1)

|                  | 米国  | フランス   | ベルギー   | スイス  | ドイツ   | スウェーデン   | フィンランド   |
|------------------|---|--|--|--|---|--|--|
| 放射性廃棄物処分を定めている法令 | 1982年NWPAでは、国家の政策は地層への処分が将来世代の意見に従うのではなく、廃棄物を作成した世代が実行されるべきであると定めている。<br>1987年のNWPA修正法により、サイト特性調査対象サイトとしてユッカマウンテンを指定した。 | 長寿命・高レベル放射性廃棄物の管理は、1991年12月30日に制定した放射性廃棄物管理研究法に基づいて実施する。                   | 1991年11月20日付の勅令「再取り出しを意図しないこれらの廃棄物の放出または処分。これは地表または地層中での可能な処分。および国際協定で許可された範囲内での自由な放出も含む。」   | 1993年に、HSK R-21 Guideline Ref.3「放射性廃棄物の処分の保護目的」が制定された。<br>スイス連邦政府は2000年3月に原子力法の改正案を議会に提出している。同法案には、使用済燃料の再処理の禁止規定の他、放射性廃棄物の最終処分場の建設・運転主体の任務や資金確保策等の処分事業の基本的枠組みに関する規定も含まれている。 | 「原子力の平和利用およびその危険の防護に関する法律」（原子力法）の第9a条は「連邦（政府）は、放射性廃棄物に対する安全防護およびその最終処分のための施設を建設しなければならない」と、処分場の建設・操業は連邦の責任であるとしている。 | 高レベル放射性廃棄物処分対策の基本方針を、1984年の「原子力活動法」、で示している。  | 1983年の「閣議の原則決定」で高レベル放射性廃棄物処分対策の基本方針を示している。   |
| 放射性廃棄物処分実施機関     | DOE内に設置されたOCRWM   | ANDRA  | NIRAS/ONDRAF   | Nagra  | BfSが、処分場の建設および操業を行う実施主体。DBE社がBfSとの契約により、BfSのために作業にあっている。  | SKB  | Posiva Oy  |
| 安全規制体制           | NRC、EPA   | INB、DSIN   | 政府   | 内閣、HSK   | 州政府、BMU、RSK   | SKI、SSI  | 政府（通称産業省等）、STUK  |
| 安全規制基準類          | NRC規則：10CFR PART60、10CFR PART63<br>EPA規則：40CFR PART191、40CFR PART197  | 安全基本規則 RFS 2.f「放射性廃棄物の深地層処分場の閉鎖後の安全性を確保するために、同処分場設置の設計・建設段階で採用すべき目標の規定」    |  | HSK R-21 Guideline Ref.3「放射性廃棄物の処分の保護目的」   | 「鉱山における放射性廃棄物の最終処分に関する安全基準」   | SKIは、「所定の原子力施設の安全性に関するSKIの規則」を制定し、SSIは、「使用済燃料と放射性廃棄物の管理に係わる人間健康および環境の保護に関するSSIの規則」を制定している。 | 「使用済燃料の最終処分施設サイトに関する閣議の原則決定」<br>STUKの「使用済燃料処分の長期安全性の指針 YVL 8.4」  |
| 廃棄物の種類と量         | 実用炉から発生した使用済み燃料は63,000t（ウラン換算）、国防原子力活動および一部、商業用使用済み燃料の再処理から発生した高レベル放射性廃棄物、国防原子力活動から発生した使用済み燃料は7,000t（ウラン換算）としている。       | カテゴリC（発熱性廃棄物）約8,000m <sup>3</sup> 。<br>・ ガラス固化した核分裂生成物とマイナー・アクチニドで、発熱性が高い。 | ・ すべての使用済み燃料が再処理されるとすれば、約4,000個のガラス固化された高レベル放射性廃棄物のキャニスタと、約5,000～6,000個の再処理に伴い発生する圧縮された燃料被覆材、構造部品および工学的な廃棄物からなるキャニスタが生じる。再処理が継続されなければ、約4,650～5,650トンの使用済み燃料が発生する。<br>・ 旧EUROCHEMIC再処理工場から生じた、約2,200個のガラス（ガラス固化体）固化体と約14,000個のEURO-BITUM廃棄物 | カテゴリC<br>・ （最良推定シナリオの場合）ガラス固化高レベル放射性廃棄物約700本<br>・ （最良推定シナリオの場合）未処理の使用済み燃料要素約2,000トンIHM<br>・ （最良推定シナリオの場合）長寿命中レベル放射性廃棄物約700m <sup>3</sup>                                     | ・ 再処理による高レベル廃棄物（ガラス固化体）発生量は合計5,468トン<br>・ その他の全燃料およびMOX燃料は、すべて直接処分する。2040年までに発生し、直接最終処分する使用済み燃料は、約19128トン           | 推定約7,000トン<br>現在のスウェーデンの原子力発電計画により2010年までに発生する使用済み燃料の総量に相当                                 | 現在フィンランドには、オルキオ原子力発電所（沸騰水型原子炉（BWR））とロヴィーサ原子力発電所（旧ソ連製加圧水型原子炉（VVER））より発生する、およそ1,000ウランウムトン、つまりおよそ500m <sup>3</sup> の原子力発電所の使用済み燃料を貯蔵している。さらに年間70ウランウムトンの核廃棄物が発生している。 |
| 処分対象地層           | ユッカマウンテンの凝灰岩が候補地となっている。   | 花崗岩と粘土質岩を研究対象としているが花崗岩の地下研究施設は決まっていない。                                     | ブーム粘土をレファレンス概念として研究している。   | 結晶質岩とオパリナス粘土という2つの母岩を検討中である。   | ゴアレーベンの岩塩ドームを候補地としている。  | 花崗岩層   | 結晶質岩   |

表 5.2- 3 諸外国におけるモニタリングの考え方 総括表(2)

|                         | 米国   | フランス   | ベルギー  | スイス  | ドイツ  | スウェーデン  | フィンランド  |
|-------------------------|--|--|---|--|--|---|---|
| 対象とする処分概念の概要 (SF or VW) | ユッカマウンテンの主要な地質学的特長は、上部凝灰岩ユニットの多くの部分が不飽和である。<br>オーバーバックは、耐食性のある Alloy 22 アウター・シェルと構造的に強いステンレスのインナー・シェルの2層構造を考えている。        | ピュール地下研究所の建設が進められている。ムーズ/オートマルヌサイトの地下400mに存在する厚さ約130mのカロピアン=オックスフォードアン(地質年代が1億5千万年前)は粘土質岩である。<br>オーバーバックの有効な寿命は約1,000年程度で、材料と厚さは、75mm肉厚の炭素鋼を考えている。 | モルのHADES地下研究所のブームクレイ(粘土)層において、使用済み燃料、高レベルおよび中レベル廃棄物に対するレファレンス概念として研究されている。<br>高レベル放射性廃棄物キャニスタを封入したオーバーバックはステンレス製の処分チューブ内に定置される。 | 結晶質岩とオパリナス粘土はどちらの母岩オプションの場合も、岩石研究所がある。現在のレファレンス設計は、地下深部に処分場を建設し、その中に、厚肉の鋳鋼製オーバーバック内にガラス固化した廃棄体もしくは使用済み燃料を密封する。   | 1986年ゴアレーベンにて、立坑掘削を含む地下からのサイト特性調査活動を開始。<br>キャスクは、地下約900mの処分坑道に横置き定置する。                         | 2001年12月にエストハンマルがサイト特性詳細調査実施の正式受け入れを表明した。<br>各坑道システムから定置坑が掘削され、使用済み燃料を装荷したキャニスタを定置する。   | 2001年議会在がオルキルトを最終処分場として承認した。<br>使用済み燃料スティックは密封して金属製のコンテナに納められ、深さ400~700mに収納される。 |
| モニタリングに関する規則            | HLW 処分場に関する具体的な要件は、10CFR PART60において定義している。<br>また、Proposal Rule 10CFR PART63において、廃棄体のモニタリングと試験について記述している。                 | モニタリングに関する規制・基準を定めていない。  | モニタリングに関する規制・基準を定めていない。   | 原子力法の改正案第38条では、廃棄物の定置が完了したとき、深い地層処分施設の所有者がモニタリングの段階と閉鎖に対するプロジェクトを提出しなければならないと述べる予定。  | モニタリングに関し、政府からは具体的項目は要求されず、規制への適合が要求されている。   | モニタリングに関する規制・基準を定めていないが、保障措置に関する国際的要件に適合するためのモニタリングについて具体的な要件を設定する予定。   | モニタリングに関する規制・基準を定めていない。   |
| モニタリングの目的               | 閉鎖前にモニタリングを実施する目的は、処分場が放射性廃棄物を閉じ込める能力あるいは処分場の将来の性能予測を検証することである。閉鎖後にモニタリングを実施する目的は、処分場が期待される性能から逸脱した状態になるような兆候を検出することである。 | 可逆的な廃棄物処分場に関するモニタリングの目的は処分場が予測した状況に反する事象を、実際に人工バリア外部に核種移行が生じる以前に検出することである。   | モニタリングに関する目的を定めていない。  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分場の設計と建設、並びに長期安全評価に使用するデータを補完する。</li> <li>・規制要件との適合性を実証するために、作業員、一般公衆そして自然環境に対する処分場の放射線と非放射線影響を求めるためのデータを収集する。</li> <li>・処分場閉鎖に至るまでの社会的な意思決定の段階的プロセスを支援するための情報を提供する。</li> <li>・セキュリティを保証するための保証措置要件について言及する。</li> <li>・処分場の適切性に関する将来世代の信頼感を保持する。</li> </ul> | 安全評価や環境評価を行うため、モニタリングを実施する。評価には、処分施設、サイトの環境条件、人工バリア性能に影響を及ぼすと考えられるプロセスの情報が必要となり、モニタリングにより収集する。 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分場開発・操業または閉鎖後の影響を特定、評価するための現況の把握</li> <li>・処分場の安全評価の補完またはモデルや仮定の実証に資するシステム挙動の理解への促進</li> <li>・環境への非放射線または放射線影響の概算</li> <li>・建設、操業期間期間における作業員の非放射線または放射線学的な安全要件への適合確認</li> <li>・核不拡散に関する保障措置への適合</li> </ul> | モニタリングに関する目的を定めていない。  |

