

## 閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリングのあり方に関する検討

須山泰宏\*1,2 田辺博三\*1 江藤次郎\*1 吉村公孝\*1,3

現在、我が国では原子燃料サイクルの過程で発生する高レベル放射性廃棄物を、数万年以上といった長期にわたり人間の生活環境から隔離するため、地層処分が計画されている。この地層処分施設は、操業安全性と閉鎖後安全性の両方を確保するように設計される必要があり、閉鎖後安全性は施設が閉鎖された後に、モニタリングまたは制度的管理に依存することなく、人工バリアおよび天然バリアによって提供されることとなる。しかしながら、最近では閉鎖措置の一環で地下水モニタリング等も検討対象となり、さらに社会科学の観点からも閉鎖後のモニタリングに関する必要性が議論されつつある。このような状況を踏まえると、高レベル放射性廃棄物処分の長期に亘る安全性の確保の観点から、モニタリングのあり方を検討することが重要となる。

そこで、本論では処分事業において重要と考えられる閉鎖時の意思決定の段階に着目し、まず、閉鎖時の意思決定の考え方を整理したうえで、閉鎖時の意思決定におけるモニタリングのあり方（モニタリングの役割、モニタリング実施時の制約条件、および具体的なモニタリング計画の検討方法）について考察を試みた。このあり方は、今後サイト調査から最終閉鎖後の各段階を対象に一貫性を持ったモニタリング計画の検討と、社会との合意形成に向けたモニタリングに関する議論の起点になるものであると考えている。

**Keywords :** 地層処分, モニタリング, 閉鎖, 意思決定, 制約条件

Japan currently plans to dispose of high-level radioactive wastes (vitrified HLWs) produced from the reprocessing of spent nuclear fuel in deep geological formations, in order to isolate the radioactive wastes from the human environment for tens of thousands of years. Such a geological repository must be designed to ensure operational safety and post-closure safety. Then, following the closure of the geological repository, post-closure safety will be provided by an engineered barrier system (EBS) and a natural barrier system (NBS) without relying on monitoring or institutional control. However, from a technical standpoint, monitoring has been required during backfilling in current studies. Additionally, there has been strong social pressure to continue monitoring during all the phases including post-closure. On the basis of the current situations, a monitoring strategy for geological disposal must be studied to ensure the long term safety of geological disposal.

Focusing on decision making for geological repository closure, the authors have created a basic logical structure for the decision making process with the principles for ensuring safety and have developed a monitoring strategy based on the logical structure. The monitoring strategy is founded on three key aspects: the role of monitoring, boundary conditions of monitoring at the time of decision making, and a methodology for monitoring planning. Then, the monitoring strategy becomes a starting point of monitoring planning during site characterization, construction, operation and staged closure, as well as post-closure with institutional control, and of social science studies.

**Keywords:** geological disposal, monitoring, closure, decision making, boundary conditions

## 1 はじめに

現在、我が国では原子燃料サイクルの過程で発生する高レベル放射性廃棄物を、数万年以上といった長期にわたり人間の生活環境から隔離するため、地層処分が計画されている。この地層処分施設は、操業安全性と閉鎖後安全性の両方を確保するように設計される必要があり、操業安全性は工学機能および操業管理によって提供され、閉鎖後安全性は施設が閉鎖された後に、モニタリングまたは制度的管理に依存することなく、人工バリアおよび天然バリアによって提供されることとなる[1]。

しかしながら、処分費用の合理的な見積りの前提条件として、「坑道を閉鎖し、その後 300 年間、モニタリング等の閉鎖後の措置を実施する」との方針[2]も示されている

うえ、最近では閉鎖措置の一環で「例えば、埋め戻し完了後における地質環境が基本設計ないし基本的設計方針において想定した状況に移行しつつあることを確認するための地下水モニタリング」[3]等も、検討対象となっている。さらに、2009 年に開始された欧州のモニタリングに関する共同研究 MoDeRn (Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure) [4]においては、社会科学の観点からも閉鎖後のモニタリングの必要性が議論されつつある。このような状況を踏まえると、高レベル放射性廃棄物処分の長期に亘る安全性の確保の観点から、モニタリングのあり方を検討することが重要となる。

そこで、本論では処分事業において重要と考えられる閉鎖時の意思決定の段階に着目し、まず、閉鎖時の意思決定の考え方を整理したうえで、閉鎖時の意思決定におけるモニタリングのあり方について考察を試みた。この考察においては、閉鎖時の意思決定におけるモニタリングの役割に加え、現状のモニタリング技術に関する検討に基づき、技術的な視点でのモニタリング実施時の制約条件と、制約条件を踏まえた具体的なモニタリング計画の検討方法の提案を含んでいる。

## 2 閉鎖時の意思決定の重要性および検討手順

Study on a monitoring strategy to support decision making for geological repository closure by Yasuhiro Suyama (y-suyama@kajima.com), Hiromi Tanabe, Jiro Eto, Kimitaka Yoshimura

\*1 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター  
Radioactive Waste Management Funding and Research Center  
〒104-0052 東京都中央区月島 1-15-7

\*2 現所属：鹿島建設技術研究所  
Kajima Corporation, Kajima Technical Research Institute  
〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1

\*3 現所属：原子力発電環境整備機構  
Nuclear Waste Management Organization of Japan  
〒104-0052 東京都港区芝 4-1-23

(Received 18 March 2010 ; accepted 12 October 2010)

## 2.1 処分事業の手順および着目した段階

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業には、建設地選定に向けた調査（文献調査，概要調査，および精密調査）から、処分場の建設，処分場の操業，地下施設の閉鎖，地上施設解体撤去，（必要があれば）閉鎖後の管理，そして管理終了後という段階までが含まれており，閉鎖までで約100年に及ぶプロジェクトである[5]。

処分事業は，安定した地下深部の岩盤に，天然バリアと人工バリアを組み合わせた多重バリアシステムにより，廃棄体を埋設（処分）する事業である[5]。つまり，処分事業の行為としては，安全性を確保できる条件において"埋設すること"が目的であるため，前述した各段階の中で，処分の長期に亘る安全性の確保の観点と，閉鎖までの廃棄体の回収可能性の維持[3]の観点からも最終的な判断となる「処分場の閉鎖」に向けた意思決定が重要な段階となる。

## 2.2 閉鎖時の意思決定の観点からのモニタリングの検討の重要性

"埋設すること"を目的とした処分事業において「処分場の閉鎖」に向けた意思決定は重要な段階であるため，この意思決定に先立ち，必要な情報は事前に取得しておくことが求められる。ベースライン（各段階開始時の初期状態）や処分場建設時の擾乱の影響の把握等，閉鎖前段階において実施すべきモニタリング項目は，閉鎖時の意思決定を踏まえ選定すべきである。さらに，低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分での埋め戻し完了後の安全レビューの一環として行われる可能性のあるモニタリング[6]と類似した観点で，閉鎖後のモニタリングが一定期間要求された場合，実施すべきモニタリング項目は，長期安全性の観点から実施される閉鎖時の意思決定で活用された項目のうち，実施可能で，かつ実施する意味がある（例えば，安全性の確認に資する）モニタリングを継続して実施していくことが長期安全性評価を行う上で重要となる。つまり，サイト調査から最終閉鎖後の各段階を対象に一貫性を持ったモニタリング計画を検討するためには，各段階で個別に検討する

