

放射性廃棄物の地層処分における モニタリングと初期ベースラインに 関する検討

操上広志，高橋美昭，吉澤勇二，三和公，赤村重紀，河野一輝

2010年5月

原子力発電環境整備機構

©原子力発電環境整備機構：Nuclear Waste Management Organization of Japan, 2010

本資料の全成果は著作権により保護されています。全部または一部を無断で複写・複製・転載することを禁じます。複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階

原子力発電環境整備機構 技術部

All parts of this work are protected by copyright. No parts of this publication may be reproduced, stored in the retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, without the prior permission of NUMO. Inquiries about copying and reproduction should be addressed to:

Science and Technology Department

Nuclear Waste Management Organization of Japan

Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

放射性廃棄物の地層処分における モニタリングと初期ベースラインに 関する検討

操上広志, 高橋美昭, 吉澤勇二, 三和公, 赤村重紀, 河野一輝

2010年5月

原子力発電環境整備機構

放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討

操上広志, 高橋美昭, 吉澤勇二, 三和公, 赤村重紀, 河野一輝

要 旨

放射性廃棄物の地層処分では、処分場閉鎖後の安全性が閉鎖後の制度的管理に依存しないよう措置することとしている。この考え方にに基づき、安全確保の基本的考え方として、安全確保のための対策（サイト選定、工学的対策）および安全評価などによる安全確認を講じた上で、事業許可申請時の安全評価に対して段階的に安全確認（安全レビュー）を行い、最終的な処分場閉鎖の確認によって受動的システムへの移行を行うプロセスを導入することが重要とされている。そのような閉鎖に至る過程での段階的な安全確認の根拠のひとつとして、モニタリングには重要な役割を担うことが期待されている。本報告書は、放射性廃棄物の地層処分に係るモニタリングを取り巻く要件や国際的な動向を整理するとともに、事業の全期間に渡るモニタリングの役割およびモニタリングプログラム運用の基本的考え方について検討した結果をまとめたものである。閉鎖後の長期安全性に係る安全評価結果は、閉鎖まで行うモニタリングによって直接的に確認することは困難である。そのため、モニタリングの結果などを利用した地質環境モデルの妥当性確認によって間接的に確認することや、安全性を確認するために本格的な操業の前に代表的な廃棄体あるいは模擬廃棄体に対してモニタリングを行うなどの対応も考えられることを示した。また、閉鎖の確認の際などに初期ベースラインを参照することが想定されることから、将来世代の意思決定の根拠とするために、調査段階においてモニタリングなどによって初期ベースラインを把握することが重要であることを示した。モニタリングプログラムの運用に関しては、モニタリング項目抽出の考え方、メンテナンス、品質管理、情報公開、異常値の検出方法とそのための技術者育成について検討した。モニタリング項目抽出においては、網羅性、技術的実現性、ステークホルダーからの要件、モニタリングそのものによる環境・バリアへの影響、経済性の観点が必要であり、地下調査施設の建設前から開始するモニタリング項目は少なくとも、地下水の水圧（水位）・水質、気象、環境放射線が必要であることが考えられた。また、柔軟性確保のためにモニタリングプログラムの定期的あるいは適切な時期の見直しが必要であることを示した。今後のモニタリング技術の開発としては、国内の地下研究所における掘削中の調査段階での更なる開発・実現性確認が期待される。

キーワード：モニタリング，段階的な安全確認，受動的なシステムへの移行，初期ベースライン

Study on monitoring and primary baseline for geological disposal of radioactive waste

Hiroshi KURIKAMI, Yoshiaki TAKAHASHI, Yuji YOSHIZAWA,
Tadashi MIWA, Shigeki AKAMURA, Kazuteru KAWANO

Abstract

In the geological disposal of radioactive waste, the facility is taken measures in such a way that post-closure safety does not depend on the institutional control after closure. According to this idea, the Japanese regulatory body states the fundamental idea to secure the safety: 1) long-term measures to secure the safety by both site selection and engineering measures, 2) confirmation of safety by means of ones such as safety assessment, and 3) stepwise safety confirmation after the license approval (safety reviews) as a road to the passive system. Monitoring is expected to play the key roles as part of the evidence for such stepwise safety confirmation. This report shows the background and requirements of monitoring for geological disposal, the roles of monitoring in the whole disposal project, and the fundamental idea of operation of the monitoring program. With respect to the post-closure safety, since the result of safety assessment in the license application cannot be verified directly by the pre-closure monitoring, safety may be confirmed indirectly through the site descriptive model improved by newly obtained data including monitoring results. As another option for safety confirmation, parts of the emplaced and sealed wastes or faked wastes may be monitored before the full-scale operation. On the other hand, monitoring before the construction of underground investigation facilities is also important to understand the primary baseline, because the future generation may refer to it when they confirm the closure. In regard to the operation of the monitoring program, we examined the strategies of derivation of monitoring items, maintenance, quality control, publication, the way to identify anomaly and education of engineers. In order to derive the monitoring items, inclusiveness of behaviors to be considered, technical feasibility, requirements from the interested parties, impacts of environment and barriers by the monitoring themselves and economy should be considered. It can be said that we should start monitoring of at least groundwater table, groundwater chemistry, meteorology and environmental radiation before the construction of underground investigation facilities. And monitoring program should be updated regularly or irregularly to make it flexible. Regarding to the research and development of monitoring techniques, further development and realization during the construction of the generic URLs are required.

Keywords: Monitoring, Stepwise confirmation of safety, Passive system, Primary baseline

目次

要旨（和文）	i
要旨（英文）	ii
1. はじめに	1
1.1 背景	1
1.2 目的	2
1.3 定義	3
2. モニタリングに関する要件・考慮事項	4
2.1 法定要件	4
2.2 法定要件に準ずる要件	8
2.3 その他に考慮する事項	13
3. モニタリングの分類と閉鎖後長期の安全確保	15
3.1 目的に基づくモニタリングの分類	15
3.2 閉鎖後長期の安全確保とモニタリング	17
3.3 安全レビューにおける安全確認とモニタリングの役割	18
4. 事業展開とモニタリングの役割	20
4.1 調査段階のモニタリングと初期ベースライン	20
4.2 建設・操業段階のモニタリング	25
4.3 閉鎖段階のモニタリング	25
4.4 閉鎖後のモニタリング	26
5. モニタリングプログラムの運用	27
5.1 モニタリング項目の抽出	27
5.2 地下調査施設の建設前から開始するモニタリング項目	28
5.3 運用、情報・品質管理と情報公開	30
6. モニタリング技術の現状と課題	31
7. おわりに	33
謝辞	35
参考文献	36
付録	
A. 埋設規則第 44 条の表	付(1)
B. スウェーデンにおける初期ベースラインとモニタリング	付(5)
C. スイスにおけるモニタリングを行う地層処分の概念	付(7)
D. IAEA（TECDOC-1208）におけるモニタリング項目導出プロセス	付(9)
E. 概要調査の段階から開始するモニタリング項目の例	付(13)
F. FEBEX	付(14)

図表目次（本文）

表-1	モニタリングに関する主なマイルストーンと提示すべき内容の概要.....	6
表-2	代表的な環境放射線モニタリングの調査内容.....	7
表-3	目標に基づくモニタリングの分類.....	15
図-1	モニタリングプログラム策定に当たって考慮すべき前提条件.....	4
図-2	モニタリングの段階的な役割.....	16
図-3	地下水流動を例とした初期ベースラインとその後の変遷のイメージ.....	23
図-4	調査段階における地質環境調査とモニタリングの関係.....	24
図-5	モニタリング項目の抽出とモニタリング方法の検討のフロー.....	28
図-6	モニタリング項目（地下水の水圧（水位））の抽出の例.....	29

図表目次（付録）

表-D.1	モニタリングパラメータと方法の例.....	付(12)
表-E.1	概要調査の段階から開始するモニタリング項目の例.....	付(13)
図-C.1	廃棄体定置，埋め戻し後かつ最終的な閉鎖前の モニタリングフェーズにおける状況.....	付(8)

1. はじめに

1. 1 背景

2007 年の炉規法の改正，2008 年の廃棄物安全小委員会の報告書の取りまとめ，同年の環境放射線モニタリング指針の制定など，モニタリングに関わる規制の枠組みが整いつつある。本報告書では，事業の各段階におけるモニタリングの目的・役割，モニタリングの項目抽出，モニタリングプログラムの運用方法など，地層処分に特有のモニタリングの基本的考え方について述べる。特に，地層処分において重要な閉鎖後の安全性とモニタリングの関係，および地下調査施設の建設前から開始する必要がある初期ベースライン把握のためのモニタリングのあり方を中心に検討する。

原子力安全委員会は，「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）の中で，高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全確保の原則として，①長期安全確保のための対策（サイト選定，工学的対策）および②安全評価などによる安全確認，によって安全性が確保されることを示した。また，①および②を基本とする安全確保方策は，制度的管理などの社会的な対応に拘わらず，長期的にはそれらに依存しなくても安全が確保されるように措置することが重要であるとしている。この考え方は，「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（報告書）」（廃棄物安全小委員会，2008）に継承され，高レベル放射性廃棄物だけでなく，一部の長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）に対しても適用されるものとされている。また，この考え方は，処分場閉鎖後の安全性は閉鎖後のモニタリングを含む制度的管理に依存しないことを原則とする国際的な考え方（例えば，IAEA，2006；OECD/NEA，1999），あるいは原子力発電環境整備機構（以下，原環機構）が取りまとめた「安全確保構想 2009」（原子力発電環境整備機構，2010）の考え方と整合するものである。閉鎖後の制度的管理に依存せずに安全を確保するための手段として，安全確保のための対策（サイト選定，工学的対策）および安全評価などによる安全確認を講じた上で，事業許可申請時の安全評価に対して段階的に安全確認を行い，最終的な処分場閉鎖の確認によって受動的システムへの移行を行うプロセスを導入することが妥当である。法規制の観点からは，定期的な評価（安全レビュー）や閉鎖措置計画の認可，閉鎖措置の確認，廃止措置計画の認可などが安全確認を行うための重要なマイルストーンとなる。それらのマイルストーンにおける安全確認の根拠のひとつとしてモニタリングは重要な役割を担うと考えられ，廃棄物安全小委員会は，モニタリングに対して各段階において一定の役割を期待している（廃棄物安全小委員会，2008）。なお，IAEA（2006）は，安全確保の原則として安全性は閉鎖後の制度的管理に依存しないとしつつも，現世代あるいは将来世代の意思により，公衆理解などの観点から閉鎖後のモニタリングを行うことを否定するものでないことを示している。

上記のように，モニタリングには事業許可申請後の段階的な安全確認のために重要な役割を担うことが期待されるが，そのためには事業許可申請前の立地段階（調査段階）からモニタリングを開始し，地下調査施設の建設以降の事業による擾乱を受ける前の地質環境，周辺環境，放射線の状態推移（初期ベースライン）を把握することが重要である。IAEA（2006）は，モニタリングの目的のひとつとして，ベースライン情報（baseline information）を取得し，それ以降の評価，操業安全や施設の操業性の確認，閉鎖後安全性に関する状態との整合性の確認に寄与することを示している。また，ベースライン情報は，処分場周辺の乱される前の自然環境を理解するために重要であるとともに，①事業管理における意思決定，②セーフティケースの構築に利用されるシステム挙動の理解の強化およびそれらの挙動に対する予測モデルの詳細検討，③社会受容と信頼性強化，④将来の意思決定のための環境データベースの蓄積，というモニタリングの目的を支援するために利用

されるとしている（I A E A, 2001）。また、原子力安全委員会は、地層処分におけるモニタリングに対して、「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・点検などを実施することが必要である」と述べており（原子力安全委員会、2000）、調査段階からモニタリングを行うことの必要性を示している。

海外では、スイスの放射性廃棄物処分概念専門家グループ（E K R A, 連邦政府の環境・輸送・エネルギー・コミュニケーション省（U V E K）が組織した専門家グループ）が回収可能性を維持した地層処分の観点から「モニタリングを行う長期的な地層処分施設（a monitored long-term geological disposal facility）」の概念を示しており（E K R A, 2000）、また、フランスでは将来世代の意思決定の柔軟性を尊重した可逆性（法的な要件）の観点からモニタリングを位置づけている（A N D R A, 2005）。さらに、E C はモニタリングに関する国際共同研究 M o D e R n を開始するなど（<http://www.modern-fp7.eu/>）、モニタリングに対する関心が高まってきている。

わが国においては、地層処分に関連する法令としては、2007年6月に改正された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（平成12年、法律第117号）および「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（昭和32年、法律第166号）、ならびにそれに伴い2008年3月に制定された「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則」（平成20年、経済産業省令第23号）などがある。これらの法令において、事業許可後の規制に関するマイルストーンとともに、保存すべき記録やマイルストーンにおいて提示すべき内容などが定められており、それら記録や提示すべき内容の一部はモニタリングにより取得されるべきものであることが廃棄物安全小委員会（2008）の報告書から解釈することができる。なお、環境放射線モニタリングについては、「環境放射線モニタリング指針」（平成20年3月、原子力安全委員会）が定められている。

上記のような国内外におけるモニタリングに対する動向の下、本報告書では、事業の各段階におけるモニタリングの役割、モニタリングの項目抽出、モニタリングプログラムの運用方法など、地層処分に特有のモニタリングの基本的考え方について述べる。特に、地層処分において重要な閉鎖後長期の安全確保とモニタリングの関係、および地下調査施設の建設前から開始する必要がある初期ベースライン把握のためのモニタリングのあり方を中心に検討する。なお、具体的なモニタリングプログラムは概要調査の段階の開始前までに作成（概要調査の一部とする可能性もある）するが、将来世代の意思決定を尊重し、柔軟性を持たせるために、事業の進展とともにチェックし、必要に応じて修正することが重要である。

1. 2 目的

本報告書の目的は、以下のとおりである。

- ・ 長期間の事業の中でのモニタリングを体系的に位置づけ、長期にわたる地層処分の信頼性を向上させること
- ・ 概要調査の段階が始まる前にモニタリングの体制を整えること
- ・ モニタリングの観点からの概要調査への要件を示すこと
- ・ モニタリングに関する技術開発の方向性を示すこと

1. 3 定義

本報告書では、モニタリングを以下のように定義する。

モニタリング：

地質環境，周辺環境，作業環境，放射線，処分システムの構成要素の継続的あるいは定期的な観測または計測

また，地下調査施設の建設前から開始するモニタリングの重要な役割は，地下調査施設の建設による擾乱を受ける前の状態推移を取得することであり，「初期ベースライン」を定義する。

初期ベースライン：

最終処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）における地下調査施設の建設以降の事業による擾乱を受ける前の地質環境，周辺環境，放射線の状態推移

2. モニタリングに関する要件・考慮事項

モニタリングプログラム策定に当たって考慮すべき前提条件として、「法定要件」、「法定要件に準ずる要件」、「その他に考慮する事項」を設定した（図-1）。

法定要件に準ずる要件とは、法令ではないが将来の安全規制の考え方に影響を及ぼすことが予想される原子力安全委員会や廃棄物安全小委員会の報告書、国際原子力機関（IAEA）の安全基準文書を指す。その他に考慮する事項は、原環機構がモニタリングプログラムを策定するに当たって自ら必要と考える事項である。本章ではそれらについて示す。

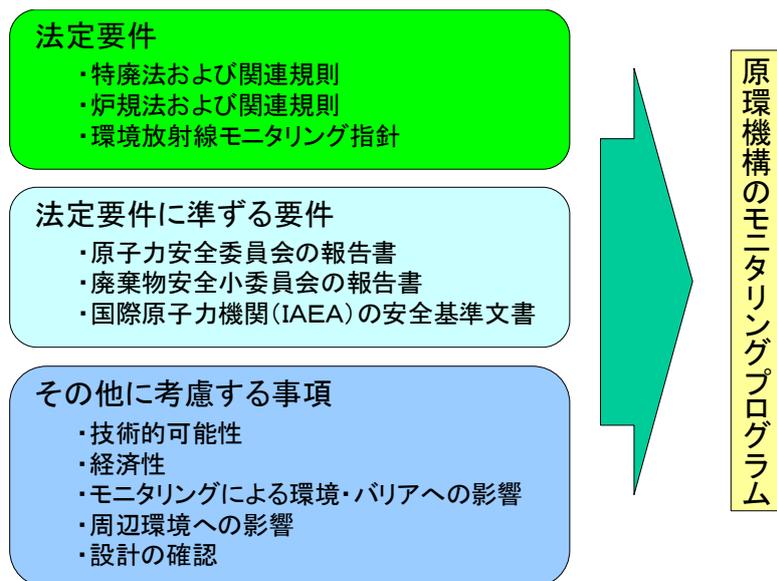


図-1 モニタリングプログラム策定に当たって考慮すべき前提条件

2. 1 法定要件

地層処分に関連する主な法令、指針は以下のとおりである。

- ・ 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、平成 19 年 6 月 13 日最終改正、以下「特廃法」）
- ・ 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律施行規則（平成 12 年 8 月 31 日通商産業省令第 151 号、平成 19 年 12 月 25 日最終改正、以下「特廃法規則」）
- ・ 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年 6 月 10 日法律第 166 号、平成 19 年 6 月 13 日最終改正、以下「炉規法」）
- ・ 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則（平成 20 年 3 月 28 日経済産業省令第 23 号、平成 20 年 3 月 28 日最終改正、以下「第一種廃棄物埋設規則」）
- ・ 環境放射線モニタリング指針（平成 20 年 3 月、原子力安全委員会）