表 5.2- 4 諸外国におけるモニタリングの考え方 総括表(3)

|                 | 米国  | フランス  | ベルギー  | スイス  | ドイツ   | スウェーデン  | フィンランド  |
|-----------------|---|---|---|--|---|---|---|
| モニタリングの基本的な考え方  | <p>ユッカマウンテンでのモニタリングを処分場の性能確認試験の中で計画している。処分場の操業段階における性能確認試験は、地層処分場閉鎖に関する最終決定の裏付けデータ収集のための主要な手段である。性能確認試験で得たデータを、地層処分場性能予測データについての TSPA の継続的分析の基礎データとして用いる。性能確認試験は、モニタリングだけでなく試験や実証も含んでおり、それらすべてにより処分場の安全性を確認することとなる。モニタリングはその 1 つの手段として位置付けている。</p>  | <p>一般的な観点からすると、モニタリングを再取り出し性を補完するものとみなすことが多い。</p> <p>段階的な処分の進行に伴う、それぞれの可逆性のレベルで、廃棄体再取り出し性と放射性核種の閉じ込め能力にふさわしい形で、処分場の構成要素の変化をモニタリングするために考案したモニタリング計画を実行する。</p> <p>将来世代は、構造物の老朽化に関連した要件とモニタリング計画に基づいて、ある閉鎖段階から次の閉鎖段階に進むか、処分場の可逆性を活用するかを決定する手段を確保できる。</p> | <p>NIRAS/ONDRAF の地層処分概念では、原則として、モニタリングを必要としないか、あるいはモニタリングに依存しない“フェイルセーフシステム”として開発している。</p> <p>操業期間や搬送坑道の閉鎖前における、ニアフィールドのモニタリングや、あるいは、閉鎖後段階においても、処分場の長期安全性に影響することのないファーストフィールドのモニタリングを想定している。</p>  | <p>公衆は、放射性廃棄物の処分場のモニタリングを要求することが多い。</p> <p>処分場では、建設段階の前に安全性に関連した情報を収集する。処分場の建設と処分する廃棄物の品質管理は、長期的な安全性を確保するために必要なプロセスとなる。他の原子力施設と同じように、操業の際の環境への放出のモニタリングが必要である。公衆を安心させるために、閉鎖後のモニタリングを実行することができる。しかし地下深部の地層処分場の長期的な安全性は、モニタリングや正活動に依存すべきではない。</p>                                     | <p>モニタリングは、1 つには、物事の状態を記録すること、もう 1 つは、記録結果を評価基準と比較することからなっている。安全基準を、限度または操業条件として定義され、代表的モデル計算に導く。モニタリング手段の目標は、評価基準の遵守である。それらは安全評価解析と密接な関係があり、最終処分場の状況に大きく依存する。</p>                            | <p>「処分場は、その長期的安定性を将来世代によるモニタリングまたは保守に依存するものであってはならない。しかしそのことは、廃棄物の処分後あるいは処分場の閉鎖後の期間にモニタリングが実施できないことを意味するものではない。」としている。</p> <p>処分場システムにおける安全性は長期管理や保守行為に依存しないことから、閉鎖後モニタリングの必要性に関し議論をなしている。ただ、モニタリングの実施で処分場の安全性能を危うくすることがあってはならない、ということでは一致している。</p> | <p>一般的な安全要件によれば、長期的な安全性を処分場のモニタリングになんら依存することなく保証されなければならない。したがって、ある種の閉鎖後モニタリング計画が設定されたとしても、それは何らかの安全目的のため、あるいはキャニスタの再取り出しに関わる決定のためのもとはならない、としている。</p>                                       |
| 人工バリア性能確認モニタリング | <p>モニタリング項目の中で、人工バリア性能確認モニタリングに関する項目を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 長期材料試験</li> <li>・ 岩体モニタリング</li> <li>・ 廃棄体のダミー試験</li> <li>・ 閉鎖後シミュレーション試験</li> <li>・ 地下試料採取と試験</li> <li>・ 現況の分析と評価</li> <li>・ ニアフィールド環境試験</li> <li>・ 廃棄体試験</li> <li>・ 試錘孔閉鎖試験</li> <li>・ 地下水位と水温モニタリング</li> <li>・ 原位置廃棄体モニタリング</li> </ul> | <p>モニタリング項目の中には、人工バリア性能確認モニタリングとして位置付けているものはない。しかし、可逆性を補完するために測定するモニタリング項目の中でも人工バリア性能確認モニタリングの測定項目として有効なものが存在し、それらを以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 人工バリア内での温度、岩盤変位、応力変化、ガス組成および物理化学パラメータ計測</li> </ul>                             | <p>モニタリング項目の中には、人工バリアの性能確認モニタリングのためのものはない。しかし、地下研究所による実績から人工バリア性能確認モニタリングの測定項目として有効なものを以下に示す。処分段階については定めていない。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 放射線</li> <li>・ 岩盤の温度</li> <li>・ 間隙水化学 (pH、Eh)</li> <li>・ 岩盤・支保表面の全水圧</li> <li>・ 岩盤・プラグの間隙水圧・サクション圧</li> <li>・ 岩盤・プラグの変位</li> </ul> | <p>モニタリング項目の中には、人工バリアの性能確認モニタリングのためのものはない。しかし、計画しているモニタリング項目に人工バリア性能確認モニタリングの測定項目として有効なものが存在する。それらを以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地質学的なパラメータのモニタリング</li> <li>・ 品質管理</li> <li>・ 廃棄物の慎重な確認と品質管理</li> <li>・ ニアフィールド・岩石圏・生物圏のモニタリング</li> <li>・ 原位置モニタリング</li> </ul> | <p>モニタリング項目の中には、人工バリア性能確認モニタリングのためのものはない。しかし、計画しているモニタリング項目に人工バリア性能確認モニタリングの測定項目として有効なものが存在する。それらを以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地下の調査</li> <li>・ 地球化学的モニタリング</li> </ul> | <p>モニタリング項目の中には、人工バリアの性能確認モニタリングのためのものはない。しかし、測定する項目に人工バリア性能確認モニタリングの測定項目として有効なものが存在する。それらを以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地下水化学</li> <li>・ 岩盤水理特性</li> </ul>   | <p>モニタリング項目の中には、人工バリアの性能確認モニタリングのためのものはない。しかし、測定される項目に人工バリア性能確認モニタリングの測定項目として有効なものが存在する。それらを以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地下水のモニタリング</li> <li>・ 試錘孔のモニタリング</li> </ul> |
| 再取り出しとの関係       | <p>再取り出し可能性についての特にモニタリング要件を策定していない。</p>   | <p>研究プログラムの現段階においては、各タイムゾーンに対応するモニタリングシステムの目的をまだ定義していない。現段階で選択している設計オプションは、原則として、処分場の各段階に関してモニタリングプログラムの実施を想定している。</p>  | <p>限られた数の廃棄物容器の周囲に、かなり限られた期間（たとえば数 10 年間）モニタリング装置を設置することを考える可能性がある。</p>   | <p>モニタリングと再取り出し性を直接支援するプロジェクトを必要と考えるではないが、いくつかの進行中のプロジェクトがこれらのトピックに関連して二次的に発生する。</p>   | <p>処分場のニアフィールドにおける状態の推移が予測どおりであることが、処分システムの安全性に対する信頼性につながる。データは、地下施設（アクセス坑道開放中）または地表からの試錘孔から取得する。</p>   | <p>再取り出し性の問題は、長期的モニタリングと保障措置という問題に関連しているのは明らかとしている。</p>   | <p>一般安全要件によれば、長期的な安全性は処分場のモニタリングに頼らず確保しなければならない。したがって、何らかの種類の閉鎖後モニタリングプログラムが確立されるにしても、安全目的あるいはキャニスタの再取り出し決定に役立てるためではない。</p>   |
| 備考              |   |   |   |  |   |   |   |

### 5.3 人工バリア性能確認モニタリングのロジックの構築

ここでは、現時点における我が国の処分概念に基づき、処分場の各工程ごとの安全確保のあり方を取りまとめ、人工バリア性能確認モニタリングに着目してモニタリングのロジックを構築する。

ロジックの構築にあたっては、5.2 で調査を行った諸外国における人工バリア性能に関するモニタリングの考え方を参考にするとともに、第2次取りまとめ(JNC, 1999)やHLW事業化技術(電力中央研究所・電気事業連合会, 1999)などの流れを踏まえることとする。

処分場の各工程ごとの安全確保のあり方を取りまとめることに関しては、人工バリアの設計や製作・施工の各工程で人工バリアの所期の性能を発揮させるために何に着目し、何を確認したうえで次工程に進めるのかなどについて検討・整理する。その整理した内容を踏まえて、人工バリア定置後の性能確認モニタリングで何を確認するのかや、人工バリア性能確認モニタリングの位置づけ、目的などについて検討するとともに、実証エリアを設けて代表させる人工バリアでモニタリングを行うのかなどについても検討を行う。以上の検討結果を論理立て流れをもって示すことによって、ロジックを構築し、今後の安全規制などの議論における材料を提供できるように配慮する。

#### 5.3.1 モニタリングに関する現状の理解

ここでは、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(通商産業省, 2000)、高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)(原子力安全委員会, 2000)および第2次取りまとめ(JNC, 1999)におけるモニタリングの考え方を取りまとめ、モニタリングに関する現状を理解する。

現時点における我が国の地層処分の概念に基づき、処分場の各段階における安全確保およびモニタリングの考え方を表5.3-1～表5.3-2に示す。

「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)」(原子力安全委員会, 2000)では、処分場においては、立地段階から事業廃止に至るまで、各段階に応じたモニタリングや巡視・点検等を実施することが必要であると述べられており、これに基づけば、概要調査地区における地表からの調査の段階から地層処分システム全体のモニタリングの一部を開始する必要がある。さらに、処分場の閉鎖に際しては、建設段階および操業段階に得られたデータを追加し、安全評価の結果が妥当であることの確認を行うとされており、人工バリア性能確認モニタリングで得られる情報は、それまでに得られているそのほかの情報とあわせて、安全評価結果の妥当性の確認に利用されるものと推察される。

また、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(通商産業省, 2000)の第17条(最

終処分施設の閉鎖)では、原子力発電環境整備機構は、その最終処分施設において、前条の規定による特定放射性廃棄物の最終処分が終了したときは、あらかじめ、当該最終処分施設の状況が経済産業省令で定める基準に適合していることについて、経済産業大臣の確認を受けたときに限り、当該最終処分施設を閉鎖することができる」とされている。この条文によれば、人工バリア性能確認モニタリングで得られる情報は、それまでに得られている情報とあわせて、「最終処分施設の状況が経済産業省令で定める基準に適合していることについて、経済産業大臣の確認を受け」るために、利用されることが想定される。

表5.3-1 現時点における処分場の各段階の安全確保およびモニタリングの考え方 (1)