のではなく，"閉鎖時の意思決定の観点で実施すべきモニタリング計画"に準拠した形で，検討すべきである（Fig. 1参照）。

このような理由から，地層処分事業におけるモニタリング計画の検討では，まず閉鎖時の意思決定の観点で実施することが重要となる。本論では処分場の閉鎖時の意思決定の内容として，技術的な視点で「現在の状況において閉鎖することが妥当である。」ことの評価に着目している。この主命題が"真"であることを示せば，閉鎖することが可能となる。

本論では，地層処分の多重バリアシステムである人工バリア（地下施設を含む）と天然バリアに焦点を当て，生物圏のモニタリングは対象外としている。

## 2.3 閉鎖時の意思決定におけるモニタリングのあり方の検討手順

本論では，まず，閉鎖時の意思決定の考え方として，①我が国の安全確保原則に基づき，閉鎖時の意思決定のための基本論理構造を構築する。そして，この論理構造の展開のための留意事項を整理する。次に，これらの留意事項に対応するため，②基本論理構造におけるモニタリングの役割を考察する。そして，この役割を踏まえ，③現状のモニタリング技術に関する検討を行い，技術的な視点でモニタリング実施時の制約条件を提示し，④制約条件を踏まえた具体的なモニタリング計画の検討方法を検討する。最後に，閉鎖時の意思決定は将来世代が行うため，閉鎖後も含めモニタリング技術に関する新しい選択肢を提供していくことも重要なため，⑤地中無線送信技術の適用による地層処分モニタリング実施時の制約条件に与える影響についても考察を加える。

## 3 閉鎖時の意思決定のための基本論理構造

### 3.1 安全確保原則

高レベル放射性廃棄物の処分の安全性を長期に亘って

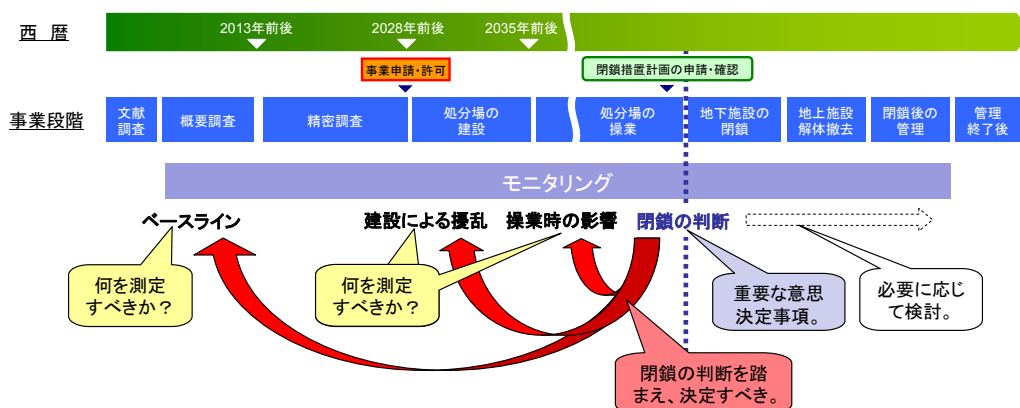


Fig. 1 Necessity of a review from the viewpoint of decision making in the repository closure phase for the monitoring process

確保するためには、①長期的安全確保対策として地層処分にとって適切な地質環境を有する処分地が選定(サイト選定)され、人工バリアおよび処分施設から構成される処分場がそこに適切に設計・施工(工学的対策)される必要がある。さらに、②安全確保のための措置が適切であって、長期に亘って人間とその生活環境に対してその影響が及ぶおそれがないことをあらかじめ確認(安全評価等による安全確認)することが必要となる[7]。

ここで、閉鎖時の意思決定のため主命題「現在の状況において閉鎖することが妥当である。」ことを示す論理構造を構築するに当たっては、①長期的安全確保対策と②安全評価等による安全確認の視点が重要となる。

### 3.2 安全確保原則に基づく閉鎖時の意思決定のための基本論理構造の構築

処分場の操業後、技術的な視点で安全確保原則に基づき、主命題「現在の状況において閉鎖することが妥当である。」ことが真であることを示すためには、前節で示した①長期的安全確保対策と②安全評価等による安全確認の視点を含まなければならない。ここで、①長期的安全確保対策には"サイト選定"と"工学的対策"が含まれるが、"サイト選定"に係る要件は最終処分施設建設地の選定時に満足していることが前提条件となる。②安全評価等による安全確認については、評価結果である被ばく線量が基準値以下であることが前提条件となる。そのため、本論理構造では、これらの前提条件が満足されていることとしたうえで、次の2つの命題がともに真であることが必要となる。

- 工学的な対策が妥当である。
- 安全評価上妥当である。

命題「工学的な対策が妥当である。」が真であるためには、以下の2つのサブ命題が真である必要がある。

- 工学的な対策の実施プロセスが妥当である。
- 工学的な対策に基づく結果が妥当である。

ここで、サブ命題「工学的な対策の実施プロセスが妥当である。」とは、工学的な対策に基づく結果に至るプロセスの妥当性を評価するものであり、例えば、意思決定段階の最終的な温度分布の評価に至る熱解析モデル構築方法(地質環境特性の把握や適切な熱伝導特性等の物性値の設定等)の妥当性等が含まれる。また、サブ命題「工学的な対策に基づく結果が妥当である。」とは、最終的な結果が妥当であるかであり、例えば、意思決定段階における温度分布の結果が妥当であること等が含まれる。

命題「安全評価上妥当である。」が真であるためには、同様に以下の2つのサブ命題が真である必要がある。

- 安全評価に資するプロセスが妥当である。
- 安全評価に資する結果が妥当である。

ここで、サブ命題「安全評価に資するプロセスが妥当である。」とは、安全評価に必要な性能を評価するモデルとして、例えば、水理地質構造モデル構築方法の妥当性等が含まれる。また、サブ命題「安全評価に資する結果が妥当である。」とは、安全評価に必要な性能を評価するモデルの結果として、例えば、地下水の流向・流速の結果が妥当であること等が含まれる。

これらの結果を取りまとめると、「現在の状況において閉鎖することが妥当である。」ことが真であるための基本論理構造は、Fig. 2上ようになる。この論理構造は、事前に実施されている調査研究(室内試験、工学規模試験、実証試験、地層科学研究等を含む)や実際に原位置関連(サイト調査結果、施工時の知見等を含む)で取得されるさまざまな知識・情報によりサポートされることとなる。モニタリング結果も、これらの知識・情報の一つとして位置づけられる。