この中で、環境放射線モニタリング指針以外では、モニタリングに対する直接的な要件はない。本節ではモニタリングに直接的・間接的に関連する法令、指針の要件について示す。なお、労働安全衛生法、水質汚濁防止法、酸素欠乏症など防止規則などの一般的な土木工事に関するものは本報告書では詳述しない。なお、周辺環境の保全については 2. 3 節に示すようにモニタリングプログラムの策定において考慮するが、環境影響評価法において地層処分事業は今後検討することとなっ

ている（環境影響評価制度総合研究会，2009）。

(a) 特廃法および特廃法規則

モニタリングに関して，特廃法および特廃法規則に基づく直接的な要件はない。

特廃法および特廃法規則においては，精密調査地区選定段階（概要調査の段階），最終処分地選定段階（精密調査の段階）に対して以下のような要件が示されている。当法令においてモニタリングに対する直接的な要件はない。

精密調査地区選定段階（概要調査の段階）：

概要調査地区のうち次のいずれにも適合していると認めるものの中から精密調査地区を選定する。

- ・ 当該対象地層などにおいて，地震などの自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと
- ・ 当該対象地層などが坑道の掘削に支障のないものであること
- ・ 当該対象地層など内に活断層，破砕帯または地下水の水流があるときは，これらが坑道その他の地下の施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること
- ・ その他経済産業省令で定める事項（第四紀の未固結堆積物であるとの記録がないこと，経済的に価値が高い鉱物資源の存在に関する記録がないこと）

最終処分地選定段階（精密調査の段階）：

精密調査地区のうち次のいずれにも適合していると認めるものの中から最終処分施設建設地を選定する。

- ・ 地下施設が当該対象地層内において異常な圧力を受けるおそれがないと見込まれることその他当該対象地層の物理的性質が最終処分施設の設置に適していることと見込まれること
- ・ 地下施設が当該対象地層内において異常な腐食作用を受けるおそれがないと見込まれることその他当該対象地層の化学的性質が最終処分施設の設置に適していることと見込まれること
- ・ 当該対象地層内にある地下水又はその水流が地下施設の機能に障害を及ぼすおそれがないと見込まれること
- ・ その他経済産業省令で定める事項

(b) 炉規法および第一種廃棄物埋設規則

炉規法および第一種廃棄物埋設規則において，気象，地下水の水位，作業者に対する放射線の記録保存が求められている。モニタリングという表現は使われていないが，これらの項目はモニタリングにより取得されるものと考えられる。

本法令では，事業におけるマイルストーンおよびその際に提示すべき内容などが規定されている（表-1）。提示すべき内容のうち，事業許可申請時の気象・水理・地震などの状況に関する説明書や，閉鎖措置計画の認可申請時あるいは閉鎖措置の確認時の「地下水の状況を明らかにする書類および図面・説明書」に関しては，一部モニタリングにより取得するものも含むと考えられる。

また，本法令には「記録」に関する要件が示されている。第一種廃棄物埋設規則第44条の表に示される記録事項（付録A）のうち，「七 気象記録」，「八 地下水の水位」などはモニタリングにより取得される必要があると考えられる。積算降雨量および地下水の水位は，廃止措置の終了の確認まで保存することが求められている。また，作業者に対するモニタリングも記録事項として示されており（「三 放射線管理記録」），原子力発電所等とほぼ同等のモニタリングを行うこととなると考えられる。

記録：

炉規法第51条の15

廃棄事業者は、経済産業省令で定めるところにより、廃棄物埋設又は廃棄物管理の事業の実施に関し経済産業省令で定める事項を記録し、これをその事業所に備えて置かなければならない。
 第一種廃棄物埋設規則第 44 条

法第 51 条の 15 の規定による記録（第一種廃棄物埋設の事業に係るものに限る。）は、事業所ごとに、次表（付録 A）の上欄に掲げる事項について、それぞれ同表中欄に掲げるところに従って記録し、それぞれ同表下欄に掲げる期間これを保存して置かなければならない。

表の抜粋

七 気象記録（法第五十一条の十八第二項の認可又は変更の認可を受けた保安規定に定めるところにより、記録しないこととした場合を除く。） イ 風向及び風速	連続して	十年間
ロ 降雨量	連続して	十年間
ハ 一月間についての積算降雨量	毎月一回	第七項に定める期間
ニ 大気温度	連続して	十年間
八 地下水の水位（法第五十一条の十八第一項の認可又は変更の認可を受けた保安規定に定めるところにより、記録しないこととした場合を除く。）	毎月一回	第七項に定める期間

表-1 モニタリングに関する主なマイルストーンと提示すべき内容の概要

モニタリングに関する 主なマイルストーン	時期	主な提出書類、図面の規定
事業許可申請 (炉規法第 51 条の 2, 規則第 3 条の 2)		・気象、地盤、水理、地震、社会環境などの状況に関する説明書 ・放射線管理施設の設備 - 屋内管理用の主要な設備および機器の種類 - 屋外管理用の主要な設備および機器の種類
定期的な評価(安全レビュー) (炉規法第 51 条の 16, 規則第 58 条)	許可を受けた日から二十年を超えない期間ごと	規定なし
閉鎖措置計画 (炉規法第 51 条の 24 の 2 第 1 項, 規則第 73 条の 2)		地形、地質および地下水の状況を明らかにする書類および図面
閉鎖措置の確認 (炉規法第 51 条の 24 の 2 第 2 項, 規則第 76 条)	坑道の閉鎖の工程ごと	地形、地質および地下水の状況に関する説明書
廃止措置計画 (炉規法第 51 条の 25 第 2 項, 規則第 79 条の 2)		定期的な評価等の結果に関する説明書
廃止措置の終了の確認 (炉規法第 51 条の 25 第 3 項, 規則第 83 条)		核燃料物質による汚染の分布状況

(c) 環境放射線モニタリング指針

「環境放射線モニタリング指針」(原子力安全委員会, 2008)において、環境放射線モニタリングを行う状況により、平常時モニタリング、平常時モニタリングの強化、緊急時モニタリングに区分し、計画、実施および評価などの基本的考え方と、各区分における国、地方公共団体、事業者の役割を定めている。

○ 平常時モニタリング

平常時モニタリングの目的は、原子力施設の周辺住民などの健康と安全を守るため、環境における原子力施設に起因する放射性物質または放射線による周辺住民などの線量が、1年間の線量限度

を十分に下回っていることを確認し、その結果を周辺住民などに提供することとしている。また、平常時モニタリングにより、原子力施設からの予期しない放射性物質または放射線の放出があった場合に適切に対応することが可能となることも重要である、としている。さらに、異常事態または緊急事態が発生した場合に、速やかに対応できるモニタリング体制を整備することにある、としている。

平常時モニタリングは、地方公共団体が中心となって原子力事業者とともに実施することとし、空間放射線の測定、環境試料の採取および環境試料中の放射能の測定を要求している。また、それらのモニタリング結果の評価などを要求している。

また、空間放射線および環境試料中の放射能のバックグラウンドとその特性の把握などのために行う操業前調査は、操業開始前の1年以上にわたって実施することが示されている。

表-2 に指針において示された代表的なモニタリングの調査内容を示す。

表-2 代表的な環境放射線モニタリングの調査内容（原子力安全委員会，2008）

区分	調査対象	測定頻度	備考		
空間放射線	線量率	連続測定			
	積算線量	四半期毎に測定	線量率測定結果から算出することも可能		
環境試料	大気	連続採取し測定	ガスモニタ，ダストモニタ等		
		連続採取し 1～3ヶ月毎に採取し測定	浮遊じん等		
		陸水	四半期毎に採取し測定	飲料水等	
	陸上試料	牛乳	必要に応じて採取し測定	I-131分析	
		土壌	半年～1年毎に採取し測定	表層土	
		農産食品	収穫期に採取し測定	葉菜，根菜，米等	
		指標生物	四半期～1年毎に採取し測定	ヨモギ，松葉等	
		降下物，降水	1ヶ月毎に採取し測定	水盤法等	
		海洋試料	海水	半年毎に採取し測定	表層水
			海底土	半年～1年毎に採取し測定	表層土
	海産食品		漁期に採取し測定		
	指標生物		四半期毎に採取し測定	ホンダワラ等	

（注）空間放射線の線量率は必要に応じてガンマ線エネルギーの測定を行う。また、環境資料は原則として核種分析を行う。

○ 平常時モニタリングの強化

平常時モニタリングの強化は、原子力施設において異常事態が発生した場合に、周辺住民などおよび周辺環境への影響の有無またはその大きさを迅速に把握するとともに、異常事態の原因およびその様態を明らかにすることにより、緊急時モニタリングに備えることを目的としている。

平常時モニタリングの強化について、国、地方公共団体、指定公共機関、原子力事業者は、防災基本計画などに基づいて放射能影響の早期把握のための活動を行うことが求められている。

○ 緊急時モニタリング

緊急時モニタリングは、原子力施設において緊急事態が発生した場合に、避難、飲食物摂取制限などの放射線防護対策に必要な情報を収集し、原子力施設に起因する放射性物質または放射線の周辺住民などへの影響の評価に資することを目的としている。

緊急事態の発生後においては、国、地方公共団体、指定公共機関および原子力事業者は、防災基

本計画などに基づいて放射能影響の早期把握のための活動を行うことが求められている。

2. 2 法定要件に準ずる要件

モニタリングに関するその他の主な要件としては、

- ・ 原子力安全委員会の報告書
- ・ 廃棄物安全小委員会の報告書
- ・ 国際原子力機関（I A E A）の安全基準文書（WS-R-4, DS334）

がある。原子力安全委員会の報告書は、安全規制の基本的考え方を示したものである。また、廃棄物安全小委員会の報告書はそれを受けて、炉規法に示されたマイルストーンに対する規制のあり方について説明したものであり、第一種廃棄物埋設規則に反映されている。また、I A E Aの安全基準文書は国際標準としての要件や指針を示したものである。これらは法定要件に比較して拘束力はないが、事業推進のために満足すべき要件と考えることが重要である。社会的な要件やその他のステークホルダーからの要件は明確ではないが、廃棄物安全小委員会の中で一部社会的要件に関する記述が含まれている。

(a) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会

原子力安全委員会（2000）では、事業の全期間を通して、安全評価の結果が確実に担保されるように行う安全確認の一環として、モニタリングを行うことを要求している。

原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会は、地層処分におけるモニタリングに対して、「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）の中で、「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・点検などを実施することが必要である」と述べている。

(b) 廃棄物安全小委員会

廃棄物安全小委員会の報告書では、モニタリングと安全レビューの関係、モニタリングと閉鎖措置の関係、閉鎖後のモニタリングの考え方など、基本的なモニタリングのあり方が示されている。

廃棄物安全小委員会は、「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制制度のあり方について」（平成18年9月11日）および「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（報告書）」（平成20年1月）において、炉規法に示されたマイルストーンに応じたモニタリングの役割などについて言及している。これらの報告書では、事業許可後の段階的な安全確認と閉鎖措置への対応、および事業廃止までの対応に関する記述が中心となっている。着目すべき事項は、安全規制の観点からは、受動的なシステムに移行する閉鎖措置に処分事業としての重点を置いており、それへのインプットとしてモニタリングを位置づけている点である。そのほか、保安のために必要な措置として、放射線モニタリングが示されている。

以下、モニタリングに関係する記載箇所を転記する。重要箇所には下線を施した。

- 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制制度のあり方について（平成18年9月11日）（廃棄物安全小委員会、2006）

「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制制度のあり方について」（廃棄物安全小委員会、2006）では、高レベル放射性廃棄物およびTRU廃棄物の地層処分を対象に、立地段階から廃

止までの各段階における安全規制のあり方を述べている。その中で、「IV. 4. 事業の各段階に応じた安全規制のあり方」の「(2) 許可申請から事業廃止まで」の「④操業段階」、「⑥処分場閉鎖に際しての安全確認」、「⑧処分場閉鎖後の制度的管理等と安全規制」にモニタリングの役割について示している。

④操業段階

操業段階とは、埋設坑道の一部完成後、廃棄体を処分場に受け入れる段階から、処分場の閉鎖に至るまでの間の事業が該当する。

操業段階における処分場の地上エリア等の諸施設のうち重要な施設については、施設定期検査に準じ、その性能の維持に関する定期的な安全確認を行うことが適当である。また、廃棄体についても受入、保管、定置、埋め戻しの工程が生じるが、これについても廃棄物埋設事業における廃棄体確認に準じた安全確認をすることが適当である。

また、操業が長期にわたるため地下エリアの開発に伴って地質等のデータが得られ、さらに最新の科学技術的知見が蓄積されることから、それらデータ等を踏まえて、適切な時期又は適切な事業の進展毎に事業実施主体が定期的に安全に関して調査（定期安全レビュー）を行い、規制機関がその安全性を確認することによって、安全確保の信頼度を高めるとともに、必要に応じて適切な措置を講ずることが重要である。

さらに、建設・操業段階を通じて行われる各種のモニタリング（処分場の地下環境に関するモニタリング、放射性物質の漏洩検知のための放射能モニタリング等）は、操業中の安全を確認するのみならず、閉鎖時の最終的な安全評価を行う上で必要なデータを提供するものでもあり、安全上その適切な実施を求めていくことが必要である。なお、高レベル放射性廃棄物等の輸送については既に海外からのガラス固化体の海上及び陸上の輸送について十分な実績があり、基本的に現行の法令下で対応が可能と考えられるが、立地点の状況等に応じて、具体的計画が明らかになった時点で必要に応じ検討していくことが適当である。

⑥処分場閉鎖に際しての安全確認

処分場を閉鎖することは、処分場としての完成、処分事業の実質的な終了という重要な側面を有し、また閉鎖以降は物理的に廃棄体の回収も困難となる。このため、閉鎖要件を明確化し、閉鎖に当たっては、閉鎖後の処分場の安全性の見通しについて、最新の知見及び建設・操業を通じて得られたデータ等を基に事業実施主体における安全評価を求めることが必要である。また、この安全評価について、閉鎖後の長期の安全が確保されていることを国が改めて確認することも必要である。このための手続きとして、例えば、閉鎖措置計画の認可を設けることが適当と考えられる。

閉鎖措置計画においては、安全評価以外に、地下施設の閉鎖及び地上施設の解体・撤去を安全に行うための計画を定めることが必要である。このほか、閉鎖後においては、事業実施主体が行う処分場跡地の管理及び必要に応じて地下水流動等のモニタリングが一定期間実施されることとなる。

⑧処分場閉鎖後の制度的管理等と安全規制

IAEAの安全基準文書においては、最終処分施設は、閉鎖後の制度的管理によらず安全性が確保されるように、設計、建設、閉鎖されるべきであるとされている。ただし同時に、制度的管理は、閉鎖後施設の受動的な安全設計を妨げる非意図的な人的活動の可能性を低減させる効果を持つことから、処分システムの社会的受容性を高め、安全に寄与するとされている。

この観点から、閉鎖後も一定期間事業実施主体が存続し、その間は、処分場への外部からのアクセスに対する管理を行うことが想定されるが、処分場閉鎖後の一般的な制度的管理として国が実施すべきものは、処分場跡地への非意図的な第三者のアクセスの可能性をより低減し、また将来世代の周辺地域の利用に関する意思決定に役立てるための国による処分記録の保管、公示及びより直接的な措置としての保護区域の設定が考えられる。

なお、現行特廃法では、安全規制とは別の観点から、経済産業大臣が最終処分施設に関する記録を永久保存すること、さらに事業実施主体の申請により保護区域として指定することが既に規定されている。

また、事業実施主体の解散後の保護区域指定の継続の要否・期間については、特廃法において事業実施主体の解散については別途法律で定めるところとされていることから、その際に改めて検討することが合理的と考えられる。

処分場閉鎖後のモニタリングについては、事業実施主体が、地上環境モニタリング（周辺環境の大気質、水質、空間の放射線等）やボーリング孔を利用しての地下環境モニタリング（地下水の水

位、水質等)を処分場の操業に継続して実施することが必要に応じて求められる。ただし、無期限のモニタリングに依存することなく、安全が確保されるよう施設の設計等がなされることが必要であり、どのような観点からどのようなモニタリングをどの程度の期間行うかについては、今後、整備されるモニタリング技術も踏まえ、将来閉鎖の時点で、地質環境、社会的要請等を考慮して、改めて判断することが合理的と考えられる。

- 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（報告書）（平成 20 年 1 月）（廃棄物安全小委員会，2008）