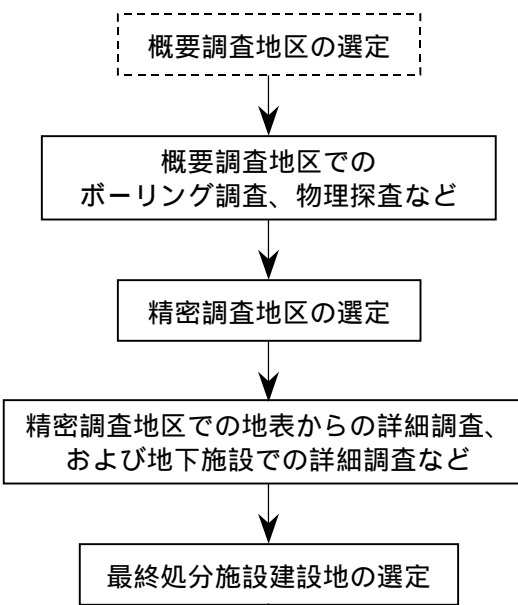
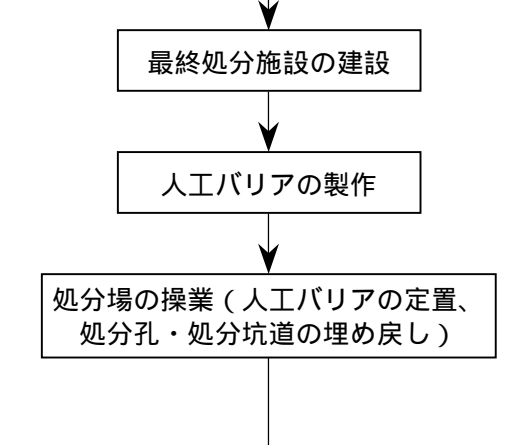
| 処分場の開発段階とモニタリング  | 内 容   |
|--|---|
|  <p style="text-align: center;">地層処分システムの<br/>モニタリング (広義)</p> | <p>「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)」(原子力安全委員会、2000)におけるモニタリングの考え方</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分場においては、立地段階から事業廃止に至るまで、各段階に応じたモニタリングや巡視・点検等を実施することが必要である。</li> <li>・「安全規制の基本的考え方」に基づけば、概要調査地区における地表からの調査の段階から地層処分システム全体のモニタリングの一部を開始する必要がある。</li> </ul> <p>第2次取りまとめでの考え方(安全評価の前提; 総論第II章より):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・地層処分にとって適切な地質環境を選定する<br/>地層処分の安全確保の観点から考えた場合、サイト選定では、まず処分システムの性能に大きな影響をもたらす事象が生じる可能性のある場所を避けることが重要<br/>安定な地質環境を確保した後、次に考慮しなければならないのは、長期間のうちにオーバーパックが劣化し、ガラス固化体中の放射性核種が地下水に溶解して人間環境に影響を及ぼすという可能性を抑制するため、できるだけ好ましい地質環境を選定することも重要</li> <li>・地層処分にとって適切な地質環境を選定することによる潜在的な Safety Margin の存在(地質環境の不確実性の軽減)</li> </ul>   |
| <p style="text-align: center;">処分場(人工バリアおよび処分施設)の設計</p>  | <p>「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)」(原子力安全委員会、2000)における考え方</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実施主体による最終処分施設建設地選定がなされるまでに、処分場の建設段階から事業廃止までの各段階で国が確認すべき事項を定めた技術上の基準を策定することとし、安全研究等によって得られる新しい知見を取り入れ、適宜見直していくこととする。</li> <li>・この考え方によれば、人工バリア性能確認モニタリングで得られる情報は、少なくとも「国が確認すべき事項」をカバーしている必要がある。</li> </ul> <p>第2次取りまとめでの考え方(安全評価の前提; 総論第II、IV章より):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分場は、経済的かつ合理的に実現可能な技術により設計・施工できるものでなければならない。その際には厳密な品質管理により、人工バリアや処分施設に工学的な欠陥が生じないようにすることが必要である。</li> <li>・廃棄物と人間との物理的接近の影響を避け、地下水による人間環境への影響に対する安全機能の冗長性(redundancy)を確保するため、わが国の地層処分概念は、「安定な地質環境に、性能に余裕をもたせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築する」ものであると定義することができ、これは、第2次取りまとめにおいても踏襲されている</li> <li>・将来、処分サイトが決まった段階では、その予定地の地質環境を考慮して、安全面、経済面から合理的な人工バリアが決定される。</li> <li>・性能に余裕を持たせた人工バリアの設計による Safety Margin の存在(設計、製作・施工の不確実性をカバー)</li> <li>・設計上の品質管理は、人工バリアや処分施設などの設計が妥当なものであることを確認するために行われる。</li> <li>・人工バリアの設計が妥当なものであることについては、サイト特性調査段階で行なわれる「工学技術の実証」試験により、あらかじめ確認しておくことが可能であり、ここで得られた知見は、実際に人工バリアを構築する際の、設計・施工の品質管理のための技術的な拠り所として適用することができる。</li> <li>・人工バリアは、本来、期待される性能(目標)を満足するように、設計される。</li> </ul> |
|   | <p>第2次取りまとめでの考え方(安全評価の前提; 総論第IV章より):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・施工上の品質管理について・・・人工バリアの定置に関しては、仕様どおりに適切に製作・施工されたことを確認するための情報が、また坑道の埋め戻しについては、仕様どおり埋め戻しやプラグの設置が行われたことを確認できる情報が必要となる。このような施工上の品質管理を行うために必要となる情報の項目や技術については、サイト特性調査段階で行われる「工学技術の実証」試験や諸外国を含めた地下研究施設などを利用した試験を通じて十分な検討が必要であり、それに基づいてあらかじめ整備される。</li> <li>・人工バリアは、期待される性能(目標)を満足するように設計された結果として示される仕様に対して、さらに製作・施工上の品質目標を満たすように製作・施工が行われる。</li> <li>・人工バリアの製作・施工における品質管理による Safety Margin の存在(製作・施工の不確実性をカバー)</li> </ul>  |



表5.3-2 現時点における処分場の各段階の安全確保およびモニタリングの考え方 (2)

| 処分場の開発段階とモニタリング   | 内 容   |
|---|---|
| <p style="text-align: center;">地層処分システムの<br/>モニタリング(広義)</p> | <p>「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)」(原子力安全委員会、2000)における考え方</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分場の閉鎖に際しては、建設段階および操業段階に得られたデータを追加し、安全評価の結果が妥当であることの確認を行う。</li> <li>・この考え方によれば、人工バリア性能確認モニタリングで得られる情報は、それまでに得られているそのほかの情報とあわせて、安全評価結果の妥当性の確認に利用できるものとなっている必要がある。</li> </ul> <p>「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(通商産業省、2000)における考え方</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・第17条(最終処分施設の閉鎖)機構は、その最終処分施設において、前条の規定による特定放射性廃棄物の最終処分(第56条第2項第1号の受託特定放射性廃棄物について行う最終処分と同一の処分を含む。第19条において同じ。)が終了したときは、あらかじめ、当該最終処分施設の状況が経済産業省令で定める基準に適合していることについて、経済産業大臣の確認を受けたときに限り、当該最終処分施設を閉鎖することができる。</li> <li>・この条文によれば、人工バリア性能確認モニタリングで得られる情報は、「最終処分施設の状況が経済産業省令で定める基準に適合していること」の確認に何らかの寄与ができる必要がある。</li> </ul> <p>第2次取りまとめでの考え方(安全評価の前提; 総論第IV章より):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・人工バリアの周辺および処分施設周辺部における地質環境条件が、処分場の建設、操業、あるいはその期間における天然現象などの擾乱によって変動しても、人工バリアや周辺母岩が所期の性能を発揮する上で許容できる範囲にあることを確認あるいは予測するための情報を得るためにモニタリングを行う。取得すべき情報の内容としては、主に、地下水の水理学的特性および地球化学特性、地質学的特性を挙げることができる。これにより得られる情報は、上述した設計・施工上の品質管理によって確認される情報と合わせて、処分場を閉鎖するための技術的な判断に用いられる。</li> <li>・上記の各特性に関して個々に計測すべき項目は、人工バリア周辺部や処分施設全体の地質環境に関して、建設、操業、およびその期間における天然現象などの擾乱によって変化すると考えられるもので、人工バリアや地層処分システムが性能を発揮する上で重要なパラメータが対象となる。このようなパラメータは、サイト特性調査段階に行われる「工学技術の実証」試験や性能評価解析などによって絞り込んでおくことができる。モニタリングは、建設前の地質環境の初期情報を取得するため、サイト特性調査段階においても実施され、その後の変動を把握するために、建設、操業の各段階で継続して行われる。この際、処分サイトの地質環境に擾乱をできるだけ与えないようにするため、ボーリング孔の数は必要最小限にとどめるよう留意し、たとえばサイト特性調査で用いられる地表や地下坑道からのボーリング孔の一部を利用するなどの配慮が必要である。</li> <li>・第2次取りまとめでは、人工バリアの直接的なモニタリングは、想定していない。<br/>精密調査地区で建設される地下施設、または最終処分施設建設地で建設される地下施設における「工学技術の実証」では、人工バリア内に計測機器を埋設したモニタリングを仮定することができ、その周辺(外側)の岩盤内からのモニタリングとあわせて、人工バリアの挙動や性能発揮の予測などに関する最終的な確認が行われるものと考えられる。<br/>それまでに、人工バリアの長期挙動に関するデータなどによる知見を蓄積するとともに、人工バリアの周辺部からその健全性を見極めるモニタリング手法などを確立する必要がある。</li> </ul> |

### 5.3.2 人工バリア性能確認モニタリングのロジック

5.3.1 で整理したモニタリングに関する現状の理解を踏まえ、人工バリアの設計や製作・施工の各工程で人工バリアの所期の性能を発揮させるために何に着目し、何を確認したうえで次工程に進めるのかなどについて検討・整理し、処分場の各工程ごとの安全確保のあり方を取りまとめる。その整理した内容を踏まえて、人工バリア定置後の性能確認モニタリングで何を確認するのかや、人工バリア性能確認モニタリングの位置づけ、目的などについて検討するとともに、実証エリアを設けて代表させる人工バリアでモニタリングを行うのかなどについても検討を行う。今後の安全規制などの議論における材料提供に資することができるように、以上の検討結果を論理立て流れをもって示すことによって、ロジックを構築する。

処分場の各工程ごとの安全確保のあり方を表 5.3- 3～表 5.3- 6 に示す。

オーバーパックおよび緩衝材といった人工バリアは、それぞれ長期安全性の確保の観点から期待される性能あるいは要件に基づいて、その性能あるいは要件を満足するように、安全裕度をもって設計が行われる。その設計項目は、オーバーパックおよび緩衝材に期待される性能あるいは要求に対応したものとなっており、人工バリアの性能・品質に関する設計上のコントロールポイントとなっている。

人工バリアの製作段階においては、人工バリアの性能・品質に関する設計上のコントロールポイントを満たすように製作がなされ、製作方法などに起因する製作上のコントロールポイントが追加される。これら人工バリアの性能・品質に関する設計上・製作上の両方のコントロールポイントが、製作時における品質管理や検査の対象となる。

人工バリアの定置段階になると、所定の性能を発揮するように意図されて設計、製作された人工バリアを、設計で意図したとおりの位置に定置することとなる。この段階では、人工バリアの性能発揮に有意な影響を与えないように、設計された位置に（精度で）定置することが、人工バリアの性能・品質に関する定置上のコントロールポイントとなる。

このように、安全評価の前提となる、あるいは安全評価上期待される人工バリアの性能・品質は、人工バリアの設計、製作段階のコントロールポイントによって左右される。

人工バリアの定置段階において重要な点は、人工バリアの定置によって人工バリアへのアクセスが困難となることである。その意味で、人工バリアを定置するその瞬間が、人間が直接的に関わることができる、人工バリアの性能・品質に関する最後のコントロールポイントとなる。

また、長期安全性の確保という最終目標の下に期待される性能が発揮されるように意図されて設計、製作・施工（定置）がなされた人工バリアの性能については、安全評価によって確認が行われる。地層処分はきわめて長い時間スケールを対象とするため、安全評価では、シナリオに基づく予測によって人間への影響を論じ、システムの安全性を示すことが

行われる。このため、地層処分の安全性は間接的に実証されるといわれる（OECD/NEA, 1983）。なお、ここでいう「予測」とは、将来の人間への影響をいいあてるのではなく、地層処分の安全性の判断材料を提供するためのものであること、また安全評価で計算される線量は、将来の人間が実際に被ると考えられる線量を予測したものではなく、処分場の影響が今日現れるとしたらどの程度のものとなるかを示すものであることに留意する必要がある。この意味から、このように計算された線量は安全基準に定められた防護レベルと比較して地層処分の安全性を判断するための1つの指標であるというのが共通の認識である（たとえば、IAEA, 1989；OECD/NEA, 1991）。

以上の文脈から、人工バリア性能確認モニタリングに期待される目的としては、人工バリア性能確認モニタリングそのものが長期安全性を担保するものではなく、（定置直後から閉鎖までの期間に）人工バリアが性能を発揮するための前提条件と、性能発揮にともなう挙動が予測した範囲内にあることを確認することと考えた。そのモニタリングで得られたデータや建設・操業段階の品質管理データなどを用いた安全評価によって安全性の判断がなされるものと考えられる。