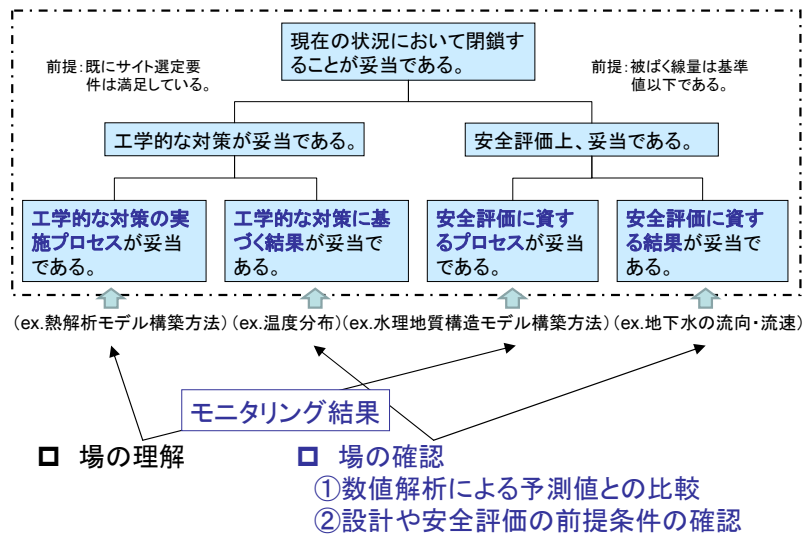


Fig. 2 The basic logical structure needed to ensure that "it is appropriate to close the repository as things stand now" and application of the results of monitoring in the logical structure contributing to repository closure

### 3.3 基本論理構造の展開に関する留意事項

Fig. 2 上に示す論理構造を具体的な知識・情報に繋げていくためには、対象とする処分サイトの特性を踏まえ、安全性を長期に亘って確保するための"戦略(例えば、不確実性にどのように対応していくのか等)"に基づきトップダウンで展開(細分化)していくこととなる。本論では、具体的な論理構造の展開に向け、モニタリングの観点からの留意事項を以下に示す。各留意事項については、4章にて検討を行う。

- モニタリングの結果は、この論理構造をサポートする一つのエビデンスになるものである。そのため、論理構造に対応して具体的にサポートできるモニタリングの内容を整理する必要がある。【4.1節で検討】
- 4.2.1項で後述するようにモニタリングの実施は、多重バリアシステムの構成要素の挙動に関するデータを取得できるメリットに加え、モニタリングプロセスから発生するデメリットもある。そのため、事前にモニタリングの実施に係る制約条件を設定しておくことが重要である。【4.2節で検討】
- この論理構造をトップダウンで展開した場合、論理構造としての説明のし易さが優先され、実際に原位置で計測できないモニタリング項目が挙がる可能性が考えられる。しかし、モニタリングをエビデンスとして活用するためには、実際に原位置で計測可能なモニタリング項目とする必要があるため、事前にボトムアップの観点での検討が重要となる。また、この論理構造においてモニタリングの結果は、この主命題を支持するエビデンスになる場合もあるが、結果によっては不支持するエビデンスの場合もあり得る。そのため、不支持するエビデンスの場合の取り扱い方法については、事前に検討する必要がある。【4.3節で検討】

## 4 閉鎖時の意思決定におけるモニタリングのあり方についての考察

### 4.1 論理構造をサポートするエビデンスとしてのモニタリング(モニタリングの役割)

一般にモニタリングの結果は、地質環境特性の把握等、つまり"場の理解(例えば、応答があり、水みちがあると判断される)"に活用されるケースと、予測した結果の妥当性の確認、つまり"場の確認(例えば、水みちがあると考えられるため、掘削に伴い水位の低下が生じると予測しており、モニタリングの結果、予想通りの水位の低下が確認できた)"に活用されるケースがあると考えられる。具体的に"場の理解"に活用されるケースのモニタリング結

果は、基本論理構造において、主に工学的な対策や安全評価関連のプロセスの妥当性をサポートするエビデンスとなり、"場の確認"に活用されるケースは、主に工学的な対策や安全評価関連の結果の妥当性をサポートするエビデンスとなる。この"場の確認"に活用されるケースには①数値解析による予測値との比較に加え、②設計や安全評価の前提条件の確認があると考えられる(Fig. 2下参照)。このことから、モニタリングの役割はエビデンスとして論理構造をサポートすることであると言える。

"場の理解"に活用されるケースは、例えばJAEA統合化データフロー[8]に示されているように、地上からのボーリング調査において立坑や他のボーリング孔等の掘削による水圧応答に関する長期計測等であり、水みちの連続性や遮水性断層の有無等地質環境の理解に活用される。また、"場の確認"のうち、①数値解析による予測値との比較に活用されるケースは、例えば、地層処分研究開発第2次取りまとめ[9]の「地下深部の地下水流動特性に関する調査・解析事例」に示されているように、水理特性データを取得し、水理地質構造モデルを構築したうえで、地下水流動解析を行い、その結果と長期観測との比較によるモデルの検証に活用される。さらに、"場の確認"のうち、②設計や安全評価の前提条件の確認に活用されるケースは、例えば緩衝材の温度が100°Cを超えないように設計されている場合、緩衝材の温度が100°C以下であることをモニタリングにより確認することとなる。

上記のうち、例えば地下水圧に関するモニタリング結果は、"結果の妥当性(場の確認)"のうち、①数値解析による予測値との比較に活用される以前に、Fig. 3に示すように最終段階に至るまで繰り返し"プロセスの妥当性(場の理解)"にも活用できるものである。

各ケースにおけるモニタリング結果の判断基準は、"場の理解"の場合は、"モニタリング結果と場の理解(モデル)との間で、整合が取れていること"であり、"場の確認"のうち、①数値解析による予測値との比較の場合は、"モニタリング結果が、予測範囲に入っていること"であり、②設計や安全評価の前提条件の確認の場合は、"モニタリング結果が、設計や安全評価の前提条件を満足していること"となる。

### 4.2 閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリング実施時の制約条件

#### 4.2.1 モニタリングの実施における制約条件の基本事項

地層処分におけるモニタリングは、処分場計画のさまざまな段階を問題なく完了するために欠かせない情報をもたらす、そうすることによって放射性廃棄物処分の主要目的である長期安全性の信頼性を高めることに資すると考えられている[10]。しかしながら、モニタリングの実施は多重バリアシステム等の構成要素の挙動に関するデータ