「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（報告書）」（廃棄物安全小委員会，2008）では、「5. 3 保安のために必要な措置について」、「5. 4 安全レビューについて」、「5. 5 閉鎖措置について」、「5. 7 閉鎖後の制度的管理について」において、モニタリングの役割について示されている。

5.3 保安のための必要な措置について

許可後において国は、施設の設計及び工事の方法の認可、使用前検査や施設定期検査もしくは建設段階における施設確認を行い、基本設計ないし基本的設計方針が施設等に適切に反映され維持されていることを確認する。

また、廃棄物埋設施設の操業中の安全を確保するため、事業実施主体に対し、施設の保全等について必要な措置を講ずることを義務づけるとともに、これらについて規定した保安規定を定め事業開始前に国の認可を受けることを義務づけている。国はその遵守状況について検査し、適切な保安措置がとられていることを確認する。したがって、保安規定の内容としては、これが災害の防止上十分であること、すなわち許可申請書等に記載された廃棄物埋設施設の操業を行うに足りるものであり、かつ埋設規則に定める保安のために講ずべき措置を行うに足りるものであることが必要である。今後設計される廃棄物埋設施設の構造や設備等によらず、保安のために求められる重要な措置の一つとして放射線モニタリングが挙げられる。その目的は、廃棄体の埋め戻し及び閉鎖までの間において、閉じ込め及び遮へい機能が設計どおりに機能し、操業中における周辺公衆や作業従事者への放射線の影響が適切に防止・低減されていることを確認することである。

放射線モニタリングは、施設の建設前に計画され、基本的には、適切な場所と頻度で放射線測定器を用いて、建設・操業中に実施される。事業実施主体は、廃棄物埋設地の隔離性等に関する事前試験等による実証性を踏まえ、モニタリングの必要性や目的、適用可能な技術を検討しつつ、適切なモニタリング計画を策定・実施することが重要であると考えられる。

長期間のモニタリングを実施する場合においては、モニタリング設備には、長期的な使用や使用環境に適応した性能が求められる。また、モニタリング設備の設置等に当たって事業実施主体は、廃棄物埋設施設の有する安全性能に及ぼす影響についても配慮しなければならない。

一方、操業中の周辺公衆等の安全確認に加えて、廃棄物埋設施設の閉鎖後の安全性を損なうことになる条件がないことを確認するための情報の収集・更新という観点からも、モニタリングは重要である。例えば、事業実施主体が自主的に、施設の安全性能を低下させない範囲で、操業中に一部埋め戻した部分について放射線モニタリング等を行い、環境中への放射性物質の漏えいの有無、閉鎖後の長期的な隔離性等を確認する上で有効と考えられるデータを取得することは、廃棄物埋設施設の安全性に関する評価の信頼性をさらに向上させるための手段の一つとして重要である。このようなデータを始めとするモニタリング結果は、次項の安全レビューの一環として収集すべきものであり、安全レビューを行う際の重要な最新知見ともなりうる。

5.4 安全レビューについて

現在、炉規法では、原子炉施設等に対して経年変化に関する技術的な評価を行う等の観点から定期的な評価を義務付けている。これは、原子炉設置者等が、プラントの運転開始以来行ってきた保安活動を評価し、必要に応じて安全性向上のために有効な追加措置を抽出することにより、今後、当該プラントが最新の原子力発電プラントと同等の高い水準を維持しつつ安全運転を継続できる見通しを得るための取り組み、また、中長期的な観点から、これまでの保守管理や劣化の状況を把握し、その結果を以降の保守管理に反映し、確実な保守管理を実施すること等を目的としている。

一方、地層処分は長期間にわたる事業であることから、事業実施主体は、事業の進展に伴い得られるデータや最新知見を踏まえてもなお、廃棄物埋設施設の操業中のみならず閉鎖後も含めた長期的な安全性が担保される見通しであることを確認すること（以下「安全レビュー」という）が重要

である。

SF-1 においても、長期間にわたって事業を継続するには、安全措置が引き続き適切であることを実証し、規制当局を納得させるための安全性についての再評価が行われるとされており、WS-R-4 では、地層処分施設は、立地、設計と管理オプション及び地層処分システムの性能と安全性の繰り返しの評価によって各々支えられる一連の段階で開発されねばならないこと及び施設の操業期間及び閉鎖の前には、定期的なレビューを行うことが指摘されている。

こうした安全レビューは、建設段階で得られる新たなデータや施設周辺の地下水情報等の地質環境データ等を始めとする各種モニタリングデータ等に加えて、その時点までに定置した廃棄体の量や今後定置する予定の廃棄体の量、さらに国内外の研究や廃棄物埋設施設と類似した原子力施設以外のトンネルや地下構造物等も含めて得られる最新の知見に基づき行う必要があり、事業実施主体はデータや知見の収集、蓄積及び更新を積極的に行う必要がある。

また、事業実施主体は安全レビューの結果を踏まえて必要に応じて適切な措置を講じていくことが重要であると考えられる。国は、これら事業実施主体の活動が適切になされているかどうか適宜確認していくことが重要である。

操業中に行う安全レビューのタイミングについては、5. 1 (2) 項で述べた施設建設を始めとする事業の進展や技術継承の観点から、適切な事業の進展毎に、または定期的に実施することが適切である。事業の進展としては、例えば、廃棄物埋設地のいくつかの区域に廃棄体を定置する場合は、単位区域を埋め戻す際などが考えられる。また、次項で述べる閉鎖の前に行う最終的な安全レビューは特に重要であることから、操業中の安全レビューの結果等も踏まえ安全審査内容の再確認を行う総合的で精緻なものとするべきである。

5.5 閉鎖措置について

閉鎖とは、許可された基本設計ないし基本的設計方針どおりの廃棄物埋設施設の完成、埋設事業の実質的な終了という重要な側面を有し、また閉鎖以降は廃棄体の回収も困難となる。このため、閉鎖措置計画を申請するにあたって、事業実施主体は、閉鎖後における廃棄物埋設施設の安全性の見通しについて、操業中に実施した安全レビュー結果や国内外の最新知見を基に安全レビューを行うことが必要である。

閉鎖措置計画では、閉鎖後期間に重要であると示された安全機能を発揮できるような方法、すなわち基本設計ないし基本的設計方針どおりの廃棄物埋設施設を完成させるために必要な、地上施設と廃棄物埋設地を連絡するアクセス坑道などの埋め戻し方法について示す必要がある。

この際、例えば基本設計ないし基本的設計方針において、埋め戻し後のアクセス坑道を介した放射性物質の移行特性に対して安全上の抑制機能を期待している場合は、埋め戻し材やその止水性能に加え、適切に措置するための方法を閉鎖措置計画に示す必要がある。

さらに、基本設計ないし基本的設計方針どおりの安全性が確保されることを確認するための方法についても示すべきである。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の方法などが挙げられる。

国は、閉鎖後の長期の安全性に変化がないことを安全レビュー結果等により予め確認したうえで、閉鎖措置計画の認可にあたって、基本設計ないし基本的設計方針どおりの廃棄物埋設施設を完成するために必要な措置・工程が適切であり、閉鎖措置の実施が災害防止上支障ないことを確認することが重要である。

閉鎖措置終了にあたって国は、認可された閉鎖措置計画どおりに措置されていることを確認する。

5.7 閉鎖後の制度的管理について

廃棄物埋設地は、生活環境から隔離され、長期的な制度的管理に依存しなくても安全性が維持されるよう閉鎖されることが必要である。

一方、閉鎖後の制度的管理は、廃棄物への不注意な干渉など、人間活動の発生可能性をさらに低減し、安全性や地層処分の社会的受容性を高めることに寄与すると考えられる。

具体的な制度的管理として、WS-R-4 では、5. 6 項に示した記録の保存に加えて、土地利用管理、用地制限、モニタリング及び地表下における耐久性のある位置標識（以下「マーカー」という）の利用が挙げられている。事業規制を行う特魔法では、事業実施主体の申請により処分場跡地等を保護区域として指定し、保護区域に指定されたエリアにおいては掘削行為等が制限される。

また、マーカーに関しては、その意義、有効性や技術的可能性等について、今後検討することが重要である。

(c) IAEA

IAEAの安全要件 WS-R-4 では、モニタリングに関する要件を以下のように示している。

モニタリングプログラムは、建設および操業段階の前あるいはその時期に決定され、実行されなければならない。このプログラムは、操業中の作業員および公衆の安全と環境の保全のために必要な状態を確認するため、また、閉鎖後の安全性を低減するような状態とならないことを確認するための情報を収集し更新するよう設計されなければならない。

IAEAの安全基準文書は、「原則 (Safety fundamentals)」、「要件 (Safety requirements)」、「指針 (Safety guide)」という三層構造となっており、「要件」には必ず満たすべき事項 (shall-statements)、「指針」には要件を満たすための推奨事項 (should-statements) が記載されている。高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する要件を示した安全基準文書 WS-R-4 には、モニタリングに対する要件も含まれている。WS-R-4 は低レベル放射性廃棄物の地層処分に関する要件を示した安全基準文書 WS-R-1 と統合される予定でありドラフト版である SSR-5 DS354 が公開されている (IAEA, 2009a) が、ここでは WS-R-4 における記述を参照することとする。なお、SSR-5 DS354 は低レベル放射性廃棄物の地層処分も対象として含むことから、閉鎖後のモニタリングを閉鎖後安全性の観点から行うことを許容する表現となっているが、地層処分では原則として閉鎖後の安全性を閉鎖後のモニタリングに依存することがないよう措置することが適切である。

モニタリングに関する指針は、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する指針のドラフト DS334、モニタリングおよびサーベイランスに関する指針のドラフト DS357 があるが、後者は公開されていない。前者についてもドラフト版であるが、重要な内容が含まれているため以下に紹介する。なお、指針は要件ではないため、必ずしも満たす必要はないとされている。

○ IAEA Safety Standards, Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, No. WS-R-4 (IAEA, 2006)

- ・ **【受動安全に関する要件】**事業者は、閉鎖後の安全性が受動的な方法によって確保され、閉鎖後の活動に依存しないよう、サイト選定、地層処分施設的设计、建設、操業、閉鎖しなければならない。(3.18) (The operator shall site, design, construct, operate and close the geological disposal facility in such a way that post-closure safety is ensured by passive means and does not depend on actions being taken after the closure of the facility.)
- ・ **【モニタリングプログラムに関する要件】**モニタリングプログラムは、建設および操業段階の前あるいはその時期に決定され、実行されなければならない。このプログラムは、操業中の作業員および公衆の安全と環境の保全のために必要な状態を確認するため、また、閉鎖後の安全性を低減するような状態とならないことを確認するための情報を収集し更新するよう設計されなければならない。(3.73) (A programme of monitoring shall be defined and carried out prior to and during the construction and operation of a geological disposal facility. This programme shall be designed to collect and update the information needed to confirm the conditions necessary for the safety of workers and members of the public and the protection of the of the environment during the operation of the facility, and to confirm the absence of any conditions that could reduce the post-closure safety of the facility.)

その他のモニタリングに関する主な記述は以下のとおりである。

- ・ 閉鎖後の安全性は工学的バリアおよび地質のバリアによって確保されるものであり、処分場閉鎖後のモニタリングや制度的管理に依存しない。処分場は受動的に安全であるように設計される。ただし、現在あるいは将来の当局が決めた場合に、モニタリングを行うことができないというわけではない。(1.5)
- ・ 操業段階では、処分場閉鎖の意思決定に資するために、モニタリングおよび試験プログラムが継続され、セーフティケースにおける閉鎖後の状況の開発が一層進められる。(1.8)

- ・ 閉鎖後の段階では、処分場の安全性はサイトと施設および廃棄体パッケージに本質的に備わっている特性によって受動的に確保される。ただし、モニタリングを含む制度的管理が住民理解の観点から行われるかもしれない。(1. 8)
- ・ 平常時の操業時には、核種（例えば僅かなガス核種）の漏洩や公衆への重大な被ばく線量がないようにしなければならない。事故時においても漏洩による施設外への影響が起らないようにしなければならない。これは安全評価によって確認される。それに関係するものとして、廃棄体の仕様、汚染の管理、モニタリング、排気や排水の管理が挙げられる。(2. 9)
- ・ モニタリングは開発と操業の各段階において実施される。モニタリングの目的は、以降の評価のためのベースライン情報を提供すること、操業中の安全と施設の操作性を確実にすること、状態が閉鎖後セーフティケースと整合していることを確認することである。モニタリングプログラムは、閉鎖後安全性を低下させないよう設計、実行される。(3. 74)
- ・ 閉鎖後の安全性を確実にすることを目的とするモニタリングの計画は、可能なモニタリング戦略を示すよう、ただし柔軟性を持たせて、処分場の建設前に立案される。そして、必要に応じて更新される。(3. 75)

○ IAEA Safety Standards, Geological Disposal of Radioactive Waste, Draft Safety Guide, DS334 (IAEA, 2009b)

モニタリングに関する主な推奨事項 (should-statements) を示す。

- ・ サイト特性調査プログラムは、建設前、建設・操業中にモニタリングすべきサイト状況を特定することが推奨される。また、(中略)適切なベースライン記録を確かめるために、要求する計測精度を示すことが推奨される。ベースラインモニタリング情報は、例えば、水圧の計測、地下水と地表水の化学組成、地表水の流量、バックグラウンドの自然放射線などを含むかもしれない。サンプリングの時間インターバルは、施設の建設や操業によるサイト状況の重要な変化を早期に発見するために、適切な解像度とすることが推奨される。擾乱により得られる情報はサイトの試験やモデル開発に利用可能である。(6. 18)
- ・ 操業中の放射線モニタリングは、期待される状態で要求される事故の際に実現可能であるように設計されることが推奨される。モニタリングステーションは、外部の放射線の計測および大気や地下水の汚染の可能性をモニタリングするために設置されることが推奨される。これらのステーションは、管理区域および処分施設近傍の選択された箇所に導入されることが推奨される。(6. 33)
- ・ モニタリングとは、安全に対して重要な工学、環境、放射線に関するパラメータを継続的あるいは定期的に観測することである。モニタリングは事業期間中に実施されることが推奨される。モニタリングプログラムは、安全評価、操業安全の継続的な確認、閉鎖後安全性における仮定と実際の状況の整合性の確認に提供される。(6. 64)
- ・ モニタリングプログラムは、建設段階の前に設定され、セーフティケースの構築に組み込まれることが推奨される。母岩の特性を含むサイトのベースラインの調査は建設が始まる前に行われることが推奨される。モニタリングプログラムは、建設・操業段階において取得される新しい情報を反映するよう定期的に更新されることが推奨される。(6. 65)
- ・ モニタリングプログラムは、セーフティケースの一部に含まれることが推奨される。そして、セーフティケースの更新とともに改良される。操業の期間中には、モニタリングプログラムは環境や放射線防護の安全基準などの法令を遵守するよう利用されることが推奨される。(6. 66)
- ・ モニタリングプログラムは、規制当局あるいは他の認可機関によって検査され、独立に検証されることが推奨される。(6. 67)
- ・ 閉鎖後においては、地層処分施設は、受動的に安全となるよう設計されるよう推奨され、安全の保証のための閉鎖後のモニタリングプログラムを要求しない、あるいは依存しないことが推奨される。閉鎖後のモニタリングは、政府や規制機関により要求される場合に公衆の保証の目的のために行われるかもしれないが、受動的な安全設計を損なわないことが推奨される。(6. 68)

2. 3 その他に考慮する事項

上記のような外的な要件を満たした上で、モニタリングに対して、さらに以下のような事項を考慮することが必要である。

- ・最善で有効な技術であり，技術的に実行可能（経済性や将来的な技術開発の可能性を含む）であること
- ・モニタリングによって環境，バリア性能を極力乱さないこと
- ・周辺環境への影響

事業者として工学的な実現性や経済性を考慮することが，適切な事業の推進において必要である。そのためには，技術の現状や今後の開発動向を常に調査するとともに，必要に応じて自らも技術開発を行うことが重要である。また，廃棄体近傍でモニタリングを行う場合，人工バリアあるいは近傍の岩盤の長期的なバリア機能を脅かす可能性がある（例えば，I A E A，2001）。そのため，無線通信技術の利用の是非や本格的な操業の前に代表的な廃棄体あるいは模擬廃棄体に対してモニタリングを行うなど，バリア性能を極力乱さないような方法を検討することも重要である。

現在，環境影響評価法には地層処分事業は含まれていない。しかし，環境省の諮問機関である環境影響評価制度総合研究会（2009）は，将来的に（環境影響評価の）実施が見込まれる事業として，放射性廃棄物処分場を位置づけていることから，処分場の建設に当たっては，環境影響評価法あるいは自治体との協定などに基づいて環境影響評価を行うことが想定される。環境影響評価法に基づく調査は，事業を通して実施する地層処分におけるモニタリングと異なるが，フォローアップとして環境影響に関するモニタリングを行う可能性があることも考慮しておく必要がある。