このようなモニタリングについて、第2次取りまとめ（JNC, 1999）では人工バリア周辺部でのモニタリングを提案している。また、5章で調査、分析を行った国際機関や諸外国のうち、IAEAは、人工バリアの変遷をモニタリングするためのアクセスは、人工バリアの長期性能への否定的な影響を有する人工バリアの貫通を意味するため、人工バリアのモニタリングは克服できない困難があると指摘し、この解決策の1つとして、処分場の一部（あるいはさまざまな岩盤の状態を反映するために各部）あるいは同じ母岩の近い場所の専用の実証施設でのモニタリングを提案している（IAEA, 2001）。

これらの考え方を踏まえると、人工バリア性能確認モニタリングでは、人工バリアの中に直接計器を入れると、計測ケーブルに沿った水みちなどが形成されるおそれがあり、安全性に影響を及ぼす可能性があるため、人工バリアの中に計器を入れずに、人工バリア周辺の岩盤内から間接的に、人工バリアの性能発揮に関連する項目や人工バリアの性能発揮に伴って変化する項目を測定することが望ましいと考えられる。

この考え方の流れによれば、別途計画がなされている幌延深地層研究センターや諸外国における地下研究所などにおいて、人工バリア内に設置した計測機器による人工バリア挙動・健全性の直接的なモニタリングと、その周辺部での間接的なモニタリングを行い、その関係を明らかにすることによって、人工バリア性能確認モニタリングの有効性を確認することが重要と考えられる。モニタリング測定項目としては、安全評価あるいは設計で着目している人工バリアとその周辺岩盤における熱 水 応力 化学に関わる測定可能な項目となる。

以上で述べてきたような人工バリア性能確認モニタリングは、長期安全性を直接的に保証するものではなく、人工バリア定置直後から操業終了時までの期間に得られたデータによって、安全評価の結果の一部を実証するものと位置づけられる。具体的には、操業段階以降のオーバーパック・緩衝材の品質管理および人工バリア性能確認モニタリングなどで得られたデータを用いて人工バリアの健全性の評価を行い、人工バリア性能確認モニタリングで得られたデータは、閉鎖の意思決定を行う際の安全評価結果の妥当性確認のためのデータとして利用されるものと位置づけた。安全評価結果の妥当性確認の方法としては、たとえば、安全評価あるいは設計における 1 本の曲線で表現される予測値と人工バリア性能確認モニタリングによる実測値との比較評価などが考えられる。

オーバーパックについては、定置直後から閉じ込め性能が発揮され（定置直後から機能の劣化が始まっており）、その意味で性能に直結した、たとえば、腐食電流などのデータの測定が考えられる。一方、緩衝材については、定置直後から閉鎖までの期間は、性能が発揮されるまで（前）のトランジェントな状態にあり、性能確認という点でモニタリングの難しさがある。これらの点に留意が必要と考える。

表5.3- 3 処分場の各工程ごとの安全確保のあり方 (1)

| 処分場の段階   | 処分場の状態   | オーバーパックの設計、製作  | 緩衝材の設計、製作・施工  | 人工バリア性能確認モニタリング   | 性能評価・安全評価  |
|--|--|--|---|---|--|
| 最終処分施設建設地の選定の段階<br>(概要調査地区の選定から精密調査地区における地表からの詳細調査および地下施設での詳細調査などの前段階を含めて考える。) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・詳細調査のための地下施設までのアクセス坑道が建設されている。</li> <li>・詳細調査のための地下施設が建設されている。</li> <li>・上記のアクセス坑道、地下施設の建設により、処分サイトの本来備えている地質環境条件から以下の点で変遷が開始している。<br/>熱・力学<br/>水理<br/>地下水地球化学<br/>物質移動</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・オーバーパックの設計、製作に必要なデータの蓄積が行われている。</li> <li>・詳細調査のための地下施設におけるオーバーパックの設計、製作に必要なデータの取得が行われる。</li> <li>・オーバーパックの設計までに必要なデータ(設計側からの要求)としては、最終処分施設建設地の地下環境における地下水の地球化学的特性に対応した腐食速度(実測値または予測値)<br/>緩衝材の圧密曲線(実測値または予測値)<br/>岩盤のクリープ変形量(実測値または予測値)<br/>などが挙げられる。</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材の設計、製作・施工に必要なデータの蓄積が行われている。</li> <li>・詳細調査のための地下施設における緩衝材の設計、製作・施工に必要なデータの取得が行われる。</li> <li>・緩衝材の設計までに必要なデータ(設計側からの要求)としては、最終処分施設建設地の地下環境における地下水の地球化学的特性に対応した緩衝材の乾燥密度と透水係数の関係(実測値または予測値)<br/>地下水の地球化学的特性に対応した緩衝材の乾燥密度と膨潤圧、膨潤量の関係(実測値または予測値)<br/>緩衝材の圧密曲線(実測値または予測値)<br/>岩盤のクリープ変形量(実測値または予測値)<br/>などが挙げられる。</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・人工バリアの設置環境としての地質環境のモニタリングは開始されている。</li> <li>・想定される地質環境のモニタリング項目としては、少なくとも以下の項目が考えられる。<br/>地下水位(水圧)<br/>地下水温<br/>pH、Eh<br/>初期地圧測定後の岩盤応力の変化<br/>地震動(加速度)</li> <li>・人工バリア性能確認モニタリングの有効性を確認するための試験、計測が、最終処分施設建設地における詳細調査のための地下施設などで実施される。この試験、計測は、国内外の地下研究所あるいは原位置試験上でも実施が可能である。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分システムの性能に大きな影響をもたらす事象が生じる可能性のある場所を避けて安定な地質環境を選び、さらに人工バリアの設置環境としてできるだけ好ましい地質環境を選定するといった、<b>地層処分にとって適切な地質環境が選定されている</b>ことを前提としている。</li> <li>・最終処分施設建設地の選定段階では、地層処分にとって適切な地質環境の確認が行われている。人工バリアおよび処分施設の設計に必要なサイト固有の地質環境条件は明らかになっている。</li> <li>・この時点で予備的安全評価が実施される。</li> </ul> |
| 人工バリアおよび処分施設の設計段階  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・最終処分施設建設地における詳細調査のためのアクセス坑道、地下施設の建設により、処分サイトの本来備えている地質環境条件の変遷が継続している。</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・最終処分施設の地下環境条件に応じて、オーバーパックの最も重要な要件である閉じ込め性を支える耐食性と耐圧性という性能(要件)を満たすように、<b>材料選定と、耐食層および耐圧層の厚さ</b>をある程度の安全裕度をもって設計する。</li> <li>・したがって、設計段階では、上記の<b>材料選定と、耐食層および耐圧層の厚さ</b>がオーバーパックの性能・品質に関する設計上のコントロールポイントとなっている。</li> <li>・この段階では、設計の方法(設計手法、解析モデル・コード)と設計に用いたデータの妥当性が、設工認などで審査されると想定される。</li> <li>・設計者の意図として、適切と認められた設計どおりにオーバーパックが製作されれば、オーバーパックに期待された性能が発揮されると考えている。</li> <li>・この時点で欠陥が生じるとすれば、見落としなどによるヒューマンエラーが想定され得る。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材の最も重要な要件である放射性核種の移行抑制を支える低透水性などの性能を満たすように、<b>材料の配合(ケイ砂混合率あるいはベントナイト含有率)、乾燥密度、厚さ</b>をある程度の安全裕度をもって設計する。</li> <li>・これらの設計項目のうち、材料の配合(ベントナイト含有率)と乾燥密度については、緩衝材に期待される性能の多くが、これらの関数として表されることが設計項目として取り上げられる理由となっている。</li> <li>・厚さについては、オーバーパックの耐圧厚さに有意な影響を与えないように設定される。</li> <li>・以上のように、設計段階では、上記の<b>材料の配合(ケイ砂混合率あるいはベントナイト含有率)、乾燥密度、厚さ</b>が緩衝材の性能・品質に関する設計上のコントロールポイントとなっている。</li> <li>・この段階では、設計の方法(設計手法、解析モデル・コード)と設計に用いたデータの妥当性が、設工認などで審査されると想定される。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・人工バリアの設置環境としての地質環境のモニタリングが継続される。</li> <li>・人工バリア性能確認モニタリングの有効性を確認するための試験、計測が継続される。</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・安定な地質環境に、<b>性能に余裕をもたせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築</b>することを前提としている。</li> <li>・設計された人工バリアの性能は<b>安全評価によって確認</b>される。もし期待される性能に達しない場合や、安全性と経済性の観点からさらに合理性が求められる場合は、設計にフィードバックされる。</li> </ul>   |

表5.3- 4 処分場の各工程ごとの安全確保のあり方 (2)

| 処分場の段階                 | 処分場の状態   | オーバーパックの設計、製作  | 緩衝材の設計、製作・施工   | 人工バリア性能確認モニタリング   | 性能評価・安全評価  |
|------------------------|--|--|--|---|--|
| 人工バリアおよび処分施設の設計段階（続き）  | （前頁参照）   | （前頁参照）   | <ul style="list-style-type: none"> <li>設計者の意図として、適切と認められた設計どおりに緩衝材が製作・施工されれば、緩衝材に期待された性能が発揮されると考えている。</li> <li>この時点で欠陥が生じるとすれば、見落としなどによるヒューマンエラーが想定され得る。</li> </ul>  | （前頁参照）  | （前頁参照）   |
| 最終処分施設の建設段階、人工バリアの製作段階 | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終処分施設建設地における連絡坑道、主要坑道、処分坑道、処分孔など最終処分施設の建設に伴い、処分サイトの本来備えている地質環境条件の変遷（あるいは擾乱）が継続している。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>設計されたオーバーパックを、<b>性能・品質に関する設計上のコントロールポイントを満足するように</b>製作する。</li> <li>オーバーパックの製作時においては、オーバーパックの構造上、<b>溶接部に有害な欠陥が生じないように</b>製作を行う。同様に母材については、母材の製作時に<b>母材に有害な欠陥が生じないように</b>製作する。</li> <li>したがって、<b>オーバーパック製作上の性能・品質に関するコントロールポイント</b>はつぎの項目が挙げられる。<br/> <b>母材、溶接金属の材料</b><br/> <b>耐食層と耐圧層の厚さ（形状、寸法）</b><br/> <b>母材、溶接部の有害な欠陥の有無</b></li> <li>上記のオーバーパック製作上の性能・品質に関するコントロールポイントは、製作時の品質管理・検査によって管理される。<br/> <b>材料 検査成績書管理、非破壊検査</b><br/> <b>厚さ（形状、寸法） 寸法検査</b><br/> <b>欠陥の有無 非破壊検査</b></li> <li>オーバーパック製作上の性能・品質に関するコントロールポイントについて、製作時の品質管理・検査によって、設計・製作上期待される性能・品質に達しない場合は、棄却される。</li> <li>品質管理・検査を通して欠陥率が統計することができ、安全評価に反映することが可能である。</li> <li>製作者の意図として、適切な品質管理・検査の下に、設計どおりにオーバーパックが製作できれば、オーバーパックに期待された性能が発揮されると考えている。</li> <li>この時点で欠陥が生じるとすれば、見落としなどによるヒューマンエラーが想定され得る。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>設計された緩衝材を、<b>性能・品質に関する設計上のコントロールポイントを満足するように</b>製作する。</li> <li>緩衝材の製作時においては、緩衝材の性質上、<b>目標とする乾燥密度が達成できるように（最適含水比となるように）水分量の調整を行いながら</b>製作を行う。</li> <li>したがって、<b>緩衝材製作上の性能・品質に関するコントロールポイント</b>はつぎの項目が挙げられる。<br/> <b>ベントナイト、ケイ砂の材料（材質）</b><br/> <b>材料の配合</b><br/> <b>乾燥密度</b><br/> <b>緩衝材の厚さ（形状、寸法）</b><br/> <b>水分量</b></li> <li>上記の緩衝材製作上の性能・品質に関するコントロールポイントは、製作時の品質管理・検査によって管理される。<br/> <b>材料 検査成績書管理、材料検査（試験）</b><br/> <b>配合 練混ぜ時の各材料の重量測定</b><br/> <b>乾燥密度 混合材料の投入量の測定、あるいは製作（締固め）後の密度検査（試験）</b><br/> <b>厚さ（形状、寸法） 寸法検査</b><br/> <b>水分量 練混ぜ時の水の重量測定、あるいは含水比の検査（試験）</b></li> <li>ここで、緩衝材の乾燥密度に関する品質管理・検査について、緩衝材の製作時までに、製作時の締固め力に対応したベントナイト、ケイ砂および水の投入量と乾燥密度との関係が得られていれば、製作後の密度検査の必要性は低下する。このような方法は、製作の進展に伴い、段階的に導入することも考えられる。</li> <li>緩衝材製作上の性能・品質に関するコントロールポイントについて、製作時の品質管理・検査によって、設計・製作上期待される性能・品質に達しない場合は、棄却される。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>人工バリア性能確認モニタリングの有効性を確認するための試験、計測が継続される。</li> <li>最終処分施設では、<b>人工バリア性能確認モニタリングに適切な場所が選定され、必要な計測機器が設置された後、初期状態の計測が開始される。</b></li> <li>人工バリア性能確認モニタリングを実施する場所としては、詳細調査のための地下施設が選定される可能性もある。あるいは処分パネルが設置される区域で代表的な地下環境条件の位置、またはその区域の中で地下環境条件が複数にわたって変化する場合はそれぞれ代表的な位置が選定される可能性がある。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>安定な地質環境に、<b>性能に余裕をもたせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築</b>することを前提としている。</li> <li>この段階では、設計どおりに人工バリアが製作されていれば、人工バリアの期待される性能が発揮され、その性能は設計段階で行った安全評価の結果と同じとなる。</li> <li>この段階では、人工バリアの製作時に統計された欠陥率や不良率による安全性への影響を安全評価によって評価することが可能である。</li> </ul> |