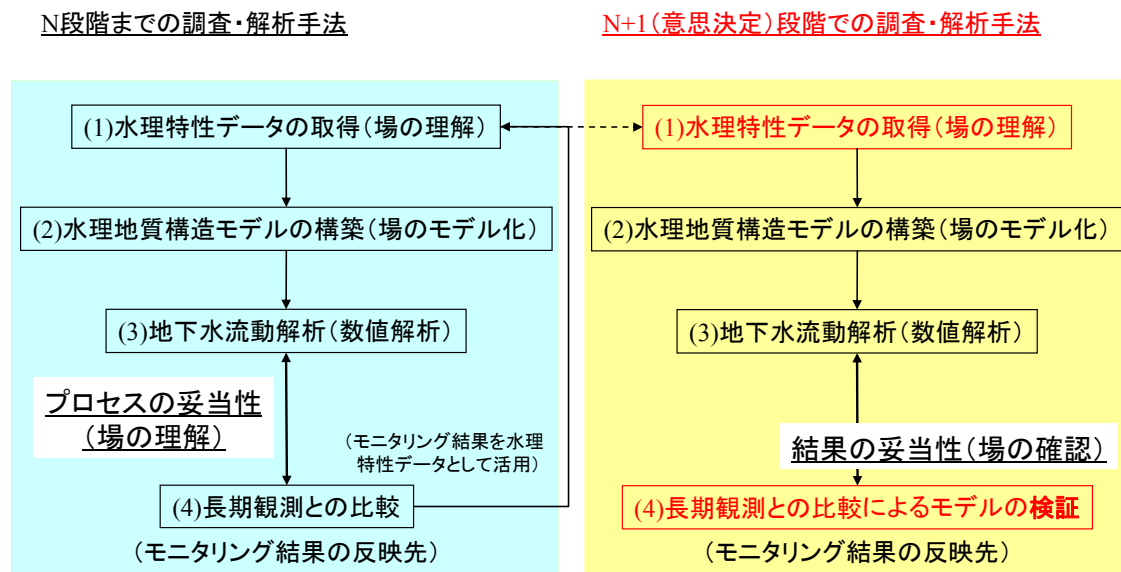


Fig. 3 Relationship between the appropriateness of the processes (to gain an understanding of the site) and the appropriateness of results (to verify the suitability of the site)

を取得できるメリットに加え、下記に示すようなモニタリングプロセスから発生するデメリットもあり、実際のモニタリング計画においては、両者間で整合を図ることが求められる[10].

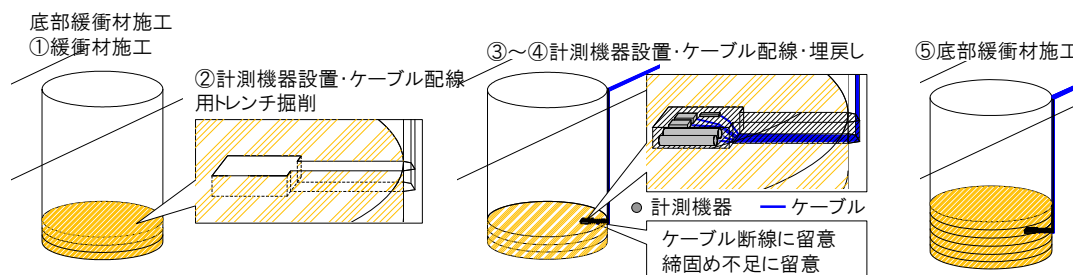
- 1) モニタリングを行う作業員が受ける放射線被ばく
- 2) モニタリングの実施に伴う人工バリア設置の遅延により生じえる処分場材料の劣化(人工バリアが所定の機能を発揮できない可能性がある)
- 3) 処分場内部または周辺でのモニタリング機器の設置に伴う放射性物質の移動に係わる潜在的な水みちの形成
- 4) モニタリングを実施するために処分場へのアクセス坑道を残存した場合の人間侵入,あるいは自然または誘発された現象(例えば,大湧水)による悪影響が生じる可能性の増大
- 5) 処分場建設, 操業, 閉鎖等への干渉

この中で, 3)潜在的な水みちの形成に対しては工学的対策が困難であり, 地層処分の長期安全性の信頼性を高めるために他の対策によりトレードオフを行うことがとくに困難であると考えられるため, 処分場内部または周辺でセンサを埋め込む必要があるモニタリングは避けることを地層処分の前提とすべきである. そのため, 本論ではこの前提を踏まえ, 「モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なってはいけない。」ことの重要性を再確認し, モニタリングの制約条件の基本事項とした.

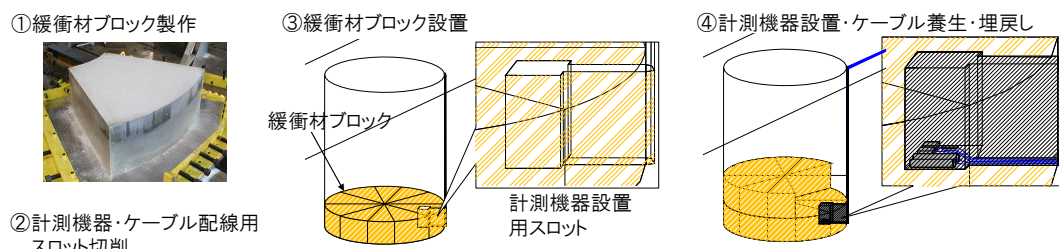
#### 4.2.2 人工バリアへの計測機器の設置に伴うバリア機能や性能への影響

前項において提示したモニタリングの実施における制約条件の基本事項を踏まえ, 本項では第2次取りまとめでの処分孔縦置き方式(硬岩系岩盤)[9]で, 人工バリア内でモニタリングを実施することを仮定し, モニタリングのどのような行為が, バリア機能や性能の低下に影響するかを整理した.

まず人工バリアのうち緩衝材のモニタリングに関し, 緩衝材中への計測機器設置方法を整理した(Fig. 4参照). 緩衝材の原位置締め固めの場合, Fig. 4上に示すように①底部緩衝材の施工, ②計測機器設置・ケーブル配線用トレンチ掘削, ③計測機器設置およびケーブル配線, ④埋戻し, ⑤底部緩衝材施工の手順を繰り返して行われることとなる. この施工工程の中で, ②計測機器設置・ケーブル配線用トレンチ掘削は緩衝材自体にゆるみを生じさせ, ④埋戻しでは計測機器やケーブルの損傷を防ぐために十分な締め固めができず, ケーブルが残存することも併せてバリアの機能や性能を損なう(弱部が生じ, 潜在的な水みちが形成される)こととなる. また, 緩衝材ブロック施工の場合もFig. 4下に示すように類似した作業が行われるため, 同様の課題(緩衝材自体がゆるむ, 不十分な締め固め, およびケーブルが残存)が残されている. 廃棄体定置後の緩衝材の施工は作業の安全性の確保の観点から, 両施工方法ともすべて遠隔作業で行うことが必要になるため, 廃棄体周辺および上部における緩衝材の施工においてモニタリングを実施する場合は前述した"潜在的な水みちの形成"がさらに顕著になることが考えられる.