3. モニタリングの分類と閉鎖後長期の安全確保

地層処分事業では、調査段階から事業廃止までの期間、それぞれの段階において様々な種類のモニタリングが行われる。本章では、モニタリングを目的に基づいて分類し、各段階におけるモニタリングの役割を定めるとともに、地層処分に特有の重要項目である、閉鎖後長期の安全確保とモニタリングの関係について示す。

3. 1 目的に基づくモニタリングの分類

原環機構が行うモニタリングは、その目的に基づき、「閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング」、「放射線安全の確保に関するモニタリング」、「一般労働安全の確保に関するモニタリング」、「周辺環境の保全に関するモニタリング」に分類される。これらのモニタリングの役割は事業の段階に応じて変化する。また、これらは意思決定支援および信頼性向上・安心の提供に反映される。

原環機構は、「安全確保構想 2009」において、地層処分事業における安全確保として「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」の二つの目標を達成することを述べた（原子力発電環境整備機構、2010）。後者はさらに「放射線安全の確保」、「一般労働安全の確保」、「周辺環境の保全」に分類している。モニタリングもこの考え方に準拠し、表-3 に示すように目的に基づいて分類する。また、これらのモニタリングの役割は事業の段階に応じて図-2 のように変化する。以下に、それぞれのモニタリングの概要を記す。

表-3 目的に基づくモニタリングの分類

目的		モニタリングの分類
閉鎖後長期の安全確保		閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング
事業期間中の安全確保	放射線安全の確保	放射線安全の確保に関するモニタリング
	一般労働安全の確保	一般労働安全の確保に関するモニタリング
	周辺環境の保全	周辺環境の保全に関するモニタリング

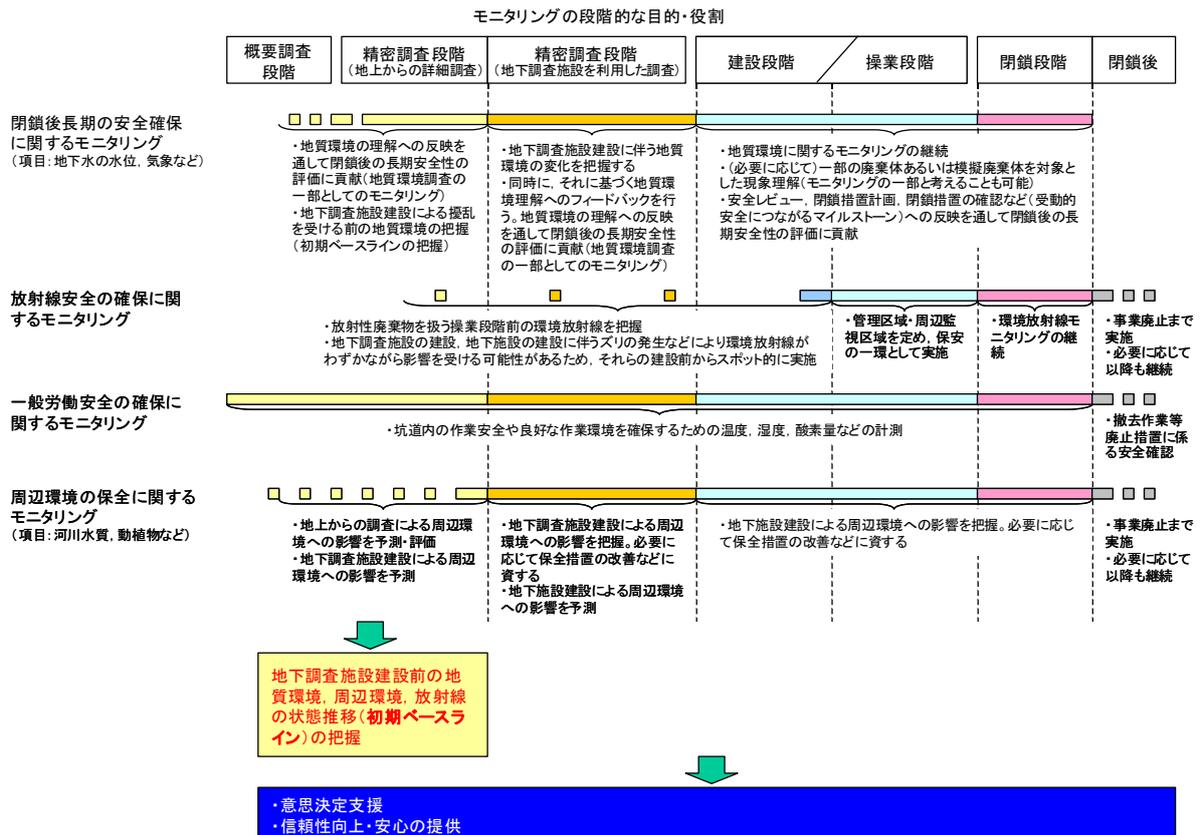


図-2 モニタリングの段階的な役割

(廃止後のモニタリングのあり方については、制度的管理の一環として行う可能性も含め、将来閉鎖(あるいは廃止)の時点で、地質環境、社会的要請などを考慮して、改めて判断する)

① 閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング

モニタリングは、事業許可以降の安全レビューや閉鎖措置の確認において、閉鎖後の長期的な安全性が担保される見通しであることを確認するために利用する最新知見のひとつと位置づけられる(例えば、廃棄物安全小委員会, 2008)。一方、事業許可前の調査段階においても、モニタリングには、地質環境の理解への反映を通して閉鎖後長期の安全確保に貢献することを期待していることから、調査段階からこの目的の下でモニタリングを開始することが妥当である。なお、調査段階に行うモニタリングは、地質環境調査の一部と考えることも可能である。

この目的の下で行うモニタリングの項目は、地質環境の状況に応じた安全評価のシナリオやモデルの開発、また、重要な現象の理解とともに具体化される。その際には、地質環境の状況だけでなく、モニタリング技術の状況、耐久性、モニタリングそのものによるバリアへの影響、経済性を考慮する。代表的なモニタリング項目は、地下水の水圧(水位)である。地下水の水圧(水位)は、代表的な安全評価シナリオである地下水シナリオに関するパラメータのうち、閉鎖に至るまでの期間において変化するものであることから、どのようなサイトにおいても重要なパラメータとなると考えられる。ただし、安全評価で対象とする期間は、例えば第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)のリファレンスケースでは、線量のピークが出現する時期は閉鎖後数十万年後であり、モニタリングを行う期間(閉鎖あるいは事業廃止までの百年程度)とは大きく異なっており、

モニタリングによって、安全評価で仮定されるシナリオやモデル自体の確からしさを直接的に確認するために行うことは不可能である。モニタリングは、安全評価シナリオの基礎となっている地質環境モデル¹の妥当性を確認するなど、間接的な確認のために行うものである。

② 放射線安全の確保に関するモニタリング

地層処分事業においては、操業段階において放射性廃棄物を扱うことから、管理区域・周辺監視区域を定め、保安のための一環として放射線安全の確保のための放射線モニタリングを実施する。環境放射線のモニタリングは、環境放射線モニタリング指針（原子力安全委員会、2008）に基づき、周辺監視区域において、空気中の放射線量、海水・土壌・農産物・海生生物などの環境資料を適宜採取し、放射線の測定を行う。また、管理区域におけるモニタリングは、現行の原子力施設周辺において実施されている放射線モニタリングを参考にして実施することができるが、処分場の場合、管理区域の移動を考慮して計画、実施する必要がある（原子力発電環境整備機構、2004）。

③ 一般労働安全の確保に関するモニタリング

坑道内の作業安全や良好な作業環境を確保するために、温度、湿度、酸素量、ガス、粉塵などを継続的に測定する。原則的には土木、鉱山、原子力などの分野における現行の法規制あるいは基準類などに準拠して実施可能である。このモニタリングは、地下調査施設の建設開始時点から実施し、閉鎖の終了時点まで継続する。

④ 周辺環境の保全に関するモニタリング

このモニタリングは、周辺環境の保全の一環として行われるモニタリングである。事業の実施による周辺環境への影響を予測、評価するため、大気質（粉塵）、気象、騒音・振動、河川・地下水の水圧（水位）・水質、動植物などの項目について継続的に測定する。保全措置の効果を適宜評価し、必要があれば保全措置の改善もしくは追加措置の検討に資する。

なお、上記の目的・役割の下で行うモニタリングは、意思決定の支援情報としても重要な役割を担う。例えば、事業による周辺環境や作業員、公衆への影響が許容する値を超えないよう、モニタリング結果に応じて必要な対策を講じることが想定される。また、操業・閉鎖段階における不具合発生の際の廃棄体回収の判断、閉鎖措置の確認による受動的なシステムへの移行の判断など、要所においてモニタリング結果が意思決定を支援することとなる。さらに、モニタリングは信頼性向上・安心の提供のツールとしての役割も担っている。

3. 2 閉鎖後長期の安全確保とモニタリング

モニタリングは、事業許可降の安全レビューにおいて閉鎖後の長期的な安全性が担保される見通しであることを確認するために利用する最新知見のひとつである。

前項で示したモニタリングのうち、閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリングは、地層処分に特有の重要項目である。1. 1に示したように、地層処分の閉鎖後長期の安全を確保するためには、

¹ 地質環境モデル：地質環境特性にかかわるサイトの具体的なデータを用いて、三次元座標における構造の幾何学的性状や諸特性の分布を可視化するもので、地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル、岩盤力学モデル、物質移動モデルなどがあり、これらの総称（原子力発電環境整備機構、2010）。

以下の考え方に沿って措置されることが重要である（廃棄物安全小委員会，2008）。

- ① 長期的な観点から安全性に影響が及ぶおそれのある因子に配慮しつつ，安全確保のための対策（立地点選定，工学的対策）を講じる。
- ② 安全確保を図るため，安全審査以降における埋設事業の各段階でそれぞれの安全確保対策の妥当性について安全評価などによる安全確認を実施する。
- ③ その安全性を考慮すべき期間が長期にわたるため，制度的管理などの社会的な対応にかかわらず，長期的にはそれらに依存しなくても安全が確保されるよう措置する。

これらは、「安全確保構想 2009」（原子力発電環境整備機構，2010）の閉鎖後長期の安全確保に関する三つの「安全確保策」に包含される考え方である。立地点選定については，立地段階（調査段階）において，特廃法に基づいて概要調査地区選定段階，精密調査地区選定段階，最終処分地選定段階という段階を設定し，各段階で特廃法の法定要件を考慮した上で原環機構が自主的に定める選定上の考慮事項に基づいて候補地を選定するプロセスを導入することとしている。また，工学的対策としては人工バリアと天然の地層（天然バリア）とを組み合わせた多重バリアシステムを導入し，各バリアに多重の安全機能を期待することによって隔離機能などを担保することとしている。安全評価については，適切なシナリオを仮定し，一般公衆が放射性物質から受けると想定される線量を評価し，定められた放射線防護レベルを超えることがないことを確認することとしている。事業許可申請までは，このような立地点選定，工学的対策の設計，調査段階における調査に基づいた安全評価によって，閉鎖後の長期的な安全性を示すこととなる。

一方，事業許可以降には，建設段階において取得される新たな情報や，建設・操業段階あるいは閉鎖段階における坑道掘削や定置，埋め戻しの品質管理に関する記録，各種のモニタリング，追加的な地質環境調査など最新知見を踏まえてもなお，閉鎖後の長期的な安全性が担保される見通しであることを安全レビューにおいて確認することとなる。その過程で不確実性を低減し，最終的な廃止措置の終了の確認において，閉鎖後の長期的な安全性が確実なものと判断され，受動的なシステムへ移行されることになる。

3.3 安全レビューにおける安全確認とモニタリングの役割

モニタリングは，事業許可申請時の安全評価で仮定されるシナリオ自体の確からしさを直接的に確認するために行うものではない。別の指標をモニタリングすることにより，安全評価シナリオで仮定される状況に近づいていることを確認する，あるいは安全評価シナリオの基礎となっている地質環境モデルなどの妥当性を確認することが重要である。

事業許可以降，20年を越えない期間毎に行う安全レビューにおいては，モニタリングを含む最新知見に基づいて安全性が担保される見通しであることを確認することとなるが，事業許可申請時の安全評価で仮定されるシナリオ自体の確からしさを直接的に確認することは困難である。なぜならば，安全評価のシナリオでは人工バリアには閉じ込め性能が要求されており，事業廃止までの数十年程度の期間において核種は放出されることが期待されるためである。例えば，第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999）の安全評価の基本シナリオでは，オーバーパックは1,000年後に閉じ込め機能を失うと仮定され，安全評価対象の期間を1,000年後以降としており，そのような安全評価のシナリオをモニタリングすることは現実的ではない。TRU廃棄物に関しては，第2次TRUレポート（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）の安全評価において，一部の核種が瞬時放出されることを仮定しているが，この仮定は保守的に与えたものであり，やはりモ

モニタリングで安全評価自体の確からしさを直接的に確認することは現実的ではない。

安全評価シナリオ自体の確からしさを直接的に確認することは困難であるため、安全評価シナリオで仮定される状況に近づいていることを別の指標で確認する、あるいは安全評価シナリオの基礎となっている地質環境モデルなどの妥当性を別途確認するなどの対応を講じることが妥当である。廃棄物安全小委員会（2008）は、閉鎖措置の確認に対して、「基本設計ないし基本的設計方針どおりの安全性が確保されることを確認するための方法についても示すべきである。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の方法などが挙げられる」としており、地下水モニタリングによる代替的な指標を提案している。

I A E A（2001）も指摘しているように、坑道の埋め戻し後には、アクセスやバリア機能への負の影響の観点から、廃棄体近傍のモニタリングを行うことは困難であることが予想される。このような課題を解決するためには、無線通信技術の利用が考えられるほか、本格的な操業の前に代表的な廃棄体あるいは模擬廃棄体に対してモニタリングを行うなどの対応が考えられるが、廃棄体近傍におけるモニタリングに関する検討については、事業の進展とともに具体化することとしている。

4. 事業展開とモニタリングの役割

本章では、事業の各段階でのモニタリングの考え方を示す。

4. 1 調査段階のモニタリングと初期ベースライン

調査段階のモニタリングのうち、地下調査施設の建設前までに実施するモニタリングは、「初期ベースライン」を理解するために行われる。それ以降に実施するモニタリングは、地下調査施設の建設による影響把握と地質環境の一層の理解に向けた調査の一環と位置づけられる。

調査段階においては、地質環境調査とモニタリングは密接に関係しており、統合的に計画、実行、評価を行うことが必要である。

調査段階は、地表踏査や物理探査、ボーリング調査など地上からの調査を行う概要調査の段階と、地下調査施設を利用した調査を行う精密調査の段階から構成される（文献調査は現地での調査活動を行わないため除外）。精密調査の段階の前半には詳細な地上からの調査を行う可能性もある。調査段階のモニタリングは、その役割から、主に、

- ・ 地下調査施設の建設前までのモニタリング
- ・ 地下調査施設の建設開始後のモニタリング

に分けることができる。前者は、地質環境、周辺環境、放射線の初期ベースライン把握の一環、後者は地下調査施設の建設による影響把握と地質環境の一層の理解に向けた調査の一環と位置づけられる。

初期ベースラインの把握は、以下の観点から重要である。

- ・ 事業許可申請時およびそれ以降の安全レビュー、閉鎖措置計画の申請、閉鎖措置の確認などにおいて、閉鎖後の長期安全性に関する評価のための基準(将来の意思決定を支援する情報)のひとつとなる。
- ・ 周辺環境への影響評価や環境放射線モニタリング指針などに関する影響評価のための基準のひとつとなる。
- ・ 地質環境の理解を強化する。
- ・ 社会受容と信頼性向上に資する。

なお、EUプロジェクト「Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste」(EC, 2004)においても「ベースライン状態」あるいは「ベースラインモニタリング」という用語が示されているが、ベースラインモニタリングの目的は、処分場建設前の初期状態の把握だけでなく、それ以降の各段階開始時の初期状態の把握も包含している。”初期”ベースラインという表現は、将来新たなベースライン状態を定義する際に区別が可能となることを考慮しており、SKBの考え方(Bäckblom and Almén, 2004)(付録B)に倣ったものである。なお、独立行政法人原子力安全基盤機構(2008)は、「処分事業を実施しないと仮定した場合のシナリオにおける地下環境の経時変化」をベースラインと定義しており、初期ベースラインの把握は、事業による擾乱の発生以降のベースライン(影響評価における基準)を予測するための活動と言うことも可能である。

初期ベースラインを把握するためには、地下調査施設の建設による人為的な擾乱が生じる前からモニタリングを開始することが重要である。図-3に、地下水流動を例とした初期ベースラインとその後の変遷のイメージを示す。地下水流動場は、地下調査施設あるいは処分場地下施設の建設によって大きく変化し、閉鎖に伴い緩やかに初期ベースラインに近い状態まで回復することが期待され