表5.3- 5 処分場の各工程ごとの安全確保のあり方 (3)

| 処分場の段階                           | 処分場の状態  | オーバーパックの設計、製作  | 緩衝材の設計、製作・施工   | 人工バリア性能確認モニタリング  | 性能評価・安全評価   |
|----------------------------------|---|--|--|--|---|
| 最終処分施設の建設段階、人工バリアの製作段階(続き)       | (前頁参照)  | (前頁参照)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>品質管理・検査を通して不良率を統計することができ、安全評価に反映することが可能である。</li> <li>製作者の意図として、適切な品質管理・検査の下に、設計どおりに緩衝材が製作できれば、オーバーパックに期待された性能が発揮されると考えている。</li> <li>この時点で欠陥が生じるとすれば、見落としなどによるヒューマンエラーが想定され得る。</li> </ul>  | (前頁参照)   | (前頁参照)  |
| 処分場の操業(人工バリアの定置、処分孔・処分坑道の埋め戻し)段階 | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終処分施設では、人工バリアの定置に引き続き、処分坑・主要坑道の埋め戻しが行われる。</li> <li>最終処分施設における人工バリアの定置、処分坑道・処分孔の埋め戻しによって、埋戻しが行われた場所から、<b>処分サイトの本来備えている地質環境条件の回復に向かったの変遷が始まる。</b></li> <li>人工バリアが定置された処分孔・処分坑道では、<b>ガラス固化体の発熱に伴う温度上昇</b><br/><b>オーバーパックの腐食</b><br/><b>オーバーパックの腐食に伴う水素ガスの発生</b><br/><b>温度勾配による緩衝材内側からの緩衝材中の水分移動</b><br/><b>緩衝材外側からの地下水の浸潤</b>が開始する。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>設計、製作されたオーバーパックを<b>設計された位置に(精度で)</b>定置する。</li> <li>オーバーパック定置上の性能・品質に関する<b>コントロールポイント</b>はつぎの項目が挙げられる。<br/><b>定置位置(精度)</b></li> <li>上記のオーバーパック定置上の性能・品質に関するコントロールポイントは、定置時の品質管理・検査によって管理される。</li> <li><b>定置位置(精度) 遠隔操作でのビデオカメラでの目視確認、書類・映像の記録</b></li> <li>オーバーパック定置上の性能・品質に関するコントロールポイントについて、定置時の品質管理・検査によって、設計上期待される性能・品質に達しない場合は、再定置が行われるものと想定される。</li> <li>オーバーパックの定置は、オーバーパックの性能・品質に人間が関わる最後の作業となる。この作業の後の段階になると、処分孔や処分坑道は緩衝材あるいは埋め戻し材で埋め戻されているため、廃棄体へのアクセスは困難となる。</li> <li>したがって、<b>オーバーパックを定置する時点がオーバーパックの性能・品質に関する最後のコントロールポイント</b>となる。</li> <li>定置作業責任者の意図として、適切な品質管理・検査の下に、設計どおりに製作されたオーバーパックが設計どおりに定置できれば、オーバーパックに期待された性能が発揮されると考えている。</li> <li>この時点で欠陥が生じるとすれば、定置ミスの見落としなどによるヒューマンエラーが想定され得る。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>ブロック方式および一体型方式の緩衝材の場合は、設計、製作された緩衝材を<b>設計された位置に(精度で)</b>定置する。</li> <li>緩衝材定置上の性能・品質に関する<b>コントロールポイント</b>はつぎの項目が挙げられる。<br/><b>定置位置(精度)</b></li> <li>上記の緩衝材定置上の性能・品質に関するコントロールポイントは、定置時の品質管理・検査によって管理される。</li> <li><b>定置位置(精度) 遠隔操作でのビデオカメラでの目視確認、書類・映像の記録</b></li> <li>現地締め固め方式およびベレット充填方式の緩衝材の場合は、原位置で緩衝材を締め固めあるいは充填によって定置するため、この段階で緩衝材の製作と定置が同時に行われる。したがって、これらの方式の場合は、<b>緩衝材定置上の性能・品質に関するコントロールポイントに加えて、緩衝材製作上の性能・品質に関するコントロールポイントを同時に管理する必要がある。</b></li> <li>緩衝材製作上の性能・品質に関するコントロールポイントについて、製作時の品質管理・検査によって、設計上期待される性能・品質に達しない場合は、再定置が行われるものと想定される。</li> <li>緩衝材の定置は、緩衝材の性能・品質に人間が関わる最後の作業となる。この作業の後の段階になると、処分孔や処分坑道は緩衝材あるいは埋め戻し材で埋め戻されているため、緩衝材や廃棄体へのアクセスは困難となる。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>人工バリア性能確認モニタリングの有効性を確認するための試験、計測を完了し、その有効性について結論がなされている。</li> <li>最終処分施設では、人工バリア性能確認モニタリングが継続される。</li> <li>この段階においては、人工バリア性能確認モニタリングで人工バリアの定置前後とそれ以降における変化が測定される。</li> <li>操業段階の終了時点においては、<b>人工バリア性能確認モニタリングでそれまでに得られた情報が、「最終処分施設の状況が経済産業省令で定める基準に適合していることについて経済産業大臣の確認を受け」ること、および「安全評価の結果が妥当であることの確認」のために提供されることが想定される。</b></li> <li>以上の文脈から、人工バリア性能確認モニタリングの目的は、人工バリアが性能を発揮するための前提条件と、性能発揮にともなう挙動が予想した範囲内にあることを確認することが考えられる。</li> <li>また、第2次取りまとめの考え方によれば、人工バリアの周辺部からの間接的な方法で人工バリアの健全性の確認を行うことを想定している。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>安定な地質環境に、<b>性能に余裕をもたせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築</b>することを前提としている。</li> <li>この段階では、設計どおりに人工バリアが製作され、施工(定置)されていれば、人工バリアの期待される性能が発揮され、その性能は設計段階で行った安全評価の結果と同じとなる。</li> <li>操業段階の終了時点においては、「最終処分施設の状況が経済産業省令で定める基準に適合していることについて経済産業大臣の確認を受け」るために、人工バリアの<b>製作・施工(定置)の最終的な状態を反映した安全評価</b>が行われることが想定される。</li> <li>操業段階の終了時点においては、「最終処分施設の状況が経済産業省令で定める基準に適合していることについて経済産業大臣の確認を受け」るために、人工バリアの設計、製作・施工時の品質管理・検査、人工バリア性能確認モニタリングなどのモニタリングおよび安全評価によって得られた情報が書類として取りまとめられ、提供されることが想定される。</li> </ul> |

表5.3-6 処分場の各工程ごとの安全確保のあり方 (4)

| 処分場の段階                                      | 処分場の状態  | オーバーパックの設計、製作 | 緩衝材の設計、製作・施工   | 人工バリア性能確認モニタリング  | 性能評価・安全評価     |
|---|---|---------------|--|--|---------------|
| <p>処分場の操業（人工バリアの定置、処分孔・処分坑道の埋め戻し）段階（続き）</p> | <p>（前頁参照）</p>   | <p>（前頁参照）</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>したがって、<b>緩衝材を定置する時点が緩衝材の性能・品質に関する最後のコントロールポイント</b>となる。</li> <li>定置作業責任者の意図として、適切な品質管理・検査の下に、設計どおりに製作された緩衝材が設計どおりに定置できれば、緩衝材に期待された性能が発揮されると考えている。</li> <li>この時点で欠陥が生じるとすれば、施工不良などの見落としなどによるヒューマンエラーが想定され得る。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>したがって、人工バリア性能確認モニタリングの有効性を確認するための試験、計測では、人工バリア内に設置した計測機器による人工バリア挙動・健全性の直接的なモニタリングと、その周辺部での間接的なモニタリングを行い、その関係を明らかにすることが目的として考えられる。</li> <li>実際の処分場では人工バリアを直接的にモニタリングすることは望まれていない。実証エリアがあるとなれば、そこでの直接的・間接的な方法を組み合わせたモニタリングは想定され得る。</li> </ul> | <p>（前頁参照）</p> |
| <p>処分場の閉鎖段階以降の段階</p>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終処分施設では、連絡坑道、アクセス坑道、ボーリング孔と順次埋め戻しが行われ、最終的に地上施設が解体・撤去される。</li> <li>最終処分施設建設地では、各坑道の埋め戻しによって、<b>処分サイトの本来備えている地質環境条件の回復に向かった変遷が継続する。</b></li> <li>この段階の人工バリアの状態の変遷は以下のように想定される。 <ul style="list-style-type: none"> <li>ガラス固化体の発熱に伴う温度上昇（定置後約 10～40 年）</li> <li>オーバーパックの腐食の進展（定置直後～数千年）</li> <li>オーバーパックの腐食の進展に伴う水素ガスの発生（定置直後～数千年）</li> <li>温度勾配による緩衝材内側からの緩衝材中の水分移動（定置直後～2 年程度）</li> <li>緩衝材外側からの地下水の浸潤（定置後 50 年程度でほぼ飽和）</li> <li>ガラス固化体の発熱量の減少に伴う温度降下（定置後約 10～40 年以降、1 万年程度まで）</li> </ul> </li> </ul> |               |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終処分施設では、必要に応じて人工バリア性能確認モニタリングが継続される。</li> <li>閉鎖段階では、人工バリアの定置後における変化が継続して測定される。</li> </ul>   |               |