計測機器設置方法—緩衝材原位置締め固めの場合—



計測機器設置方法—緩衝材ブロック施工の場合—

Fig. 4 Installation methods for measuring instruments in buffer materials

また、人工バリアのうちオーバーパックのモニタリングについては、例えば材料の腐食に関連する項目のモニタリング等が考えられるが、その場合のバリア機能や性能の低下に関連する事項としては、計測装置の設置に伴うオーバーパックの損傷等の可能性に加え、計測機器のケーブルを緩衝材中に配線する必要があるため、最終的には前述した緩衝材中の計測機器設置方法と同様に、“潜在的な水みちの形成”が課題として残されている。

#### 4.2.3 閉鎖時の意思決定において実施可能なモニタリング

どのような項目をモニタリングすべきかを考えた場合、4.2.1項で示した制約条件の基本事項と4.2.2項で示した人工バリアへの計測機器の設置を踏まえ、“潜在的な水みちの形成”を防ぐために、本論では、閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリング実施時の制約条件を下記のように定義した。このような制約条件を満たすものが実施可能なモニタリングとなる。

##### ①人工バリア（地下施設を含む）

- 処分場の処分坑道、人工バリアでのモニタリングは実施しない（閉鎖時の判断に活用しない）。閉鎖前段階においてアクセス可能な坑道のみ、モニタリングが可能である。処分場の閉鎖後はすべての坑道のモニタリングを中止する（閉鎖時には水みちになる可能性がある坑道のケーブルは撤去、Fig. 5 参照）。
- 再冠水過程の浸潤状況の把握等、人工バリアのモニタリング情報がどうしても必要であれば、処分場とは異なる場所に地下調査施設 I

（ヒーター等を有する模擬廃棄体を埋設）を建設し、人工バリア、模擬処分坑道でのモニタリングを行う。処分場の閉鎖後は中止する（閉鎖時には水みちになる可能性がある連絡坑道のケーブルは撤去、Fig. 6 参照）。

- 処分坑道のモニタリング情報がどうしても必要であれば、地下調査施設 II（実廃棄体を埋設）を建設し、処分坑道でのモニタリングを行う。この場合においても処分場と同様に、人工バリアのモニタリングは行わない。閉鎖に先立ち、処分坑道内のセンサやケーブルは撤去し、坑道を再度埋め戻す（閉鎖後、地下調査施設 II は、許認可手続きでの対応が可能であることを前提としたうえで、処分施設の一部とする、Fig. 7 参照）。

##### ②天然バリア

- 地上からのボーリング孔等を用いたファーフィールドのモニタリングに関しては、バリア機能や性能の低下を防ぐために基本的には新たなボーリング孔を掘削することなく概要調査および精密調査において掘削・使用されたボーリング孔を継続して活用する。地上からの物理探査等、非破壊的手法によるモニタリングは、基本的には随時可能である。
- 地下施設を活用して実施するニアフィールドのモニタリングは、上記①人工バリア（地下施設を含む）の制約条件に準拠する。

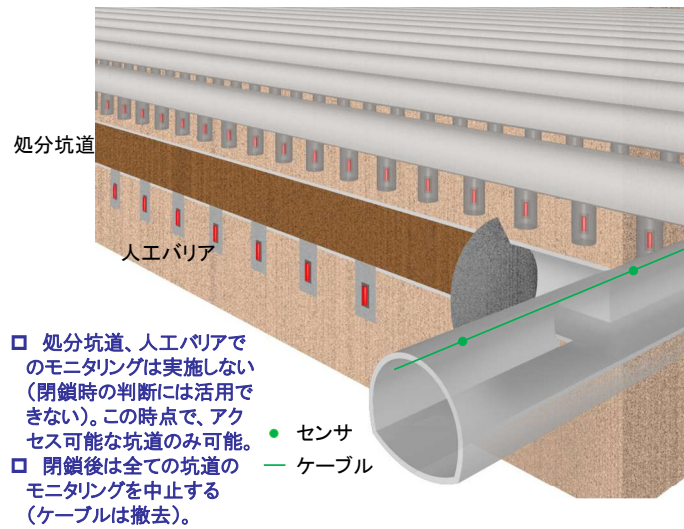


Fig. 5 Preclosure monitoring in the repository

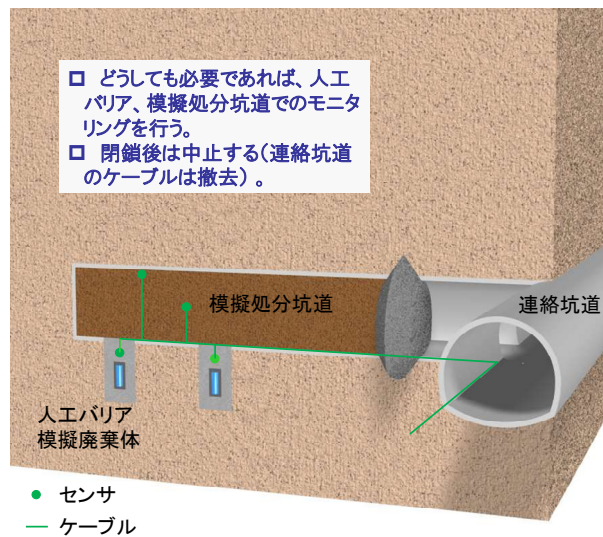


Fig. 6 Preclosure monitoring in the underground characterization facility I (for emplacement of simulated waste packages)

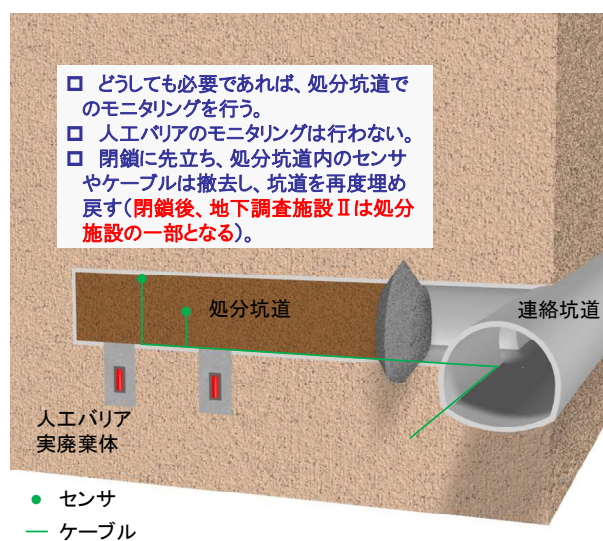


Fig. 7 Preclosure monitoring in the underground characterization facility II (for emplacement of actual waste packages)

### 4.3 閉鎖時の意思決定におけるモニタリング計画検討方法

#### 4.3.1 モニタリング計画の検討における考慮事項

主命題「現在の状況において閉鎖することが妥当である。」ことが真であるための論理構造は、安全性を長期に亘って確保するための戦略に基づき、トップダウンで展開されるものであるが、ここではボトムアップの観点で、主命題の判断にエビデンスとして適用可能なモニタリングの計画検討に向け、モニタリング項目の選定方法およびモニタリング結果の判断基準の考え方を示す。