る。地下調査施設などの建設に伴う地下水流動場の変化を把握するため、また、閉鎖措置の確認の際に初期状態を参照するためには、建設以前から地下水の圧力などのモニタリングを開始しておくことが重要である。IAEA (2001) は、初期ベースラインを把握するための主なモニタリング項目として、母岩およびその周辺の地下水流動場（水圧分布、動水勾配、涵養、流出域）、地下水の地球化学特性（レドックス、塩水系地下水、主要成分、自然核種）、地下水・地表水・大気・土壌・堆積物・動植物の自然放射線レベル、気象、水文、生態系などを例示している。初期ベースラインを把握するために必要となる期間は、モニタリングを行う項目や地質環境に依存する。

一方、地下調査施設の建設開始以降には、地下水位の低下など地質環境に対する影響や、生態系など周辺環境への影響を考慮する必要がある。これらの影響が許容する値を超えないようモニタリングにより確認し、必要に応じて対策を講じることとなる。また、地下調査施設の建設による地質環境に対する影響の把握は、そのフィードバックにより地質環境の一層の理解向上に役立つと期待される。例えば、岩月ほか (2007) は、瑞浪超深地層研究所を事例として、大規模地下施設の建設に伴う地下水の水圧および化学組成の変化から地下水流動特性などを分析しており、地質環境の理解のためにもモニタリングは有効であると考えられる。

上記のように、初期ベースラインの理解という観点から、モニタリングは概要調査の段階、精密調査の段階という調査段階の区切りとは異なる区切りを持つことが妥当ではあるが、調査段階におけるモニタリングは、地質環境調査と統合的に計画、実行、評価されることとなることから、地質環境調査との連携は非常に重要である。例えば、ボーリング孔を利用して行う地下水の水圧や水質のモニタリングは、地質環境調査によって掘削されたボーリング孔を利用することで、相互の比較検証が可能となり、地質環境の一層の理解に役立つことが期待され、また、経済的にも有利である。また、地質環境調査の結果は、モニタリングの項目や位置などの設計に役立つ一方、モニタリング結果も調査計画に有益なインプットをもたらすことが期待される。さらに、地下調査施設を利用した調査や試験に付随してモニタリングを行うことも可能であり、その際には、調査だけでなく実証を含む試験との相互のフィードバックが行われることとなる。調査段階において、ベースラインを理解するために、調査とモニタリングを統合化するという考え方は、IAEA (2001) や Bäckblom and Almén (2004)、BRWM (2003) などにおいても示されている。図-4 に調査段階における地質環境調査とモニタリングの関係を示した。調査段階においては、モニタリングのうち地質環境理解に反映するものは地質環境調査の一部とみなすことができる。

一方、周辺環境の保全や一般労働安全の確保に関するモニタリングと地質環境調査との相関は強くない。周辺環境や一般労働安全のためのモニタリングは、水質汚濁防止法などの法令を遵守することは当然ながら、事業に伴う環境や公衆、作業員への影響を把握し、必要に応じて対策を講じるための意思決定の支援に利用される。

放射線安全の確保に関するモニタリングについては、調査段階においては放射性廃棄物を扱わないため法的な要件はない。しかし、地層処分では精密調査の段階における地下調査施設の建設に伴うズリなどから発生するラドンなどの影響も考慮し、地下調査施設の建設前から開始することが妥当である。ただし、頻度については地質環境などに応じて検討する。操業段階以降の事業の影響を評価する手段の一環として、事業の影響を受けないと確信できる場所で環境放射線のモニタリングを行うことで、外的な影響と事業の影響の分離が可能となる。このようなモニタリングは、バックグラウンドモニタリングとして事業を通して行うことも可能であり、環境放射線モニタリング指針に基づき、国、地方自治体と連携して行うこととなる。

なお、気象、地震、GPS など、他機関（気象庁や国土地理院など）によって原環機構の調査開始前から取得されているものは、原環機構のモニタリングプログラムに含めないが、利用可能な情報は可能な限り利用することとする。

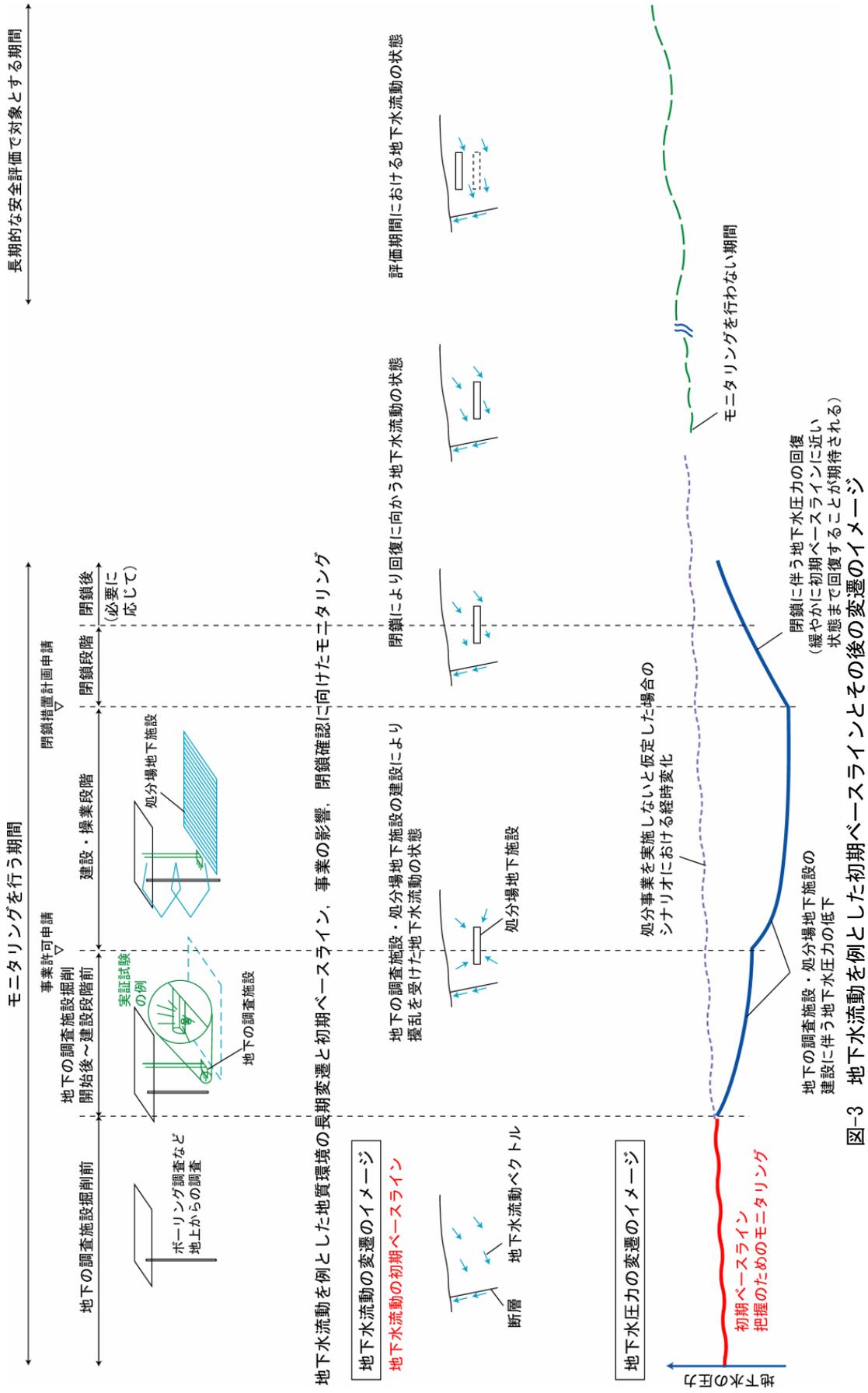
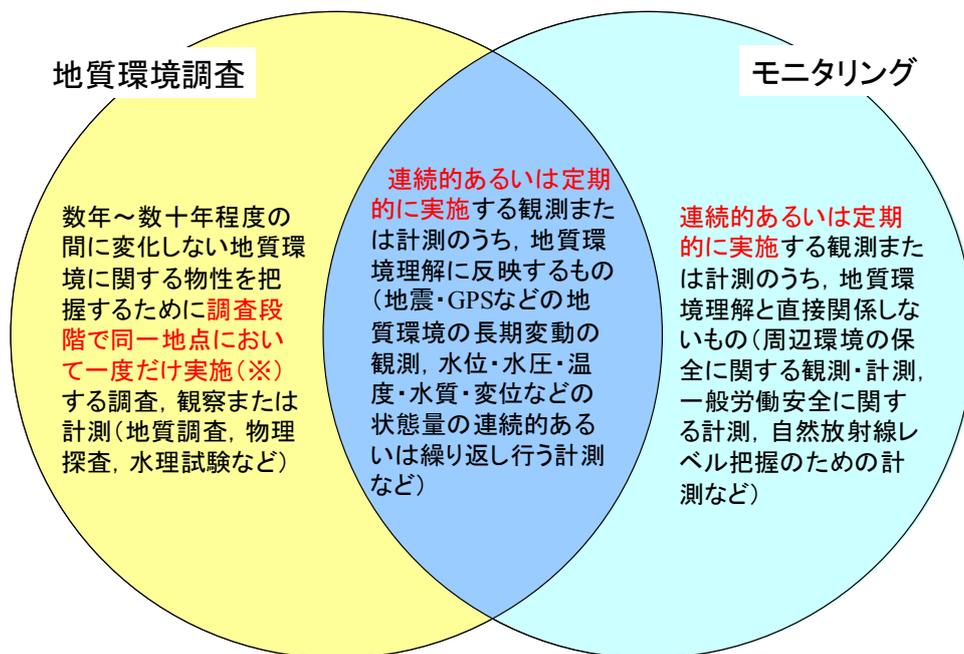


図-3 地下水流動を例とした初期ベースラインとその後の変遷のイメージ



※ただし、同一の測線での複数回にわたる物理探査はモニタリングとは位置づけない

図-4 調査段階における地質環境調査とモニタリングの関係

4. 2 建設・操業段階のモニタリング

建設・操業段階のモニタリングは、主に安全レビューおよび閉鎖措置計画の認可における記録として、閉鎖後の長期安全性の確認に対して重要な役割を担う。調査段階に引き続き、適切な運用、情報・品質管理と情報公開が必要である。

建設・操業段階のモニタリングは、主に安全レビューおよび閉鎖措置計画の認可における記録として、閉鎖後の長期安全性の確認に対して重要な役割を担う。炉規法では、安全レビューにおいて提示すべき書類あるいは図面は規定されていないが、廃棄物安全小委員会（2008）は、「安全レビューは、建設段階で得られる新たなデータや施設周辺の地下水情報などの地質環境データなどを始めとする各種モニタリングデータなどに加えて、その時点までに定置した廃棄体の量や今後定置する予定の廃棄体の量、さらに国内外の研究や廃棄物埋設施設と類似した原子力施設以外のトンネルや地下構造物なども含めて得られる最新の知見に基づき行う必要があり、事業実施主体はデータや知見の収集、蓄積及び更新を積極的に行う必要がある」とし、モニタリングの重要性を示している。安全レビューおよび閉鎖措置計画の認可においては、事業許可申請時に提示した地質環境や安全評価を、それ以降蓄積されるデータによって確認する、あるいは必要に応じて更新することで信頼性を示すことが重要である。モニタリングは、信頼性を向上するためのデータを提供する重要な手法のひとつである。

この段階のモニタリングは、適切な運用、情報・品質管理と情報公開を行いながら、調査段階から継続して実施するが、必要に応じて追加することも可能である。操業段階においては、放射性廃棄物を取り扱うことになることから、それまでに管理区域・周辺監視区域を定め、保安のための一環として放射線安全の確保に関するモニタリングを開始する。また、環境放射線モニタリング指針に基づいて環境放射線モニタリングを開始する（初期ベースラインとなる自然放射線のモニタリングについては調査段階から開始する）。

モニタリングには、異常時・緊急時の判断、廃棄体回収を含めた対策などの意思決定の支援を行うことが求められる。特に、廃棄体の回収についてOECD/NEA（2001）は、回収可能な状態が維持されていることを確認することをモニタリングに期待している。

なお、廃棄体近傍でモニタリングを行う場合、人工バリアあるいは近傍の岩盤の長期的なバリア機能を脅かす可能性があることから、本格的な操業の前に、代表的な廃棄体あるいは模擬廃棄体に対してモニタリングを行うなどの対応が考えられる。例えば、スイスでは放射性廃棄物処分概念専門家グループ（EKRA）が「長期的なモニタリングを行う地層処分施設（a monitored long-term geological disposal facility）」の概念を示し、パイロット施設において代表的な廃棄体構成物に対してモニタリングを行うことを勧告している（EKRA, 2000）（付録C）。原環機構においては、技術の適用の前に実証試験を行うことを基本としており、現時点では、初期ベースライン把握のためのモニタリング技術の実証試験を計画している。廃棄体近傍におけるモニタリングに関する検討については、事業の進展とともに具体化することとしている。

4. 3 閉鎖段階のモニタリング

閉鎖段階のモニタリングは、主に閉鎖措置の確認における記録となる。原則として廃棄体の回収可能性は閉鎖措置の確認まで維持することとし、モニタリングはその意思決定を支援するものとなる。

閉鎖段階のモニタリングは、主に閉鎖措置の確認における記録となる。特に、廃棄物安全小委員

会（2008）は、閉鎖措置計画において、「基本設計ないし基本的設計方針どおりの安全性が確保されることを確認するための方法についても示すべきである。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の方法が挙げられる」とし、閉鎖後安全性の確認のためにモニタリングの重要性を示している。閉鎖段階のモニタリングは、建設・操業段階のモニタリングと同様、事業許可申請の際に提示した地質環境や安全評価の信頼性を向上することが重要な目的のひとつである。閉鎖後には地質環境は緩やかに初期ベースラインに近い状態まで回復することが期待されることから、不確実性や自然の不可逆性を考慮し、想定される幅に入っていることを確認することが重要な目的となる。

この段階においても、モニタリングは、適切な運用、情報・品質管理と情報公開を行いながら、建設・操業段階から継続して実施し、必要に応じて追加することが可能である。また、原則として廃棄体の回収可能性は閉鎖措置の確認まで維持することとし（廃棄物安全小委員会、2006、2008）、モニタリングはその意思決定を支援するものとなる。閉鎖措置の確認は、実質的に制度的管理に依存しない受動的なシステムへの移行を意味することから、非常に重要な意思決定のマイルストーンとなる。

4. 4 閉鎖後のモニタリング

地層処分の閉鎖後の長期的な安全性はモニタリングを含む制度的管理に依存してはならないことが地層処分の考え方である。ただし、閉鎖後のモニタリングのあり方については、制度的管理の一環として行う可能性も含め、将来閉鎖の時点で、地質環境、社会的要請などを考慮して、改めて判断することが合理的である。

地層処分の閉鎖後の長期的な安全性はモニタリングを含む制度的管理に依存してはならないことが地層処分の考え方である（例えば、IAEA、2006；OECD/NEA、1999）。長期的な安全性の評価は閉鎖確認において終了するものであり、閉鎖後のモニタリングは安全性の確認の意味で行われるべきではない。ただし、廃棄物安全小委員会が「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制制度のあり方について」（平成18年9月11日）において述べているように、閉鎖後のモニタリングのあり方については、制度的管理の一環として行う可能性も含め、将来閉鎖の時点で、地質環境、社会的要請などを考慮して、改めて判断することが合理的である。

ただし、処分事業としては閉鎖措置以降においても、廃止措置として、廃棄物管理施設の解体、核燃料物質による汚染の除去、核燃料物質などの廃棄および法令で示された記録の指定機関への引渡しを行う必要がある。廃止措置の終了までは周辺環境への影響の把握、放射線防護の確認、一般の作業安全の確認、設計の確認という観点からのモニタリングは継続する。

IAEA（2006）は、モニタリングを含む閉鎖後の全ての制度的な活動について、法的、技術的および経済的な責任を定めておくことを政府に対して要求している。事業廃止後にもモニタリングを継続する場合、その責任についても、閉鎖後のモニタリングのあり方とともに、将来改めて判断することが必要である。

5. モニタリングプログラムの運用

5. 1 モニタリング項目の抽出

モニタリング項目は、法定要件などを考慮した上で、閉鎖後長期の安全確保の考え方、放射線安全の確保の考え方、一般労働安全の確保の考え方、周辺環境の保全の考え方といった基本的な戦略に基づいて導出する。

モニタリング項目は、3章で示した目的・役割を果たすように抽出されなければならない。図-5にモニタリング項目の抽出とモニタリング方法の検討フローを示す。まず、モニタリング項目抽出のための基本的な戦略として、閉鎖後長期の安全確保の考え方、放射線安全の確保の考え方、一般労働安全の確保の考え方、周辺環境の保全の考え方を基礎とする。それらの戦略に基づいて、鍵となる現象・鍵となるパラメータが導出される。その際、安全評価や環境影響評価、事故時のシナリオなど、基本的な戦略を具体化したシナリオを考慮するとともに、モニタリングが将来の意思決定に柔軟性を与えるための多面的論拠（OECD/NEA, 2004）のひとつとなるよう、現時点で想定されるシナリオに限定せず各段階で生じる重要な現象を網羅的に考慮することが重要である。例えば、IAEA（2001）は、処分場の構成物、廃棄体パッケージ、緩衝材などに対して、掘削に伴う力学的な擾乱、掘削や排水に伴う水理的・化学的擾乱、発熱廃棄体の定置に伴う熱-力学影響、処分場建設および操業に伴う地球化学的擾乱など想定される連成挙動を考慮して、モニタリングすべき項目を導出している（付録D）。ここで重要なことは、3章でも示したように、閉鎖後の長期的な安全性は、原則としてモニタリングによって直接的に確認することはできないということである。そのため、代替的な指標によって安全評価シナリオの基礎となる地質環境モデルの妥当性確認などを通して間接的に安全性を確認することが現実的である。