## 6. 人工バリア性能確認モニタリングの検討

### 6.1 概要

5.3 節で構築したモニタリングに関するロジックに基づき、人工バリア性能確認モニタリングによる安全確保のための具体的なモニタリング項目を抽出する。ここでは、モニタリング方法として直接的な測定と間接的な測定の考え方を提示するとともに、処分場を対象としたモニタリング方法として、間接的な測定によるモニタリング項目について検討する。

さらに、処分場を対象とした人工バリア性能確認モニタリングにおける各種測定技術、地質環境のモデル化・評価技術の検証の場として、幌延深地層研究センターでの試験を視野に入れ、幌延での試験の目的、具体的な測定項目、現状での計測技術に関する情報を整理する。この際、人工バリアの構成要素ごとに具体的なモニタリング項目を抽出できるか試み、その結果に応じて幌延での検証に適用する具体的な測定項目などの検討を行うこととする。

### 6.2 モニタリング項目の検討

#### 6.2.1 オーバーパック

##### (1) オーバーパック性能確認モニタリングの定義

オーバーパックに要求される機能は閉じ込めを維持するための、耐圧性と耐食性である。高レベル放射性廃棄物地層処分は、低レベル放射性廃棄物の管理型処分とは異なり、本来備わっている受動的な安全性という概念に基づいている(OECD/NEA, 2001)ため、地層処分の基本原則に依拠すれば、処分場の閉鎖完了以降に関してはモニタリングの動機はないと考えられる。一方、地下研究施設やスウェーデンの概念のように操業初期段階で定置したオーバーパックに関しては、定置後、処分場の閉鎖までに数十年を経過することから、オーバーパックの健全性確認という観点でモニタリングにより取得したデータは有効活用することが可能であると考えられる。モニタリングにより得られたデータは、オーバーパックの健全性を裏付ける資料であり、処分場閉鎖の可否を判断する材料としての利用が考えられる。

本検討では、オーバーパックのモニタリングはオーバーパックの健全性を確認することが目的であるという前提でモニタリング項目を抽出した。オーバーパックの健全性を確認するモニタリングの方法としては、直接的な測定と間接的な測定が考えられる。

直接的な測定とは、オーバーパックそのものを対象とした腐食挙動の測定や放射性核種の移行の有無の測定である。また、間接的な測定は、オーバーパックの使用環境を測定し、設計時に想定した処分環境と実際の環境との差異を評価し、使用環境として適切な環境が維持されているかどうかと、オーバーパックの健全性を確認するものである。

## (2) 直接的な測定項目

直接的な測定項目としては、オーバーパック外周部（緩衝材とオーバーパックとの境界）における環境測定が考えられる。具体的には応力、間隙水圧、温度、間隙水組成、pH、自然腐食電位などを測定することによりオーバーパックの圧力状態、腐食の進行状態を直接的に確認することが考えられる。

この方法の場合、オーバーパックの実際の状態を測定可能であるという利点を有するが、測定用のセンサーのケーブルを緩衝材を貫通して外部に取り出す必要があることから、緩衝材に水みちを形成するなど、悪影響を及ぼす可能性があるという課題を有する。

## (3) 間接的な測定項目

オーバーパックの健全性に関するモニタリング項目のうち、間接的な測定項目としては、人工バリア外周部（緩衝材と坑道との境界）における環境測定が考えられる。具体的には人工バリア外周部での応力、間隙水圧、温度、人工バリアからの地下水の出入り部それぞれの間隙水組成、pHなどを測定することにより人工バリア内部の圧力状態、電気化学的な状態を確認することが考えられる。

この方法の場合、人工バリア外周部での測定を実施することから、人工バリアへの悪影響を最小限に抑えることが可能であるが、測定用のセンサーのケーブルが緩衝材と坑道との境界に位置することが安全性に及ぼす影響は否定できない。そのため、後述する緩衝材を対象とした間接的な測定により必要となるデータを得ることが望ましい。

また、間接的なデータからオーバーパックの状態を推定するため、オーバーパックの実際の状態との誤差が直接的な測定と比較して大きいという課題を有する。

## (4) オーバーパックモニタリングに関わる課題

前述のとおり、直接的な測定では人工バリアシステムそのものへの悪影響が想定されることから、処分場を対象とした人工バリア性能確認モニタリングでは、間接的な測定を前提とすることが望ましい。間接的な測定項目の測定値からオーバーパック外周部（緩衝材とオーバーパックとの境界）における腐食挙動を推定するためには、間接的な測定項目とオーバーパック外周部（緩衝材とオーバーパックとの境界）における腐食挙動との関係を実験データに基づくモデル化などにより把握しておく必要がある。

間接的な測定を補完するモデル化手法の構築のためには、ベントナイト共存下での腐食試験データの取得が必要である。表 6.2-1 にオーバーパックモニタリングに関する要素試験の段階的な実施案を示す。処分場を対象とした人工バリア性能確認モニタリングに向けて、2 ケースの室内試験および原位置試験の3つの要素試験を組み合わせることにより、モデル化手法の構築、検証を完了する。後述する幌延深地層研究センターでの原位置試験は、表中の原位置要素試験に対応し、間接的な測定手法、それを補完するモデル化手法の検証を目的とする。

表6.2- 1 オーバーパックモニタリングの要素試験

| 項目                 | 内容  |
|--------------------|---|
| 室内試験 1<br>( 常温常圧 ) | 緩衝材共存下でのオーバーパックの腐食挙動を模擬した試験を実施する。<br>試験条件は常温、常圧の処分環境模擬水溶液を使用する。<br>本試験結果に基づき緩衝材外周部における間接的な測定項目とオーバーパック外周部における直接的な測定項目との関連性のモデルを構築する。                |
| 室内試験 2<br>( 高温高圧 ) | 緩衝材共存下でのオーバーパックの腐食挙動を模擬した試験を実施する。<br>試験は処分環境模擬水溶液を使用し、試験条件は処分環境模擬条件（高温、高圧）で実施する。<br>本試験で測定したデータは、間接的な測定項目と直接的な測定項目との関連性のモデルの精度向上に資する。               |
| 原位置試験              | 原位置で緩衝材中に模擬オーバーパックを定置し、室内試験同様にオーバーパックの腐食挙動を模擬した試験を実施する。あらかじめ測定した処分環境条件に基づきモデルを用いて予測した結果と実際の測定値との差異を考察することにより、間接的な測定項目と直接的な測定項目との関連性のモデルのさらなる精度向上を測る |
| 人工バリア性能確認モニタリング    | 処分場において、緩衝材中にオーバーパックを定置し、人工バリア性能をモニタリングする。間接的な測定を基本とし、オーバーパックに関しては腐食挙動などをモニタリングする。  |

注) オーバーパックが高温常圧にある状態での試験は、現在、サイクル機構において実施されている。

## 6.2.2 緩衝材

### (1) 緩衝材性能確認モニタリングの考え方

緩衝材に要求される最も重要な要件あるいは性能は放射性核種の移行抑制であり、それを支える、あるいは維持するために、低透水性や膨潤性などの性能が求められている。高レベル放射性廃棄物地層処分は、低レベル放射性廃棄物の管理型処分とは異なり、本来備わっている受動的な安全性という概念に基づいている（OECD/NEA, 2001）ため、地層処分の基本原則に依拠すれば、処分場の閉鎖完了以降に関してはモニタリングの動機はないと考えられる。しかしながら、6.2.1(1) で述べたように、操業初期段階で定置したオーバーパックや緩衝材に関しては、定置後、処分場の閉鎖までに数十年を経過することから、オーバーパックや緩衝材の健全性の確認という観点でモニタリングにより取得したデータは有効活用することが可能であると考えられる。モニタリングにより得られたデータは、緩衝材の健全性を裏付ける資料であり、処分場閉鎖の可否を判断する材料としての利用が考えられる。

ここでは、緩衝材性能確認モニタリングは、緩衝材が性能を発揮するための前提条件と、性能発揮にともなう挙動が予測した範囲内にあることを確認することを目的とするという前提で、緩衝材の性能発揮に関連する項目と緩衝材の性能発揮によって変化する項目という観点から、モニタリング項目を抽出した。5.3.2 で述べたように、緩衝材性能確認モニタリングの方法としては、間接的な測定を主体とするが、そのモニタリング方法を確立するまでの段階では、直接的な測定も考えられる。間接的な測定では、測定したデータから設計時に想定した処分環境と実際の環境との差異（緩衝材の性能発揮に関連する項目）を評価し、緩衝材の設置環境として適切な環境が維持されているかどうかを確認すること、および測定したデータから人工バリアの周辺岩盤の熱 水 応力 化学に関する設計時に予測した挙動と実際の挙動との差異（緩衝材の性能発揮によって変化する項目）を評価し、緩衝材に期待された性能が発揮されているかどうかを確認することが考えられる。また、直接的な測定としては、緩衝材中の温度、水分量、膨潤圧力の測定などが考えられる。

### (2) 直接的な測定項目

直接的な測定項目のうち、緩衝材の性能発揮に関わる項目としては、緩衝材中における間隙水の化学組成、pH、Eh が挙げられる。これらは、緩衝材に期待される低透水性や膨潤性に影響を及ぼすため、測定項目として抽出した。

緩衝材の性能発揮によって変化する項目としては、緩衝材中の膨潤圧力、温度、含水比、間隙水圧および周辺岩盤中の応力、地下水温、間隙水圧が挙げられる。これらの測定項目については、国内外の緩衝材に関する試験などですでに実績がある（たとえば Y. Sugita et al., 1997 ; ENRESA, 2000 ; K. Ando et al., 2001 ）。

直接的な方法の場合、緩衝材の実際の状態を測定可能であるという利点を有するが、測定用センサーのケーブルを緩衝材を貫通して外部に取り出す必要があることから、緩衝材

に水みちを形成するなど、悪影響を及ぼす可能性があるという課題を有する。

### (3) 間接的な測定項目

間接的な測定項目のうち、緩衝材の性能発揮に関わる項目としては、人工バリアの周辺岩盤中における地下水の化学組成、pH が挙げられる。これらは、緩衝材に期待される低透水性や膨潤性に影響を及ぼすため、測定項目として抽出した。

緩衝材の性能発揮によって変化する項目としては、周辺岩盤中の応力、地下水温、間隙水圧が挙げられる。緩衝材の設計で考えているように、周辺岩盤から緩衝材に地下水が浸入し、緩衝材が飽和、膨潤すれば、緩衝材の膨潤圧によって周辺岩盤内の応力場も変化する。この変化はきわめて緩慢であるとともに、微小であると想定される。また、緩衝材の含水比によって緩衝材の熱伝導率が変化することから、緩衝材の性能発揮が進展していれば、設計で予測したように周辺岩盤の温度（地下水温）も変化する。この変化は、表 5.3-6 に示したように、比較的短期間の変化が観察されると考えられる。同様に、緩衝材中への地下水の浸入が進めば、周辺岩盤中の間隙水圧も回復してくると考えられる。この変化は、緩衝材の膨潤圧の進展と同様に、緩慢ではあるものの、静水圧に回復していくことを想定すれば、大きな値を示すものと考えられる。

さらに緩衝材の性能発揮によって変化する項目として、緩衝材中の水分分布を挙げることができる。前述したように、周辺岩盤から緩衝材に地下水が浸入していくにつれて、緩衝材中の水分量は飽和に向かって変化する。これは、通常、直接的に測定している項目であるが、本研究では、間接的な測定手法として、比抵抗トモグラフィーとレーダー（電磁波）トモグラフィーの応用を試みる。