モニタリング計画としては、モニタリング項目と、そのモニタリング方法、およびその結果の判断基準を設定する必要がある。このモニタリング計画の検討においては、まず、「定義した"地層処分モニタリング実施時の制約条件" (4.2.3 項参照) "を満足すること"が重要であり、そして技術的観点で実施可能なモニタリング項目であること(要求事項を満足するモニタリングのための計測手法があること)、かつ実施する意義があるものであること(ある一定期間のモニタリング結果が主命題の判断に有効であること)が必要となる。

モニタリング結果の判断基準に関し、"場の理解"については閉鎖時の意思決定の前段階において、基本的に整合が

取れるまで場の理解を進めることにより対応することになるため、ここでは、結果の妥当性をサポートするエビデンスになる"場の確認"に着目して検討した。

#### 4.3.2 モニタリング項目の選定方法

前項で示した考慮事項を踏まえ、構築したモニタリング項目の選定方法を Fig. 8 に示す。モニタリング項目の選定は、まず Fig. 2 上に示す論理構造に基づき"地層処分モニタリング実施時の制約条件"を満足するモニタリング項目の抽出を行う。そして、下記の2段階の選定基準に基づき適用可能なモニタリング項目を抽出することとなる。選定基準に適合しない場合は、モニタリング項目の見直し(項目の取り下げ)を行うこととなる。

1 段目の選定基準は「要求事項(環境条件や測定期間、データへのアクセス方法等)を満足するモニタリングのための計測手法があるか?」であり、これを満足した場合はその手法がモニタリングの方法となる。2 段目の選定基準は「ある一定期間のモニタリング結果が主命題の判断に有効か?」であり、これも満足した場合はモニタリング項目となり、その選定基準がモニタリング結果の判断基準に寄与することとなる。ここでの"ある一定期間"とは計測手法の寿命とモニタリング項目の挙動等(例えばピークの時期まで)との関係で決定される期間である。

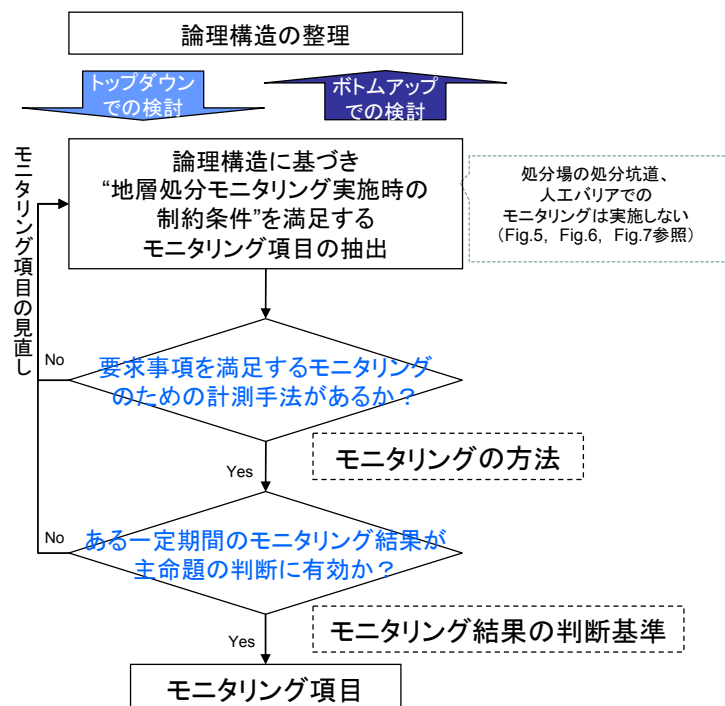
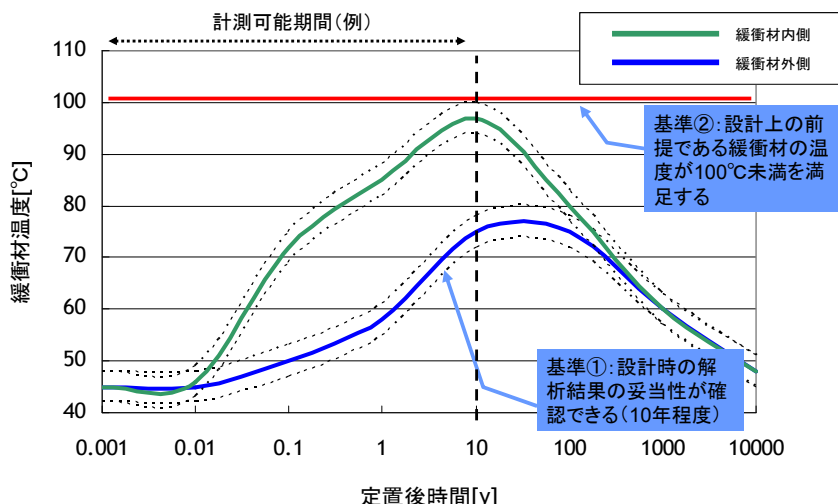


Fig. 8 A method for screening monitoring parameters





注1) 緩衝材に関しては地下調査施設 I (模擬廃棄体) のみでの計測となるため、基準値は別途検討が必要となる。  
 注2) 図中の点線は、解析結果に基づく許容範囲の例である。  
 注3) [9]の検討成果を参考に概念図として作成。

Fig. 9 A schematic for the application of the principles regarding criteria to the temperature of buffer materials

#### 4.3.3 閉鎖時の意思決定におけるモニタリング結果の判断基準

閉鎖時の意思決定におけるモニタリング結果の判断基準は、結果の妥当性として考えられる"場の確認"に関連するものとして、具体的に①数値解析による予測値との比較に加え、②設計や安全評価の前提条件の確認がある。

上記した各基準の考え方を緩衝材中の温度計測を対象に示すと、Fig. 9 に示すように基準①では設計時の解析結果の妥当性を確認することであり、具体的な判断基準としては解析結果に基づく許容範囲であることの確認となる。また、基準②では設計上の前提である温度との比較となる。ここで重要なことは前述した"ある一定期間"との関係であり、例えば 10 年程度計測可能とした場合、10 年程度の計測結果が基準①と基準②での判断に有用であることが求められる。