導出された現象・パラメータを把握・取得するための一手段として、モニタリング項目の抽出とその手法が決定される。その際には、鍵となる現象・鍵となるパラメータを直接的あるいは間接的に確認できることを踏まえながら、技術的実現性（既存技術、開発中の技術）、ステークホルダーからの要件、モニタリングそのものによる環境・バリア性能への影響（例えば、ボーリング孔を利用したモニタリングの場合、ボーリング孔掘削が天然バリアの性能を低下させないよう配慮）、経済性を考慮し、最善で実現可能なモニタリングプログラムとなるよう留意することが重要である。なお、モニタリング項目の抽出においては、国が開発を行っている「技術的選択肢（技術メニュー）」（竹ヶ原ほか、2004；原子力環境整備促進・資金管理センター、2009）を利用することも有効である。

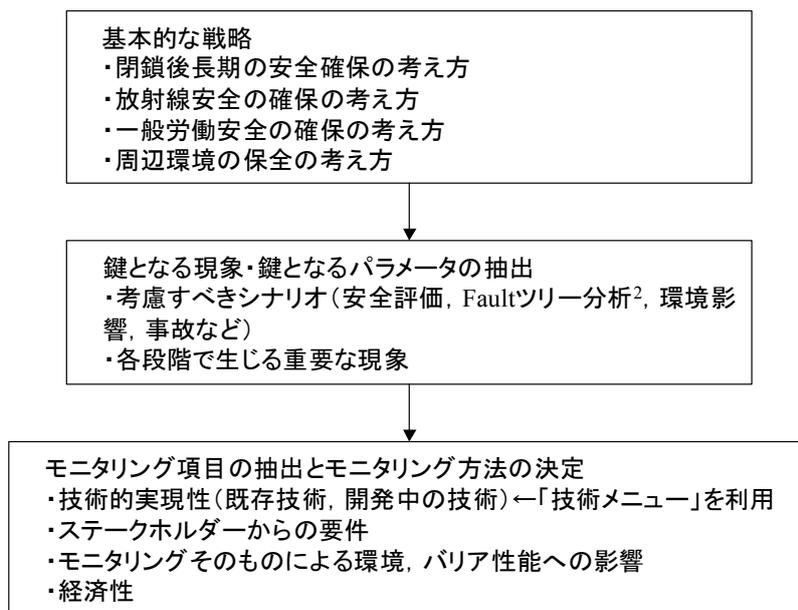


図-5 モニタリング項目の抽出とモニタリング方法の検討のフロー

5. 2 地下調査施設の建設前から開始するモニタリング項目

地下調査施設の建設前から開始する初期ベースライン把握のためのモニタリング項目として、少なくとも地下水の水圧（水位）・水質，気象に関する情報，環境放射線が挙げられる。

現世代が現時点で重視すべきことは，概要調査が始まる前に，初期ベースライン把握のためのモニタリングプログラムを示すことである。現時点では，特定のサイトが決まっていないため，詳細なシナリオなどは想定できないが，図-5のフローに基づいて，基本的なモニタリング項目を抽出することは可能である。

閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリングについては，自然過程による代表的シナリオは地下水シナリオ（原子力安全委員会，2004）とされることから，これを中心に検討することが妥当である（図-6）。地下水シナリオにおいては，地質環境（天然バリア）中の核種移行に関するパラメータとして，移行距離，亀裂の開口幅分布，亀裂密度（亀裂性媒体の場合），母岩の透水性，有効間隙率，動水勾配，実効拡散率，分配係数などが挙げられる（例えば，核燃料サイクル開発機構，1999）。これらのうち，多くは閉鎖に至るまでの期間において変化しないと考えられるものであり，調査段階における地質環境調査などで取得あるいは推定されるものである。しかし，動水勾配は地下調査施設や地下施設などの建設により変化した後，閉鎖以降に回復に向かうと予想され，継続してモニタリングをすることが重要と考えられる。動水勾配，すなわち地下水の水圧（水位）の分布は，どのようなサイトにおいても重要なパラメータとなると考えられ，地下調査施設の建設前から開始すべきモニタリング項目とする。水質については，地下施設などの建設により処分場近傍で酸化環境になる可能性があり，その後還元環境に戻ることが安全評価では仮定されると考えられる。このような観点から代表的な地下水水質についてもモニタリングを行うことが重要である。

放射線安全の確保に関するモニタリングについては，環境放射線モニタリング指針（原子力安全

² Fault ツリー分析：故障・事故などの事象の関係を図示（Fault ツリー）し，システムとしての機能について分析する方法。核燃料サイクル開発機構（2005b）は閉鎖シナリオ評価手法として利用した。

委員会，2008）あるいは保安のために必要な措置として操業中に放射線モニタリングを行うことが要求される。放射線に関する影響評価において，基準のひとつとなる環境放射線を初期の段階から記録しておくことが必要であり，環境放射線モニタリング指針では，操業前の1年以上にわたってモニタリングを行うことを要求している。しかし，地層処分では母岩の岩種によっては精密調査段階における地下調査施設の建設に伴うズリなどから発生するラドンなどの影響も考慮し，地下調査施設の建設前から開始することが妥当である。ただし，頻度については操業中と同等ではなく，時期や地質環境などに応じて検討することが妥当である。

地下水の水圧（水位），環境放射線に関連して，同時期から基礎的な情報として気象に関する情報を取得しておくことが必要である。例えば，地下水の水圧の評価において気圧による補正が必要であり，また降水量や蒸発散量は地下水流動場を考慮する際の境界条件となる。また，環境放射線の評価において風向や風速が利用される。

なお，地下水の水圧（水位）および気象に関する情報については，第一種廃棄物埋設規則第44条において記録として示されているものである。特に，前者については，廃棄物安全小委員会（2008）において，「安全レビューは，建設段階で得られる新たなデータや施設周辺の地下水情報等の地質環境データ等を始めとする各種モニタリングデータ等に加えて（中略）行う必要がある」「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の方法など」としており，地下水の水圧（水位）をモニタリングによって取得することの重要性が指摘されている。これらは事業許可申請時あるいは事業許可後についての記述であるが，事業開始前の状態を基準のひとつとして記録しておくことは将来世代の意思決定における支援情報として必要である。

これらの項目は，現存の技術でモニタリング可能である。

なお，付録Eに，概要調査の段階から開始するモニタリング項目の例を示した。

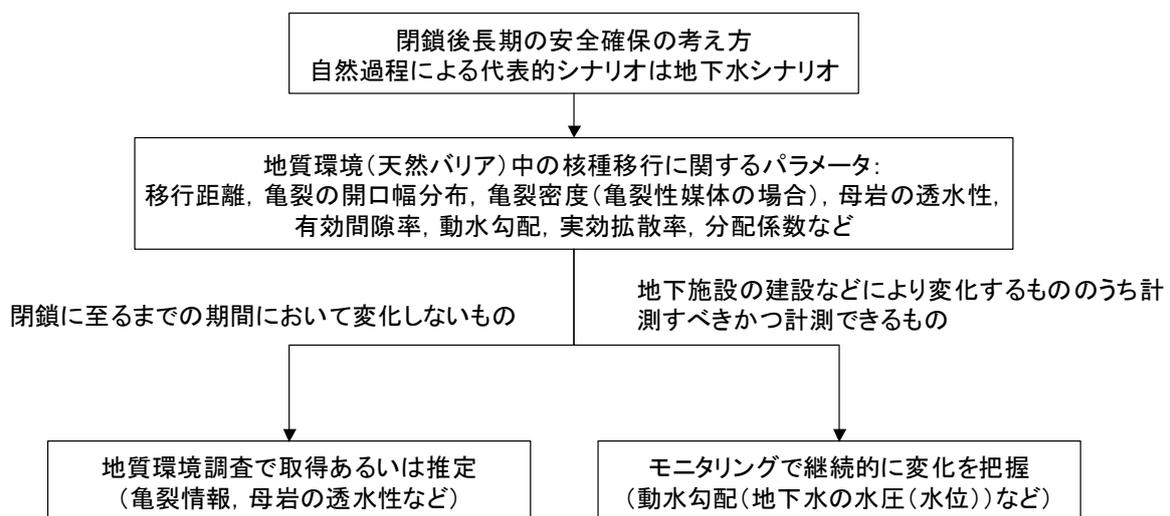


図-6 モニタリング項目（地下水の水圧（水位））の抽出の例

5. 3 運用, 情報・品質管理と情報公開

モニタリングプログラムの運用に当たっては, 将来の要件の変化や技術の進展に対応できるよう, 定期的あるいは適切な時期に見直しを行うことが重要である。また, 適切な情報・品質管理, 情報公開を行うことが重要である。

モニタリングは, 事業の開始から事業廃止まで約 100 年間という長期間に渡って実施されるものである。その間, モニタリングに対する要件の変化やモニタリング技術の進展が想定される。I A E A (2009b) がモニタリングプログラムの定期的な見直しを推奨しているように, モニタリングプログラムは将来の要件の変化や技術の進展に対応できるよう, 定期的あるいは適切な時期に見直されることが柔軟な事業の進展において重要である。

モニタリング装置に対しては, 定期的な校正, 更新 (センサー類の交換), 技術の見直し (最新技術の導入) などメンテナンスが行われる。また, ボーリング孔に設置したケーシングの劣化やモニタリング装置の老朽化により, 最悪の場合ボーリング孔が利用できなくなることが想定される。その前に新たなモニタリング用のボーリング孔を掘削するなどの対策が必要であるとともに, 老朽化したボーリング孔の適切な閉塞が必要である。技術の見直しや新しく掘削されたボーリング孔における地質環境特性の相違により, モニタリングの精度や傾向が変化する可能性がある。そのため, モニタリング装置のバージョン管理および変更時のモニタリングデータの評価が必要である。

モニタリングのデータはデータベースにより管理され, 適宜公開される。1 次データ (生データ) と 2 次データは独立に管理し, 1 次データは変更ができないような対策 (改ざん防止) が必要である。また, 定期的にバックアップを行うことが重要である。

モニタリングの異常値の検出は, 自動検出と人による検出が考えられ, そのためにあらかじめトリガーレベルを設定すること, また, 技術者の育成が求められる。モニタリングで異常が検出された場合には, 適切な対策を講じる (事業の一時停止, アラーム, 連絡体制, 初期の対策, 中長期的対策)。長期的な安全性が確保されない, あるいは, 確保されないことが明らかとなったときには, 廃棄体の回収を行うことも想定する必要がある。異常値の検出が適切に行われることを確認するために, モニタリング技術の実用性を事前に確認することも重要である。

モニタリング結果が妥当なレベルであることが, 閉鎖措置計画の認可や閉鎖措置の確認に対する意思決定の根拠のひとつとなる。

6. モニタリング技術の現状と課題

我が国では、主に国および日本原子力研究開発機構によりモニタリング技術の開発、整備が行われている。主なモニタリング技術として、日本原子力研究開発機構が所有する岐阜県瑞浪市、北海道幌延町の2つの地下研究所において、ボーリング孔を利用した地下水の水圧、水質の長期モニタリングが導入されている（核燃料サイクル開発機構，2005a；太田ほか，2007）。核燃料サイクル開発機構（2005a）は、既存の地下水の水圧・水質の長期モニタリングシステムをまとめており、このうち、例えば幌延の地下研究所においてはピエゾ水頭計測方式のシステムおよび直接圧力計測方式のシステムを設置し、モニタリングを行っている。2つの地下研究所においては、その他にも、精密制御定常信号システムを利用した高分解能の探査技術、光ファイバー地中変位計の開発（日本原子力研究開発機構，2008）などの技術開発およびその適用性確認が行われている。また、日本原子力研究開発機構の東海事業所では、室内連成試験設備などを利用して人工バリアの性能確認のためのモニタリングの技術開発および適用性確認を進めている（核燃料サイクル開発機構，2005b）。さらに、国は地中無線通信による伝送技術などの開発（例えば、高村ほか，2006）とともに「技術的選択肢（技術メニュー）」の開発を進めている（竹ヶ原ほか，2004；原子力環境整備促進・資金管理センター，2009）。

我が国における技術開発は、2つの地下研究所の進展と密接に関わっている。瑞浪の地下研究所では2004年度に、幌延の地下研究所では2005年度に地上からの調査研究段階（第1段階）が終了し、現在、地下坑道を掘削しながら行う調査研究段階（第2段階）に移行している。地上からのモニタリング技術の開発・適用性確認は既に開始されているが、地下坑道を利用したモニタリング技術は室内での検討に限られている。地上からのモニタリング技術については、既に一部実用性が示されているが、計測値の乱れやメンテナンスの困難さ、長期的な耐久性など技術的な課題も残されており、第2段階以降に改良、検証されることとなる。

海外においても、ベルギーのHADES地下研究所、スウェーデンのÄspö地下研究所、スイスのWellenberg, Grimsel Test Site, Mt. Terriなどを始め、多くの地下研究所などにおいて技術開発が進められ、その適用性の確認が行われている。例えば、スペインのENRESAは、スイスのGrimsel Test Siteにおいて実施した実規模人工バリア試験（FEBEX: Full-scale Engineered Barriers Experiment）において、様々なセンサーを利用した計測を行い、2002年の一部解体までの5年以上に渡る期間で85%以上のセンサーの耐久実績を示している（ENRESA，2006）（付録F）。FEBEXは一部解体されたものの、モニタリングは継続して行われており、さらに長期のデータ取得の技術的可能性が試されているところである。また、ECは国際共同研究Modern（<http://www.modern-fp7.eu/>）を開始し、モニタリングに関する技術開発と事業への展開のためのフレームワークを提供している。

一方、SKBがLaxemar-Simpevarpで実施中のボーリング孔を利用した母岩での水圧のモニタリングでは、データのスクリーニング（様々な擾乱の除去作業）によって多くのデータが除外されている（Werner et al., 2008）。これは、初期ベースラインを把握するための作業であるが、モニタリングデータの中には説明できない変化も存在していることも示されており、必ずしも全てのデータ取得がうまくいくわけではないことを示していると言える。

今後の技術開発への要求としては、国内の地下研究所の第2段階において、第1段階に開始した地上からのモニタリング技術の改良、検証を行うとともに、地質環境・周辺環境影響の評価、掘削影響領域の力学、水理、化学的变化を把握するためのモニタリング技術実現性の提示が挙げられる。

また、人工バリアを対象としたモニタリングの更なる開発・実現性確認が必要である。さらに、将来性のあるモニタリング技術の開発・実用性確認が期待される。

原環機構自体も、実証試験を通してモニタリング技術の適用性を自ら確認していく計画である。

7. おわりに

本報告書では、放射性廃棄物の地層処分に係るモニタリングを取り巻く要件や国際的な動向を整理するとともに、事業の全期間に渡るモニタリングの役割およびモニタリングプログラム運用の基本的考え方について検討した。本報告書の主な主張は以下の通りである。

- ・ 地下調査施設の建設以降の事業による擾乱を受ける前の地質環境、周辺環境、放射線の状態推移を「初期ベースライン」と定義する。
- ・ モニタリングは、事業許可以降の安全レビューにおいて閉鎖後の長期的な安全性が担保される見通しであることを確認するために利用する最新知見のひとつである。しかし、モニタリングは、事業許可申請時の安全評価で仮定されるシナリオ自体の確からしさを直接的に確認するために行うものではない。別の指標をモニタリングすることにより、安全評価シナリオで仮定される状況に近づいていることを確認する、あるいは安全評価シナリオの基礎となっている地質環境モデルなどの妥当性を確認することが重要である。
- ・ 原環機構が行うモニタリングは、その目的に基づき、「閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング」、「放射線安全の確保に関するモニタリング」、「一般労働安全の確保に関するモニタリング」、「周辺環境の保全に関するモニタリング」に分類される。これらのモニタリングの役割は事業の段階に応じて変化する。また、これらは意思決定支援および信頼性向上・安心の提供に反映される。
- ・ 地下調査施設などの建設による地質環境への影響を把握するため、また閉鎖措置の確認の際に初期状態を参照するために、初期ベースラインを把握することが必要である（将来世代の意思決定のためのデータベース）。
- ・ モニタリングは、初期ベースラインを把握するための重要な一手段である。調査段階では、モニタリングと地質環境調査は統合的に計画・実行されることが必要である。
- ・ モニタリング項目は、法定要件などを考慮した上で、閉鎖後長期の安全確保の考え方、放射線安全の確保の考え方、一般労働安全の確保の考え方、周辺環境の保全の考え方といった基本的な戦略に基づいて導出する。
- ・ 地下調査施設の建設前から開始するモニタリング項目として、少なくとも、地下水の水圧（水位）・水質、気象に関する情報、環境放射線が挙げられる。
- ・ モニタリングプログラムの運用に当たっては、将来の要件の変化や技術の進展に対応できるよう、定期的あるいは適切な時期に見直しを行うことが重要である。また、適切な情報・品質管理、情報公開を行うことが重要である。
- ・ モニタリングの異常値の検出は、自動検出と人による検出が考えられ、そのためにあらかじめトリガーレベルを設定すること、また、技術者の育成が求められる。モニタリングで異常が検出された場合には、適切な対策を講じる（事業の一時停止、アラーム、連絡体制、初期の対策、中長期的対策）。
- ・ モニタリング技術の実用性は事前に確認しておくことが重要である。今後のモニタリング技術の開発としては、国内の地下研究所における掘削中の調査段階での更なる開発・実現性確認が要求される。