間接的な方法の場合、オーバーバックの項で述べたのと同様の利点、課題がある。また、間接的な測定の場合、緩衝材の性能発揮にともなう挙動の予測解析によって、間接的に測定する項目がどのように変化するかを把握しておく必要がある。さらに、5.3.2 で述べたように、この間接的な方法を確認するためには、人工バリア内に設置した計測機器による人工バリア挙動・健全性の直接的なモニタリングと、その周辺部での間接的なモニタリングを行い、その関係を明らかにすることによって、その方法の有効性を確認することが不可欠である。

### (4) 緩衝材性能確認モニタリングに関わる課題

前述したように、間接的な方法を確認するためには、人工バリア内に設置した計測機器による人工バリア挙動・健全性の直接的なモニタリングと、その周辺部での間接的なモニタリングを行い、その関係を明らかにすることによって、その方法の有効性を確認することが不可欠である。

### 6.3 測定項目、計測技術に関する情報の整備

本節では、処分場を対象とした人工バリア性能確認モニタリングにおける各種測定技術、地質環境のモデル化・評価技術の検証の場として、幌延深地層研究センターでの試験を視野に入れ、幌延での試験の目的、具体的な測定項目、現状での計測技術に関する情報を整理する。

#### 6.3.1 試験の目的

本研究で検討した人工バリア性能確認モニタリングに資する原位置試験の目的は以下のとおりである。

- ・オーバーパックおよび緩衝材モニタリングの間接的な測定手法の開発と検証
- ・間接的なモニタリング手法を補完するモデル化・評価手法の検証

幌延深地層研究センターでは、地層処分研究開発として人工バリアなどの工学技術の検証および地層処分場の詳細設計手法の開発に関わる試験の実施が想定される。地層処分場の詳細設計手法の開発では、人工バリアと周辺岩盤との熱 水 応力 化学連成現象などの調査とモデル化手法の適用・検証試験の実施が考えられ、上記を目的とした原位置試験をその試験に組み込むことが可能である。

#### 6.3.2 測定項目および現状の計測技術情報

原位置試験のレイアウト案を図 6-1 に示す。図中には、オーバーパックおよび緩衝材を対象とした直接的な測定項目に加えて、間接的な測定項目（案）を示している。

オーバーパックおよび緩衝材それぞれの測定項目と現状の計測技術情報について以下に整理する。

##### (1) オーバーパック

オーバーパックを対象とした測定項目を直接的な測定と間接的な測定に分類して、表 6.3-1 に示す。

直接的な測定項目となるオーバーパック外周部（緩衝材とオーバーパックとの境界）および間接的な測定項目となる人工バリア外周部（緩衝材と坑道との境界）の測定に関しては、想定される処分環境条件での測定は既存技術レベルでの対応が可能である。（一部市販品で対応できず、特注品による対応となる。）ただし、長期間にわたるモニタリングを考慮すると、放射線環境を考慮したセンサーの寿命を検討し、必要に応じて交換の対応を考慮する必要がある。

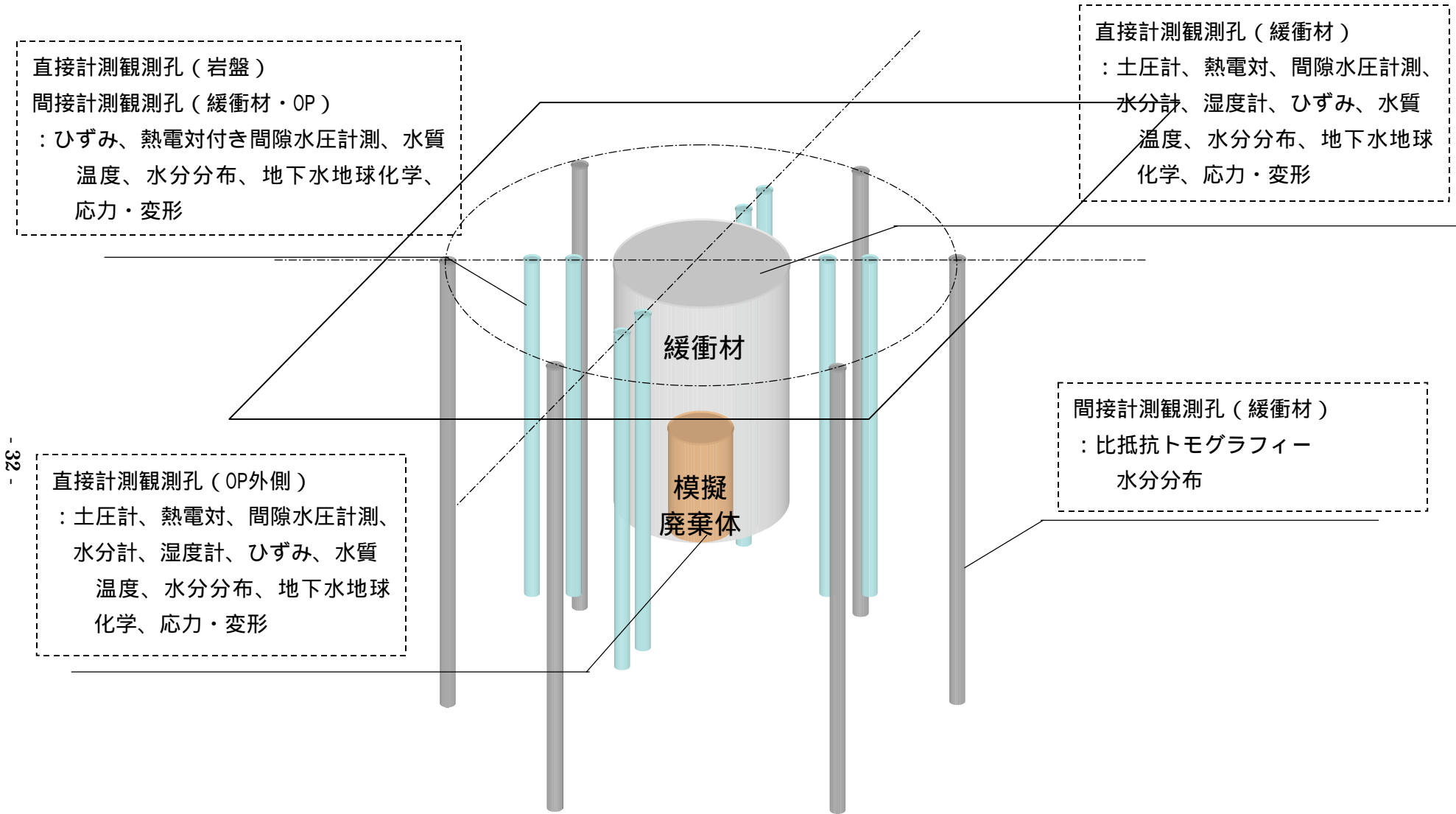


図6-1 原位置試験のレイアウト案

表6.3-1 オーバーパックの測定項目

| 測定目的          | 直接的な計測  | 間接的な計測*                              |
|---------------|---|--------------------------------------|
| オーバーパックの健全性確認 | OP 外周部の環境測定<br>応力、間隙水圧、温度、間隙水組成、pH、自然腐食電位<br>圧力状態、腐食進行状態の確認 | 人工バリア外周部の環境測定<br>応力、間隙水圧、温度、間隙水組成、pH |

注)\*: 緩衝材への計測センサー、ケーブル類設置は性能に影響を与える恐れがあるため、実施は困難である。人工バリア性能確認モニタリングでは、下記の緩衝材の測定項目で補完することが望ましい。

## (2) 緩衝材

緩衝材を対象とした測定項目を直接的な測定と間接的な測定に分類して、表 6.3-2 に示す。直接的な測定および間接的な測定についても、既存技術レベルでの対応が可能である。ただし、水分分布の測定については、これまでに実績がないことから測定の可能性について検討を行うとともに、現有の調査機器の改良等が必要になることが考えられる。

また、長期間にわたるモニタリングを考慮すると、放射線環境を考慮したセンサーの寿命を検討し、必要に応じて交換の対応を考慮する必要がある。

表6.3-2 緩衝材の測定項目

| 測定目的   | 直接的な計測  | 間接的な計測   |
|--|---|--|
| 緩衝材が性能を発揮するための前提条件と、性能発揮にともなう挙動が予測した範囲内にあること | 緩衝材中の環境測定<br>間隙水の化学組成、pH、Eh<br>低透水性・膨潤性の確認<br>膨潤圧力、温度、含水比、間隙水圧<br><br>周辺岩盤の環境測定<br>応力、地下水温、間隙水圧<br>環境変化データの取得 | 緩衝材の環境測定<br>水分分布（比抵抗トモグラフィ＋レーダトモグラフィによる測定）<br><br>周辺岩盤の環境測定<br>地下水化学組成、pH、応力、地下水温、間隙水圧 |



## 7. おわりに

地層処分システムは本質的かつ受動的に安全に設計され、モニタリングを含めた制度的管理に依存すべきではないということは、国際的なコンセンサスが得られた前提条件として存在する。しかしながら、近年、諸外国の例を見ると、社会的な要求などを背景に、モニタリングが求められている。

本研究では、地層処分におけるモニタリングに関する調査を国際機関、諸外国を対象に網羅的に実施するとともに、モニタリングに関する法規制および諸外国の実施主体の取り組みについて取りまとめた。また、人工バリアの性能確認に関連するモニタリングについて、その適用の期間、適用に際する社会的な背景も含めて整理し、わが国における人工バリア性能確認モニタリングのロジックを構築した。人工バリア性能確認モニタリングの検討では、構築したロジックに基づくモニタリング方法、モニタリング項目について整理し、間接的な測定による人工バリア性能確認モニタリングの提案および解決すべき技術課題について示した。さらに、技術課題の解決方策の一例として、幌延深地層研究センターでの試験を視野に入れた原位置試験案について検討した。

諸外国に関する調査の結果を概観すると、現時点において、人工バリアの性能確認を目的としたモニタリングが明確に位置づけられているのは米国だけである。その他の国については、人工バリアの性能確認をモニタリングの明確な目的として定義していない。しかしながら、各国とも、モニタリングと処分事業の可逆性とを関連づけて、地層処分プログラムの意思決定プロセスにモニタリングを組み込む方向で検討が進められ始めている。

モニタリングは、処分場の段階で考えると、閉鎖前( Pre-closure )と閉鎖後( Post-closure )に分けられる。閉鎖後のモニタリングは、制度的管理を必要とせず放射性物質を長期にわたって生物圏から隔離するという地層処分の基本概念に依拠すれば、モニタリングを実施する動機はなく、経済的な優位性を低下させる可能性がある。

閉鎖前のモニタリングに関しては、立地段階から処分場の建設を経て操業終了時までの数十年間にわたりモニタリングによって取得、蓄積される原位置のデータは、安全評価による地層処分の安全性の確認とその信頼性の向上に寄与する。本研究では、人工バリア性能確認モニタリングの目的は、人工バリアが性能を発揮するための前提条件と、性能発揮にともなう挙動が予測した範囲内にあることを確認することと定義した。人工バリア性能確認モニタリングは、人工バリアの定置直後から操業終了時までの初期の段階における人工バリアの性能を実際に計測するものであり、そのモニタリングで得られたデータは、性能評価モデルによる人工バリアの性能予測を確認する実測データとして用いられるものとした。さらに、人工バリア性能確認モニタリングで得られたデータは、建設・操業段階を通じて得られる品質管理データなどとあわせて、安全評価結果の妥当性確認のためのデー