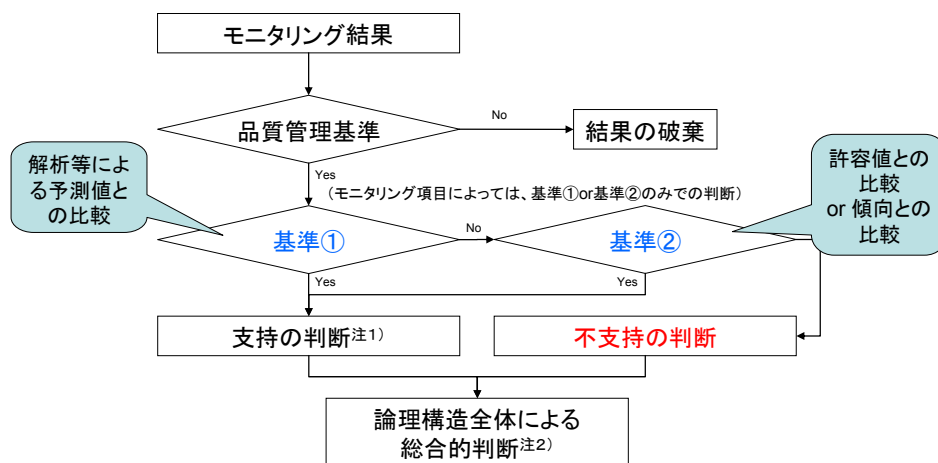
上記した考え方を基に、モニタリング結果の判断基準を整理すると Fig. 10 に示すようになる。まずモニタリング結果が品質管理基準を満足しているか否かの確認を行い、基準①での判断となる。基準①を満足した場合、このエビデンスは主命題を支持することとなる。もし、基準①を満足しない場合は、基準②での判断となり、基準②を満足できた場合、このエビデンスは主命題を支持する証拠となる。ここで、基準②も満足しない場合、このエビデンスは主命題を不支持することとなるが、最終判断は Fig. 2 上に示す論理構造全体による総合的判断となる。ここで重要なことは論理構造の展開方法(モニタリングに依存しない論理構造)であり、例え基準②を満足していなくても、主命題に影響が少ない展開方法を考慮すべきである。

この判断基準はバックグラウンドとの比較等、バックグラウンドの計測等を要求することとなる。つまり、閉鎖時の意思決定におけるモニタリングの検討は前段階のモニタリング(例えば、ベースラインの計測)計画に関与することとなる。

地層処分モニタリングにおいては、モニタリングの結果(例えば、地下水組成)を何かの判断材料に用いることを対外的に提示した場合、モニタリングの実施(例えば、常に変化がないことの確認)がすべての段階において優先事項になる(次段階以降で不必要と判断されても、一度実施する旨を伝えた場合その後は実施が優先事項となる)場合も考えられる。そのため、モニタリングを計画するに当たっては、さまざまな観点で次段階以降に与える影響を考慮したうえで、終了させる基準を事前に設けることも重要となる。

#### 5 地中無線送信技術の適用による地層処分モニタリング実施時の制約条件に与える影響

閉鎖時の意思決定は将来世代が行うため、閉鎖後も含めたモニタリング技術に関する新しい選択肢を提供していくことは、現世代の重要な課題の一つである。そこで、本章では、4.2.1 項で示した"処分場内部または周辺でのモニタリング機器の設置に伴う放射性物質の移動に係わる潜在的な水みちの形成を防ぐ"ためのモニタリングの方策として、技術開発が進められている伝送ケーブルが不要な地中無線送信技術[11,12]に着目し、地層処分モニタリング実施時の制約条件に与える影響についても考察を加えた。



注1) 基準①を満足した場合と基準②のみを満足した場合とでは、同じ支持の判断でも、その支持の程度が異なってくる。  
 注2) 総合的な判断の方法は、安全性を長期にわたって確保するための戦略により異なってくる。

Fig. 10 The acceptability criteria for the results of monitoring

### 5.1 地中無線送信技術の概要

地中無線送信技術では、地盤や海水等導電率の大きい媒質の中の減衰特性を抑えるため、ラジオ・テレビ放送や携帯電話等一般の気中での無線通信技術で利用されている数 MHz ～数 GHz の範囲の周波数をもつ電波（電磁波）ではなく、数 kHz 以下の周波数の低い電磁波を適用している。最近では高度化が進み、緩衝材での適用に向けφ5cm×h13cm に小型化された地中無線送信装置（温度センサ内蔵、他のセンサは外付け）が開発[13]されており（Fig.11 参照）、適用性がかなり向上してきている。また、4.2.2 項にて示した課題（緩衝材自体のゆるみ、および不十分な締め固め）の解決に向け、地中無線送信技術と狭隘部においても高密度で隙間無く施工が可能であるベントナイトの吹き付け施工技術[14]を組み合わせ、潜在的な水みちの形成に対する工学的対策[13]に関する技術開発

も併せて進められている。

### 5.2 地中無線送信技術がモニタリングのあり方へ与える影響

地中無線送信技術にはケーブルが不要であるというメリットがあるが、それに関連し伝送距離が限定され、伝送速度が遅く、かつ機器の寿命に加えバッテリーの寿命も考慮する必要があること等、当然のことながらデメリットも有している。そのため、地中無線送信技術を適用しても 4.2.3 項で示した地層処分モニタリング実施時の制約条件を根幹的に変えるだけの可能性を有している訳ではないが、3.2 節で示した論理構造をサポートするエビデンスを増やす観点で、閉鎖後の限られた期間に限定し、「モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なってはいけない。」ことを維持しつつ、例えば Fig. 12 と Fig. 13 に示す



Fig. 11 A miniaturized transmitter of the wireless transmission system in the underground

ようなモニタリングを別途実施することが可能となる。将来、社会との合意形成に向けたモニタリングに関する議論において、地中無線送信技術は有効なツールの一つになると考えられる。

6 まとめ

6.1 本論のまとめ

最近のモニタリングに係る検討状況を踏まえると、高レ

ベル放射性廃棄物処分の長期に亘る安全性の確保の観点から、モニタリングのあり方を検討することが重要となっている。そこで、本論では処分手業において重要と考えられる閉鎖時の意思決定の段階に着目し、閉鎖時の意思決定の考え方を整理したうえで、この意思決定におけるモニタリングのあり方（モニタリングの役割、モニタリング実施時の制約条件、および具体的なモニタリング計画の検討方法）について考察を試みた。考察した閉鎖時の意思決定におけるモニタリングのあり方について取りまとめると、下

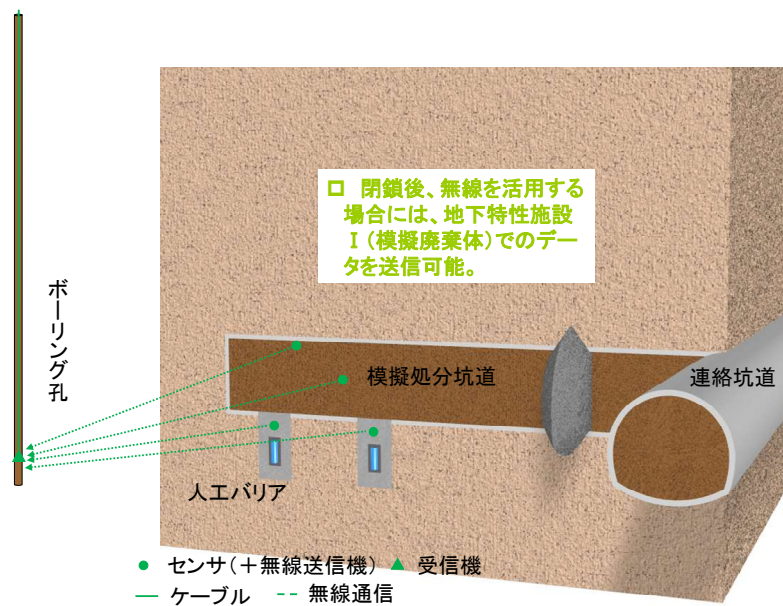


Fig. 12 Postclosure monitoring using the wireless transmission system in the underground characterization facility I (for the emplacement of simulated waste packages)