地層処分の大きな特徴は、約100年に及ぶ長期間の事業であることと、モニタリングを含む制度的管理に依存しない受動的なシステムによる安全確保の考え方である。将来の世代が行う意思決定

に柔軟性を持たせるとともにそれを支援し、処分場閉鎖によって受動的なシステムに移行する技術的根拠を蓄積することが、現世代に課せられた義務である。モニタリングは、現世代と将来の世代の架け橋として重要な役割を担うこととなる。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、スイス放射性廃棄物管理協同組合（Nagra）の Stratis Vomvoris 氏、加来謙一氏（現、原環機構）、Peter Blümling 氏、Thomas Spillmann 氏、Susanne Haag 氏、Bernd Frieg 氏、日本原子力研究開発機構の日置一雅氏、原子力環境整備促進・資金管理センターの須山泰宏氏には貴重な意見を頂いた。また、株式会社大林組の河村秀紀氏、八塩晶子氏、鵜山雅夫氏には、欧米のモニタリングに関する動向の調査に協力頂いた。ここに感謝の意を申し上げる。

参考文献

- ANDRA: Dossier 2005 Argile Tome Architecture and management of a geological repository, 2005.
- Bäckblom, G. and Almén, K.-E.: Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep repository for spent fuel, SKB Rapport R-04-13, 2004.
- Board on radioactive waste management (BRWM): One step at a time - the staged development of geologic repositories for high-level radioactive waste, The National Academies Press, Washington, D. C., 2003.
- EC: Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste, Final Report, European Commission, EUR 21025 EN, 2004.
- EKRA (Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste): Disposal Concepts for Radioactive Waste Final Report, 2000.
- ENRESA: FEBEX Full-scale Engineered Barriers Experiment Updated Final Report 1994-2004, Publ. Tec. 05-0/2006, 2006.
- IAEA: Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste, IAEA-TECDOC-1208, 2001.
- IAEA: Geological disposal of radioactive waste, safety requirements No. WS-R-4, 2006.
- IAEA: Disposal of radioactive waste, draft specific safety requirements No. SSR-5 DS 354, 2009-10-08, 2009a.
- IAEA: Geological disposal of radioactive waste, draft safety guide DS 334, 2009-09-18, 2009b.
- OECD/NEA: Progress towards geologic disposal of radioactive waste, Where do we stand? An International Assessment, OECD/NEA, Paris, 1999.
- OECD/NEA: Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste, Reflections at the International Level, OECD/NEA, Paris, 2001.
- OECD/NEA: Post-closure safety case for geological repositories, ISBN 92-64-02075-6, 2004.
- Werner, K., Öhman, J., Holgersson, B., Rönnback, K. and Marelius, F.: Meteorological, hydrological and hydrogeological monitoring data and near-surface hydrogeological properties data from Laxemar-Simpevarp, Site descriptive modeling, SDM-Site Laxemar, SKB, R-08-73, 2008.
- 岩月輝希, 天野由記, 井岡聖一郎, 三枝博光, 竹内竜史: 大規模地下施設の建設に伴う周辺地下水環境の変化, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 6(1), pp. 73-84, 2007.
- 太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗: 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044, 2007.
- 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(昭和三十二年六月十日法律第百六十六号)

最終改正：平成一九年六月一三日法律第八四号。

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3 地層処分システムの安全評価，JNC TN1400 99-23，1999.

核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊1 深地層の科学的研究—，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-014，2005a.

核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊2 工学技術の開発—，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-015，2005b.

核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則（平成二十年三月二十八日経済産業省令第二十三号）最終改正：平成二〇年三月二八日経済産業省令第二五号

環境影響評価制度総合研究会（環境省）：環境影響評価制度総合研究会報告書，2009.

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.

原子力安全委員会：放射性廃棄物処分の安全規制における共通の重要事項について 報告書，2004.

原子力安全委員会：環境放射線モニタリング指針，2008.

原子力環境整備促進・資金管理センター：平成20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—，2009.

原子力発電環境整備機構：安全確保構想 2009～安全な地層処分の実現のために～，NUMO-TR-09-05，2010.

高村尚，奥津一夫，須賀原慶久，虎田真一郎，大内仁：地下深部岩盤中における無線データ通信特性に関する検討，原子力バックエンド研究，Vol.12，No.1-2，pp.21-29，2006.

竹ヶ原竜大，虎田真一郎，朝野英一，大内仁，坪谷隆夫：地層処分にかかわるモニタリングの研究—位置付け及び技術的可能性—，原環センター技術報告書，RWMC-TRJ-04003，2004.

電気事業連合会，核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—，JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02，2005.

特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（平成十二年六月七日法律第百十七号）最終改正：平成一九年六月一三日法律第八四号。

特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律施行規則（平成十二年八月三十一日通商産業省令第百五十一号）最終改正：平成一九年一二月二五日経済産業省令第七七号。

独立行政法人原子力安全基盤機構：地層処分の立地選定段階の調査に係わるガイドラインの検討—将来の安全評価に必要な調査のあり方と調査活動に関する品質保証について—，JNES-SS-0802，2008.

日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画 平成19年度調査研究成果報告，平成20年7月，2008.

廃棄物安全小委員会：高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制制度のあり方について（平成18年9月11日），2006.

廃棄物安全小委員会：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（報告書）（平成20年1月），2008.

付録A. 埋設規則第44条の表

- 第四十四条 法第五十一条の十五の規定による記録(第一種廃棄物埋設の事業に係るものに限る。)
 は、事業所ごとに、次表の上欄に掲げる事項について、それぞれ同表中欄に掲げるところに従って記録し、それぞれ同表下欄に掲げる期間これを保存して置かなければならない。
- 2 前項に規定する記録事項について直接測定することが困難な場合においては、当該事項を間接的に推定することができる記録をもってその事項の記録に代えることができる。
 - 3 第一項の表第三号イの線量当量率、同号ハ及びニの線量当量並びに同号ホ及びヘの線量は、それぞれ経済産業大臣の定めるところにより記録するものとする。
 - 4 第一項の表第三号ホの線量を記録する場合には、放射線による被ばくのうち放射性物質によって汚染された空気を呼吸することによる被ばくに係る記録については、その被ばくの状況及び測定の方法を併せて記載しなければならない。
 - 5 第一項の表第三号ホからトまでの記録の保存期間は、その記録に係る者が放射線業務従事者でなくなった場合又はその記録を保存している期間が五年を超えた場合において第一種廃棄物埋設事業者がその記録を経済産業大臣の指定する機関に引き渡すまでの期間とする。
 - 6 第一種廃棄物埋設事業者は、第一項の表第三号ホの記録に係る放射線業務従事者に、その記録の写しをその者が当該業務を離れる時に交付しなければならない。
 - 7 第一項の表第一号、第三号ニ、リ及びヌ、第五号ロ、第六号、第七号ハ、第八号、第十一号、第十三号並びに第十四号の記録の保存期間は、法第五十一条の二十五第三項において準用する法第十二条の六第八項の確認を受けるまでの期間とする。

記録事項	記録すべき場合	保存期間
一 第一種廃棄物埋設に関する記録	確認の都度	第七項に定める期間
イ 法第五十一条の六第一項の規定による第一種廃棄物埋設に関する確認の結果	確認の都度	第七項に定める期間
ロ 法第五十一条の六第二項の規定による第一種廃棄物埋設に関する確認の結果	確認の都度	第七項に定める期間
ハ 廃棄物埋設地に埋設した放射性廃棄物の種類、数量、当該放射性廃棄物に含まれる放射性物質の数量、その埋設の日及び埋設を行った場所	埋設の都度	第七項に定める期間
二 特定廃棄物埋設施設の検査記録	検査の都度	同一事項に関する次の検査のときまでの期間
イ 法第五十一条の八第一項の規定による使用前検査の結果	検査の都度	同一事項に関する次の検査のときまでの期間
ロ 法第五十一条の十第一項の規定による施設定期検査の結果	検査の都度	施設定期自主検査終了後五年が経過するまでの期間
ハ 第五十七条の規定による施設定期自主検査の結果	検査の都度	施設定期自主検査終了後五年が経過するまでの期間
三 放射線管理記録	毎日操作中一回。ただし、法第五十一条の二十五第二項の認可を受けた場合にあつては毎週一回とする。	十年間
イ 廃棄物受入れ施設、廃棄物取扱施設等の放射線遮へい物の側壁における線量当量率	毎日	十年間
ロ 放射性廃棄物の排気口又は排気監視設備及び排水口又は排水監視設備における放射性物質の濃度	排気又は排水の都度	十年間
ハ 管理区域における外部放射線に係る一週間の線量当量、空気中の放射性物質の一週間についての平均濃度及び放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度	毎週一回	十年間
ニ 周辺監視区域における外部放射線に係る一月間(すべ	毎月一回(一週間の線量	線量当量にあつては十

	ての廃棄物埋設地を埋め戻すまでの間においては一週間)の線量当量及び地下水中の放射性物質の濃度	当量にあつては、毎週一回)	年間、地下水中の放射性物質の濃度にあつては第七項に定める期間
ホ	放射線業務従事者の四月一日を始期とする一年間の線量、女子(妊娠不能と診断された者及び妊娠の意思のない旨を第一種廃棄物埋設事業者に書面で申し出た者を除く。)の放射線業務従事者の四月一日、七月一日、十月一日及び一月一日を始期とする各三月間の線量並びに本人の申出等により第一種廃棄物埋設事業者が妊娠の事実を知ることとなった女子の放射線業務従事者にあつては出産までの間毎月一日を始期とする一月間の線量	一年間の線量にあつては毎年度一回、三月間の線量にあつては三月ごとに一回、一月間の線量にあつては一月ごとに一回	第五項に定める期間
ヘ	四月一日を始期とする一年間の線量が二十ミリシーベルトを超えた放射線業務従事者の当該一年間を含む経済産業大臣が定める五年間の線量	経済産業大臣が定める五年間において毎年度一回(上欄に掲げる当該一年間以降に限る。)	第五項に定める期間
ト	放射線業務従事者が当該業務に就く日の属する年度における当該日以前の放射線被ばくの経歴及び経済産業大臣が定める五年間における当該年度の前年度までの放射線被ばくの経歴	その者が当該業務に就く時	第五項に定める期間
チ	事業所の外において運搬した核燃料物質等の種類別の数量、その運搬に使用した容器の種類並びにその運搬の日時及び経路	運搬の都度	一年間
リ	廃棄施設に廃棄した放射性廃棄物(事業所内の廃棄物埋設地に埋設した放射性廃棄物を除く。)の種類、当該放射性廃棄物に含まれる放射性物質の数量、当該放射性廃棄物を容器に封入し、又は容器に固型化した場合には当該容器の数量及び比重並びにその廃棄の日時、場所及び方法	廃棄の都度	第七項に定める期間
ヌ	放射性廃棄物を容器に封入し、又は容器に固型化した場合には、その方法	封入又は固型化の都度	第七項に定める期間
ル	放射性物質による汚染の広がりの防止及び除去を行った場合には、その状況及び担当者の氏名	防止及び除去の都度	一年間
四	操作記録(法第五十一条の二十五第二項の認可を受けた場合を除く。)	連続して	一年間
イ	保安規定に定める保安上特に管理を必要とする設備における温度、圧力及び流量		
ロ	廃棄物埋設地の附属施設に係る設備の操作開始及び操作停止の時刻	停止の都度	一年間
ハ	保安規定に定める保安上特に管理を必要とする設備の操作責任者及び操作員の氏名並びにこれらの者の交代の時刻	操作の開始及び交代の都度	一年間
五	保守記録	巡視及び点検の都度	一年間
イ	廃棄物埋設施設の巡視及び点検の状況並びにその担当者の氏名		
ロ	廃棄物埋設施設の修理の状況及びその担当者の氏名	修理の都度	一年間(廃棄物埋設地に係る場合にあつては、第七項に定める期間)
六	廃棄物埋設施設の事故記録	その都度	第七項に定める期間
イ	事故の発生及び復旧の時		
ロ	事故の状況及び事故に際して採った処置	その都度	第七項に定める期間
ハ	事故の原因	その都度	第七項に定める期間
ニ	事故後の処置	その都度	第七項に定める期間
七	気象記録(法第五十一条の十八第二項の認可又は変更の認可を受けた保安規定に定めるところにより、記録しないこととした場合を除く。)	連続して	十年間
イ	風向及び風速		
ロ	降雨量	連続して	十年間
ハ	一月間についての積算降雨量	毎月一回	第七項に定める期間
ニ	大気温度	連続して	十年間
八	地下水の水位(法第五十一条の十八第一項の認可又は変	毎月一回	第七項に定める期間

更の認可を受けた保安規定に定めるところにより、記録しないこととした場合を除く。)		
九 保安教育の記録	策定の都度	三年間
イ 保安教育の実施計画		
ロ 保安教育の実施日時及び項目	実施の都度	三年間
ハ 保安教育を受けた者の氏名	実施の都度	三年間
十 第四十六条の品質保証計画に関する文書及び品質保証計画に従った計画、実施、評価及び改善状況の記録（他の号に掲げるものを除く。）	当該文書又は記録の作成又は変更の都度	当該文書又は記録の作成又は変更後五年が経過するまでの期間
十一 第五十八条の規定による廃棄物埋設施設の定期的な評価等の結果	評価又は措置の都度	第七項に定める期間
十二 第六十二条に規定する防護措置の記録	毎日一回	一年間
イ 見張人による巡視の状況及びその担当者の氏名		
ロ 防護区域又は周辺防護区域へ立ち入ろうとする者への証明書等の発行の状況及びその担当者の氏名	発行の都度	五年間
ハ 防護区域又は周辺防護区域の出入口における物品の持込み、持出しの点検の状況及びその担当者の氏名	点検の都度又は毎日一回	一年間
ニ 出入口及び特定核燃料物質の常時監視の状況並びにその担当者の氏名	毎日一回	一年間
ホ 特定核燃料物質並びに特定核燃料物質を取り扱う設備及び装置の点検の状況並びにその担当者の氏名	点検の都度	一年間
ヘ 防護のために必要な設備及び装置の点検並びに保守の状況並びにその担当者の氏名	点検又は保守の都度	一年間
ト 防護のために必要な教育及び訓練の実施状況	教育又は訓練の実施の都度	五年間
チ 特定核燃料物質の防護に関する秘密の範囲及び業務上知り得る者の指定の状況	指定の都度	すべての特定核燃料物質の取扱いを終了するまでの期間
リ 防護措置の評価及び改善の実施状況	評価又は改善の都度	五年間
十三 法第五十一条の二十四の二第二項の規定による閉鎖措置の確認の結果	確認の都度	第七項に定める期間
十四 廃止措置に係る工事の方法、時期及び廃止措置の対象となる廃棄物埋設地の附属施設に係る設備の名称	法第五十一条の二十五第二項の認可を受けた廃止措置計画に記載された工事の各工程の終了の都度	第七項に定める期間
十五 事業所において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度について法第六十一条の二第一項の規定に基づく確認を受けようとするもの（以下「放射能濃度確認対象物」という。）の記録	調査の都度	事業所から搬出された後十年間
イ 放射能濃度確認対象物中の放射能濃度についてあらかじめ行う調査に係る記録		
(1) 放射能濃度確認対象物の発生状況及び汚染の状況について調査を行った結果		
(2) 放射能濃度確認対象物の材質及び重量	調査の都度	事業所から搬出された後十年間
(3) 放射能濃度確認対象物について放射性物質による汚染の除去を行った場合は、その結果	その都度	事業所から搬出された後十年間
(4) 放射能濃度確認対象物中の放射性物質について計算による評価を行った場合は、その計算条件及び結果	その都度	事業所から搬出された後十年間
(5) 評価に用いる放射性物質の選択を行った結果	選択の都度	事業所から搬出された後十年間
(6) 放射能濃度の決定を行う方法について評価を行った結果	評価の都度	事業所から搬出された後十年間
ロ 放射能濃度確認対象物の測定及び評価に係る記録	測定又は評価の都度	事業所から搬出された後十年間
(1) 放射性物質の放射能濃度の測定条件		
(2) 放射能濃度の測定結果	測定又は評価の都度	事業所から搬出された後十年間
(3) 放射能濃度確認対象物中の放射能濃度の決定を行った結果	測定又は評価の都度	事業所から搬出された後十年間
(4) 測定に用いた放射線測定装置の点検・校正・保守・	その都度	事業所から搬出された