タとして用いられ、その確認結果は閉鎖の意思決定を行う際の判断材料あるいは根拠になると想定した。

また、人工バリア性能確認モニタリングでは、人工バリアの性能発揮に関連する項目と人工バリアの性能発揮にもなって変化する項目を、人工バリア周辺の岩盤内から間接的に測定することを提案した。今後は、別途計画されている幌延深地層研究センターや室内試験などにおいて、人工バリア性能確認モニタリングに関わる直接および間接的な測定を行い、それらの相関関係を明らかにし、処分が実施される時点において、人工バリア周辺の岩盤内から安全評価および設計で着目している熱、水、応力、化学に関わる間接的な測定のみを行い、人工バリアの健全性を評価する手法を確立することが重要と考えられる。

今後の研究開発方針と研究成果の反映について示す。図 7-1 は、処分事業スケジュールに、安全規制に関わる技術基準・指針類の段階的な策定スケジュールをあわせて示したものである。図中の年次については、「高レベル放射性廃棄物の処分に係わる安全規制の基本的考え方（第 1 次報告）」（原子力安全委員会, 2000）を参考に暫定的に設定したものである。

人工バリア性能確認モニタリングの基本的な適用期間としては、2030 年代に予定されている処分場の操業開始から閉鎖前まで（操業期間中）と想定した。安全規制については、今後策定が予定されている安全審査基本指針および安全審査指針において、人工バリアの性能確認などに関連するより具体的な考え方が示されることが想定され得る。

処分事業実施の観点では、安全審査指針などで示される考え方に従い、（必要であれば）人工バリア性能確認モニタリングのより詳細なロジックを構築するとともに、関連するモニタリング技術の開発・検証を展開していく必要があると考えられる。

本研究の成果は、わが国の処分事業スケジュールを見据えた人工バリア性能確認モニタリングのロジックの構築とそのロジックに基づくモニタリング方法などの提案であり、今後の研究では、構築したロジックを補完するモニタリング技術の開発・検証を通して、安全規制に関わる基準・指針類の策定や処分事業の実施に適切に成果を反映することが望まれる。たとえば、精密調査地区の地下施設で予定されている処分技術の実証では、処分場の建設開始前（事業許可申請前）に模擬廃棄体を用いた人工バリア性能確認試験の実施が想定される。限られた期間における確認試験でどのようなモニタリング項目を設定し、長期にわたる人工バリア性能の予測評価をどのように確認していくのかといった技術的な知見（ノウハウ）は、今後の研究成果の適切な反映先と考えられる。さらに、安全規制とも関連して、操業開始後の人工バリア性能確認モニタリングを上記の模擬廃棄体を使用した処分技術の実証試験の継続として実施する（もちろん模擬廃棄体を使用するが）など、処分事業の初期の段階から、技術の信頼性について確認する方策の提示が可能であると考えられる。

図 7-1 には、反映可能と考える研究成果と反映すべき時期についてコメントを示している。

本研究で提案した間接的な測定による人工バリア性能確認モニタリングについては、測定技術、間接測定を補完するモデル化・評価技術など、解決すべき技術課題もあり、処分事業スケジュールを踏まえた室内試験および幌延深地層研究センターなどの地下研究施設での原位置試験研究により段階的な課題解決と測定技術の検証を着実に進めていく必要がある。

[処分事業スケジュール]



概要調査

精密調査

地下施設での調査

処分技術の実証

人工バリア性能確認  
モニタリング

【適切な成果の反映】  
 ・精密調査地区地下施設で行う実証方策の検討  
 ・評価モデルの確証（長期評価のための要素試験）  
 ・原位置モニタリング手法の開発・検証

[幌延スケジュール]

地下研での人工バリア性能確認

室内試験

[安全規制基準・指針類]

『安全審査基本指針』  
(2007)

『処分場の技術基準』  
『安全審査指針』  
(2025)

【適切な成果の反映】  
 ・操業中のモニタリングのロジック構築  
 ・間接計測のための技術開発課題の解決  
 ・評価モデルの確証（長期評価のための要素試験）

注) 図中の(年度)は仮設定

図7-1 処分事業スケジュールと研究成果の反映

参考文献

ANDRA : "Monitoring Technologies Final Report" ( 2001 ).

ANDRA : "Science and Technical Bases for the Reversibility of Geological Disposal",  
Proceedings of International Workshop on Reversibility, Held on November 25-27,  
1998, PARIS, FRANCE ( 1999 ).

CEC : "Pilot Tests on Radioactive Waste Disposal in Underground Facilities", CEC  
Nuclear Science and Technology Report EUR 13985 EN ( 1992 ).

DBE : "Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste in Germany", DBE  
Technology GmbH ( 2001 ).

Decret du 3 aout : "autorisant l'Agence nationale pour la gestion des dechets  
radioactifs a installer et exploiter sur le territoire de la commune de Bure ( Meuse )  
un laboratoire souterrain destine a etudier les formations geologiques profondes ou  
pourraient etre stockes des dechets radioactifs" ( 1999 ).

Decret No 99-687 du 3 aout : "pris pour l'application de l'article 6 de la loi No 91-1381  
du 30 decembre 1991 sur la gestion des dechets radioactifs ( Abroge le decret No  
92-1311 du 17 decembre 1992 ) " - Mission collegiale chargee de mener la concertation  
prealable au choix d'un ou plusieurs sites granitiques ( 1999 ).

電力中央研究所・電気事業連合会:"高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術"( 1999 ).

ENRESA : "FEBEX project, full-scale engineered barriers experiment for a deep  
geological repository for high level radioactive waste in crystalline, final report,  
publicaciones técnicas" ( 2000 ).

Environmental Protection Agency : Proposal Rule 40CFR PART197 "Public Health  
and Environmental Radiation Protection Standards For Yucca Mountain, Nevada"  
( 2001a ).

Environmental Protection Agency : Proposal Rule 40CFR PART194 " Criteria for the  
Cation and-Certification Of The Waste Isolation Pilot Plant's Compliance with The 40  
CFR Part 191 Disposal Regulations" ( 2001b ).

Environmental Protection Agency : Proposal Rule 40 CFR Part 191 "Environmental  
Radiation Protection Standards for Management and Disposal Of Spent Nuclear Fuel,  
High-Level and Transuranic Radioactive Wastes " ( 2001c ).

原子力安全委員会:"高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について

( 第 1 次報告 ) ” ( 2000 ) .

KONTEC Gesellschaft für technische Kommunikation mbH : “Disposal Technologies and Concepts 2000”, DISTEC2000, Proceedings of International Conference on Radioactive Waste Disposal, Held on September 4-6, 2000, Berlin, Germany ( 2000 ) .

IAEA : “Monitoring of Geological Repositories for High Level Radioactive Waste”, IAEA-TECDOC-1208 ( 2001 ) .

IAEA : “Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High-Level Radioactive Wastes”, Safety Series No . 99 ( 1989 ) .

J . B . Grupa D . H . Dodd, J . -M . Hoorelbeke, B . Mouroux,, J . M . Potier, J . Ziegenhagen, J . L . Santiago, J . Alonso, J . J . Fernández, P . Zuidema, I . G . Crossland, B . McKirdy, J . Vrijen, J . Vira, G . Volkaert, T . Papp, and C . Svemar : “Concerted Action on the Retrievability of Long-Lived Radioactive Waste in Deep Underground Repositories”, Final Report, Nuclear Science and Technology, EUR 19145 EN, ISBN 92-828-9466-5 ( 2000 ) .

JNC:”わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ - 総論レポート” , 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-020 ( 1999 ) .

K . Ando, A . Fujiwara, S . Tokuyama, T . Saeki, S . Vomvoris, K . Fukudome, A . Shimmura : “Current Issues for Mined Geological Disposal Systems and their Reversibility, Total System Evaluation of gas generation and migration in the radioactive waste repository”, Proc . Intl . Conf . on” Back-End of the Fuel Cycle : From Research to Solutions”, GLOBAL ( 2001 ) .

NAGRA : Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Influence of Retrievability on Design, Construction and Operation of Final Repositories, Held on October 6-8, 1997, Lucerne, Switzerland ( 1997 ) .

NAGRA : “Nuclear Waste Management in Switzerland-Feasibility Studies and Safety Analysis”, Project Report NGB 85-90, NAGRA, Wettingen, Switzerland ( 1985 ) .

Nuclear Regulatory Commission : Final Rule : 10 CFR Part 63 “Disposal of High-Level Radioactive Waste in Geologic Repository at Yucca Mountain, NEVADA”, Subpart F ( 2001 ) .

Nuclear Regulatory Commission : Proposed Rule : 10 CFR Part 63 “Disposal of High-Level Radioactive Waste in Geologic Repository at Yucca Mountain, NEVADA”,

Subpart F ( 1998 ).

OECD/NEA : "Ad-hoc Group on Retrievability and Reversibility : Considering Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste", Draft Report ( 2001 ).

OECD/NEA : "The Environmental and Ethical Basis of Geologic Disposal", A Collective Opinion of the NEA Radioactive Waste Management Committee ( 1995 ).

OECD/NEA : "Long-Term Management of High-Level Radioactive Waste", The Meaning of a Demonstration ( 1983 ).

Y . Sugita, M . Chijimastu, T . Fujita, H . Ishikawa : "Instrumentation in buffer mass, Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Experiment at Kamaishi Mine", technical note 12-96-05, PNC TN8410 97-072 ( 1997 ).

SCK·CEN : Tour Guide Notebook 6<sup>th</sup> edition, "Studiecentrum Voor Kernenergie Centre d'Etude de l'Energie Nucleaire", CEN HADES ( 1999 ).

SKB : "Integrated Account of Method, Site Selection and Programme Prior to the Site Investigation Phase", SKB Technical Report TR-01-03 ( 2001 ).

SKB : "SR 97 - Waste, Repository Design and Sites . Background Report to SR 97", SKB Technical Report TR-99-08 ( 1999 ).

SKB : "RD&D-PROGRAMME 98 . Treatment and Final Disposal of Nuclear Waste . Programme for Research, Development and Demonstration of Encapsulation and Geological Disposal - Background Report to RD&D-Programme 98 . Detailed Programme for Research and Development 1999-2004" ( 1998 ).

SKB : "Plan 92 : Costs for Management of the Radioactive Waste from Nuclear Power Production", SKB Technical Report TR-92-24 ( 1992 ).

The Granite Mission Team's report to the government ( 2000 )

通商産業省 : 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律, 平成 12 年 6 月 7 日, 法律第 117 号 ( 2000 ).

U . S . Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management : "Yucca Mountain Science and Engineering Report", Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration, DOE/RW-0539 ( 2001a ).

U . S . Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management : "Yucca Mountain Preliminary Site Suitability Evaluation" ( 2001b ).

U . S . Nuclear Regulatory Commission : Proposal Rule 10 CFR Part 60-“Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Proposed Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada” ( 2001a ).

U . S . Nuclear Regulatory Commission : Final Rule 10 CFR Part 63-“Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Proposed Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada” ( 2001b ).

U . S . Nuclear Regulatory Commission : Proposal Rule 10 CFR Part 63-“Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Proposed Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada” ( 1999 ).

U . S . Department of Energy : “Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain” ( 1998 ).

[www . eia . doe . gov/kids/non-renewable/nuclear . html](http://www.eia.doe.gov/kids/non-renewable/nuclear.html) : DOE のホームページ

[http : //www . andra . fr/](http://www.andra.fr/) : ANDRA のホームページ

[http : //www . dba . de](http://www.dbe.de) : DBE のホームページ

[http : //www . posiva . fi](http://www.posiva.fi) : Posiva のホームページ