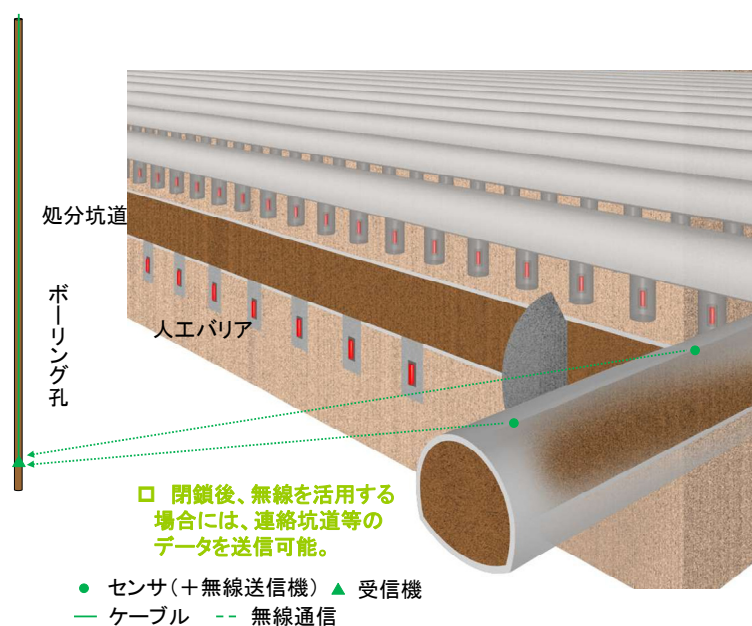


Fig. 13 Postclosure monitoring using the wireless transmission system in a deep geological repository

記のようになる。

- ①高レベル放射性廃棄物の処分の安全性を長期に亘って確保するためには、安全確保原則に基づき進めることが必要となる。そのため、処分場の操業後、「現在の状況において閉鎖することが妥当である。」ことを示すためには、「工学的な対策が妥当である。」と「安全評価上妥当である。」の2つの命題がともに真であることが必要となる。そして、この論理構造は、事前に実施されている調査研究や実際に原位置で取得されるさまざまな知識・情報によりサポートされることとなる。
- ②モニタリングの役割はエビデンスとして①の論理構造をサポートすることである。
- ③地層処分モニタリング実施時の制約条件としては、モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なわないようにするため、「処分場の処分坑道、人工バリアでのモニタリングは実施しない（閉鎖時の判断に活用しない）」ことが基本となる。
- ④モニタリング項目の選定においては、「③の制約条件」を満足することが重要であり、そして技術的観点で実施可能なモニタリング項目であること（要求事項を満足するモニタリングのための計測手法があること）、かつ実施する意義があるものであること（ある一定期間のモニタリング結果が主命題の判断に有効であること）が必要となる。
- ⑤地中無線送信技術にはケーブルが不要であるというメリットがあるため、「モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なってはいけない。」ことを維持しつつ、「③の制約条件」を更新できる可能性を有している。よって、今後モニタリングのあり方の検討を進めるためには、地中無線送信技術の開発を併せて実施することが望まれる。

技術的な視点で考察した、この閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリングのあり方は、今後サイト調査前から最終閉鎖後の各段階を対象に一貫性を持ったモニタリング計画の検討と、モニタリングに期待される社会との合意形成に関する議論の起点になるものと考えている。

## 6.2 今後の検討の方向性（社会との合意形成に資するモニタリング計画の検討）

モニタリングの重要性は世界的に認識されており、2009年5月には欧州におけるモニタリングの共同研究MoDeRn[4]が、18の研究機関の参加により開始されている。この共同研究でとくに注目されている点は、社会科学の側面からモニタリングを重視しており、モニタリングの目的や戦略の検討の中で、社会科学との対話を配慮していることである。その理由としては、一般国民を含め地層処

分への理解促進を考えると、場の理解の過程を独立した指標（モニタリング結果）で確認するという考え方が分かり易いためである。

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業は公募に基づき処分場の建設地選定が終了した後も、建設や操業の段階ごとに地元や一般国民を含めた社会との合意形成を行う必要がある。また、閉鎖時には、不測の事態への適切な対応等が可能なように、閉鎖の最終的な判断まで考慮されている回収可能性[3]も含めた形で、社会との合意形成を行うことが重要となる。さらに、閉鎖後安全性はモニタリングに依存することなく進める必要があるが、前述した背景を考慮すると、社会との合意形成を行う一環として、モニタリングの実施が求められる可能性が高い。本論では技術的視点で長期安全性の確保のためのモニタリングの検討に資する「閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリングのあり方」を取りまとめたが、今後は世界的な検討の方向性を示すと考えられる MoDeRn での検討成果等を踏まえ、社会科学の観点も考慮し、具体的なモニタリング計画を提案していく必要がある。

本論は経済産業省からの委託による「高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発」の成果の一部である。

## 参考文献

- [1] IAEA : IAEA 安全基準シリーズ, No.WS-R-4, 「放射性廃棄物の地層処分」(2006).
- [2] 総合エネルギー調査会:原子力部会中間報告—高レベル放射性廃棄物処分事業の制度化のあり方—, 平成11年3月23日(1999).
- [3] 廃棄物安全小委員会:総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会, 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について, 平成20年1月18日(2008).
- [4] MoDeRn Website: <http://www.modern-fp7.eu/>.
- [5] 原子力発電環境整備機構 (NUMO) : 放射性廃棄物の地層処分事業について, 分冊-1, 処分場の概要(2009).
- [6] 廃棄物安全小委員会:総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会, 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について, 平成20年1月(2008).
- [7] 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), 平成12年11月6日(2000).
- [8] 三枝博光他:超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)調査研究報告書, JAEA-Research 2007-043(2007).
- [9] 核燃料サイクル開発機構: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, 分冊2地層処分の工学技術, JNC

TN1400 99-022 (1999).

- [10] IAEA : Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste, IAEA-TECDOC-1208 (2001).
- [11] Suyama, Y. et al.: Wireless transmission monitoring in a geological disposal repository (I) Concepts and Advantages, The 33rd International Symposium Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Materials Research Society (2009).
- [12] Takamura, H. et al.: Wireless transmission monitoring in a geological disposal repository (II) Research and Development, The 33rd International Symposium Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Materials Research Society (2009).
- [13] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連，処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）モニタリング技術の開発（2010）.
- [14] Kobayashi, I. et al.: Development of construction methods of the bentonite engineered barrier by the high-density shotclay system, Workshop on long-term performance of smectitic clays embedding canisters with highly radioactive waste (2007).