管理を行った結果		後十年間
(5) 放射能濃度確認対象物の測定及び評価に係る教育・訓練の実施日時及び項目	その都度	事業所から搬出された後十年間
ハ 放射能濃度確認対象物の管理について点検等を行った結果に係る記録	その都度	事業所から搬出された後十年間

付録B. スウェーデンにおける初期ベースラインとモニタリング

S K Bは、” Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep repository for spent fuel” (スウェーデンにおける使用済み燃料の地層処分の段階的实施におけるモニタリング) (Bäckblom and Almén, 2004) の中で、地下施設建設前の初期状態である「初期ベースライン (Primary Baseline conditions)」とモニタリングの関係およびモニタリングプログラムについて示している。初期ベースラインの構築のための地質環境調査 (site description) は、地質・地質構造、水理地質構造、地下水組成、岩盤力学物性などの主に物性値を得るための調査と、水圧や温度、変位などの状態を得るためのモニタリングによって構成されるとしている。将来において新たなベースライン状態が必要となると想定されるが、そのときには必要な時期に新たなベースラインに対する用語を定義することとしている。

S K Bのモニタリングプログラムには、目的 (rationales)、範囲 (scope)、方法の選定 (identification of methods)、システムの運用 (operation) が含まれる。

モニタリングの目的には、初期ベースラインの構築への反映だけでなく、処分サイトと人工バリア挙動の理解と実証、意思決定プロセスの支援、国内外のガイドラインや法令を遵守していることの確認、処分場建設による環境影響の把握、作業安全の確認、セーフガードの満足性の確認が含まれる。また、目的は定期的にチェック・アップデートされることとしている。

範囲とは、目的に資するためにモニタリングする項目を選定することであり、状態、プロセスおよび観測可能性について検討することとしている。本来、モニタリングすべきものは長期的な安全性であるが、それは不可能である。また、ひとつのパラメータのモニタリングで直接的に「処分場の変遷」をモニタリングすることも不可能である。したがって、処分場システムの性能の変化に対して本質的な、ひとつあるいは複数のプロセスのパラメータを、そのプロセスまたは特性の本質を捉えた「鍵指標 (key indicators)」に統合化し、鍵指標をモニタリングすることが重要としている。

方法の選定においては、装置の精度、信頼性、耐久性から検討することとしている。また、システムの設計、購入、運用、メンテナンス/交換、リサイクルを含む維持費についても考慮することとしている。

システムの運用については、モニタリングする期間、頻度について検討するほか、データ管理、分析、定期的なステークホルダーへの提供、対応を施すためのトリガーレベルとそのときの対応策について規定することとしている。

S K Bは、「ベースライン状態」と「モニタリングのためのベースライン状態」を明確に分けている。地下坑道を掘削する前に行うサイト記述は、以降の段階のベースラインとなる広範な成果を含んでおり、モニタリングのためのベースライン状態はその一部である。モニタリングデータは、材料特性の記述というよりは状態変化に関するものである。S K Bの定義からは、一回だけの観測はモニタリングプログラムからは除外される。例えば、数億年前に発生したと思われる破碎帯の幾何形状 (位置、長さ、走向・傾斜、幅) が、今後数百年の間に変化するとは考えられず、その調査は連続的に、あるいは定期的に行われたい。そのため、そのような調査とその後のアップデートはモニタリングプログラムではなく、地質環境調査プログラムに位置づけられる。

サイト記述は、1) 状態変化を追跡するためのモニタリングのためのベースライン状態、2) サイト特性調査によって得られる一般的なベースライン状態、からなる。後者のベースライン状態は状態変化の追跡に利用されるのではなく、更新されたサイト記述モデルとの違いを追跡するために

利用される。地下坑道の掘削前に構築されるベースライン状態，すなわち初期ベースラインは初期状態である。

「モニタリングのためのベースライン状態」の基本的な考え方は，リファレンスデータセットを構築することである。それにより，処分場建設により生じる変化の特定が可能となるとしている。

参考文献

Bäckblom, G. and Almén, K.-E.: Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep repository for spent fuel, SKB Rapport R-04-13, 2004.

付録C. スイスにおけるモニタリングを行う地層処分概念

スイスでは放射性廃棄物処分概念専門家グループ（EKRA）が、

- ・ 人および環境の安全
- ・ 関連する全ての世代の意思決定に対する自由と異なる社会グループ・異なる世代に対する公平性
- ・ 廃棄物発生者負担の原則
- ・ 受容性

という観点から、社会的要求を満たすための可逆性を考慮した「モニタリングを行う長期的な地層処分施設（a monitored long-term geological disposal facility）」の概念を示している（EKRA, 2000）。この概念では、試験施設、主要施設、パイロット施設を設置することとしている。試験施設の目的は選定された処分サイトの適正を評価することであり、主要施設での廃棄体の定置に先行して操業が行われる。主要施設は廃棄体を受け入れる施設である。パイロット施設では、調査段階の終了まで小さいが代表的な廃棄体構成物が定置され、最終的な埋め戻し時までモニタリング・制御されるとしている。パイロット施設の目的は、バリアシステムの挙動に関する情報を提供し、予測モデルをチェックすることである。また、処分場閉鎖に関する意思決定へのインプットを提供することになる。さらには、想定外あるいは望ましくないシステムの挙動を早期に発見することが期待されている。

これを受けてNagra（2002）は、試験施設、主要施設、パイロット施設の概略的なレイアウトを設計した。図-C.1は、廃棄体定置、埋め戻し後かつ最終的な閉鎖前のモニタリングフェーズにおける処分場の状況のイメージを示したものである。モニタリングフェーズにおいては、パイロット施設の廃棄体も埋め戻されているが、近傍の観測トンネルやモニタリング用のボーリング孔へはアクセス可能なように設計されている。

参考文献

EKRA (Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste): Disposal Concepts for Radioactive Waste Final Report, 2000.

Nagra: Project Opalinus Clay Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nagra Technical Report NTB 02-05, 2002.

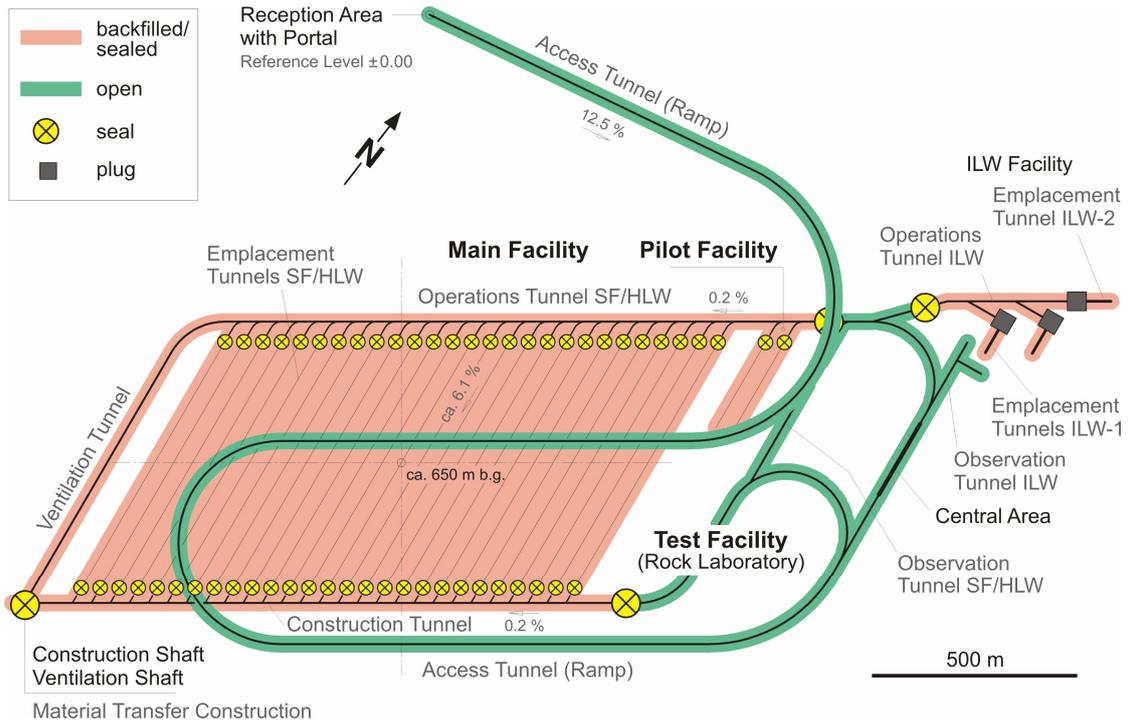


図-C.1 廃棄体定置，埋め戻し後かつ最終的な閉鎖前のモニタリングフェーズにおける状況
(N a g r a , 2002)

付録D. IAEA (TECDOC-1208) におけるモニタリング項目導出プロセス

IAEAは、技術報告書 TECDOC-1208 (IAEA, 2001) においてモニタリングに対する詳細な議論を展開している。ここでは、そのうちモニタリング項目導出のプロセスを中心に紹介する。

IAEAは、モニタリングに対して、操業安全性、環境保全などの他に、地層処分特有の目的として、以下の5つの主要な目的を示した。

- ・ 処分場の建設、操業及び閉鎖を段階的に進めるための計画管理上の決定に必要な情報を提供すること。
- ・ 処分場のセーフティケースの作成に必要なシステム挙動に関し、いくつかの視点からの理解を深め、それらの視点からの予測ができるように、さらにモデルの妥当性を検討する。
- ・ 処分場開発計画の主要段階でなされる各種の意思決定を社会全体が受け入れる際の信頼の拠り所となる情報を提供し、社会が求める期間にわたって、処分場が人間の健康や環境に好ましくない影響を与えるものではないという確信を深めること。
- ・ 将来の意思決定に参考となるような処分場サイト及びその周辺に関する環境情報データベースを構築すること。
- ・ 使用済燃料又はプルトニウムを多く含む廃棄物が処分される場合、保障措置を維持するための要件に応えること。

これらの目的に資するためのモニタリングの用途を、処分場建設に伴う擾乱およびそれ以降に生じる変化を考慮して整理している。具体的には、掘削に伴う力学的な擾乱、掘削や排水に伴う水理的・化学的擾乱、発熱廃棄体の定置に伴う熱-力学影響、処分場建設および操業に伴う地球化学的擾乱など想定される連成挙動を考慮し、それらの議論に基づいて分類した6つのカテゴリに対して、有用と想定されるモニタリング項目および方法を例示している (表-D.1)。

・ 処分場構成物の劣化

このカテゴリは、掘削、廃棄体定置、埋め戻し、シールによる母岩の反応（主に力学的および水理的）を含む。例えば、坑道周辺の岩の変形や支保（ロックボルトやコンクリートライニング）の状態のモニタリングなどが含まれる。モニタリングにより、岩盤の応力、空気、岩盤温度、亀裂の動き、支保にかかる荷重の変化を把握することができ、これらの情報はそれ以降の坑道が開いている期間において特に有益である。さらに、地下水の湧水や乾燥、岩から発生するガス（例えばラドン）の湧出量の情報が取得される。

これらのパラメータの一部は処分場の処分坑道やアクセス坑道を利用して直接計測することができる。しかし、処分場が廃棄体や人工バリアで満たされるにつれて、直接的なアクセスができなくなる。アクセスはボーリング孔の掘削により行うこととなるが、これは人工あるいは天然バリアの信頼性を低下させるため、できる限り避けるべきである。代わりに、遠隔技術（例えば亀裂進展によるアコースティックエミッションの検出など）が必要かもしれない。他の技術としては、物理探査技術や遠隔シグナル発生機器の導入などが考えられる。さらに、実際のバリアを乱さないための他のオプションとして、処分場サイトあるいは近傍の同じ母岩において、広範なデモンストレーションの実施や「パイロット」施設などの建設が挙げられる。もしこのような観測が最初の廃棄体の定置前に開始された場合、それらは事前に有益な情報をもたらすと考えられる。

- ・ 廃棄体パッケージと緩衝材の挙動

定置された杯北パッケージの挙動は、腐食や再冠水、ガス発生などの劣化現象に依存する。また、多くの中レベル放射性廃棄物処分場においては、セメントを利用した緩衝材の（空気中の二酸化炭素による）炭化の挙動が重視されている。

廃棄体パッケージの状態を知るための指標としてモニタリングできるパラメータは 3 つのカテゴリに分類できる。すなわち、直接計測（例えば、腐食速度、ひずみ、粘土緩衝材の膨潤応力）、環境の計測（例えば、温度、湿度、再冠水圧力）、水および空気の放射能である。これらの方法では全て、廃棄体パッケージに直接アクセスしなければならず、埋め戻し後は実現可能と言えない。したがって、再度遠隔シグナル発生機器や（これは避けなければならないが）人工バリアを通したケーブルが必要となる。前述のように、より現実的な解決策は、「パイロット」セクションまたは隣接したデモンストレーション施設での並行した試験の実施であろう。

- ・ ニアフィールドの化学的な相互作用

ニアフィールド（人工バリアとその近傍の岩）の特性は、熱負荷、空気との接触／換気、地下水の流入などの影響を受けて時間とともに変化する。化学的、物理的および生物学的変化はシールの有効な定置のために重要である。さらに、天然の地下水／岩システムと処分場材料の長期的な相互作用は地球化学モデルの試験において有効である。

興味深いパラメータは、空気との接触、地下水の流入によって生じる物理的、化学的、生物学的な特性の変化に関するものである（例えば、破碎、鉱物変化、バイオフィルム）。これらのパラメータは一般的に直接アクセスして取得が可能である。

モデルに関するものとしては、処分場の地下水による再冠水（すなわち、埋め戻し材、シールの設置後）の際に生じる地球化学反応である。特に興味深いものは、地下水と緩衝材の反応である。一般に、これらの変化のモニタリングは埋め戻し材やシールへの侵入なくして可能ではない。これは避けるべきであることから、より高度に設定されたパイロット施設（前述）が有効であろう。

計測技術は表-D.1 に示すように広く存在している。

- ・ 地圏の変化

処分場周辺の地圏は、力学的、水理的、化学的に処分場建設の影響を受ける。関連する計測可能なパラメータは、温度、応力、地下水の水質、地下水の圧力、溶質の化学特性、鉱物である。これらのパラメータは、たいていサイト調査あるいは地下での調査の段階で掘削されたボーリング孔を利用して計測可能である。また、広範な技術が存在する（表-D.1）。換気による多くの鉱物学的変化は、処分場の直近に限られると考えられる。

特に興味深いものは、隔離システムの長期的な性能に直接的に関係する岩盤の水理的、力学的な挙動である。例えば、主要な水みち亀裂の連結などである。これらの特性の調査は、サイト調査あるいは地下での調査の段階で掘削されたボーリング孔を利用して行われると考えられる。

飽和状態の処分場においては、処分場が開いている限り地下水の流れは処分場に向かう

方向となる。しかし、処分場の再冠水後は、地下水は処分場から地圏へ逆に流出する。これは地球化学特性の変化をもたらすと考えられる。広範囲にセメントを利用するような処分場概念の場合、この変化は重大であろう。影響を受けた岩盤へのアクセスの問題、および影響の生じる時間スケールが閉鎖後まで含むという問題は、これらの影響のモニタリングを困難とさせるであろう。この課題は、モデルおよび社会的な閉鎖の意思決定に関係するものである。

同じ処分サイトにおいて地震動のモニタリングはモデルにおいて重要な役割を果たす。

- ・ 環境データベースの蓄積

数十年間の環境データの蓄積は、処分場の上の土地に対する、他の用途としての適正の評価において重要な支援となる。関係するであろうパラメータは、

- 気象
- 水文、排水、水利用、水質
- 生物相、堆積物、水など様々な環境構成物における放射性核種の濃度と他の汚染物質
- 局地的な生態
- 削剥、侵食、斜面変化など地盤形態プロセス
- 鉛直あるいは水平のプレート移動速度、地震活動などの地殻変動
- 地殻の熱流量
- 周辺地域の土地利用

これらのパラメータは全て地上で計測される。データは連続的に長期間取得される必要がある。

- ・ 保障措置

保障措置（処分に関しては分裂性材料の量を含む）の適用は、分裂性材料の認可されていない移動を早期に検出するために十分であるよう、サーベイランスのレベルを要求する。有望な指標は人工バリアあるいは天然バリアの期待されない破壊であろう。そのような破壊は以下によって検出できる。

- サイトの視察
- 航空写真
- 人工衛星のイメージング
- 微小地震の調査

参考文献

I A E A : Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste, IAEA-TECDOC-1208, 2001.

表-D.1 モニタリングパラメータと方法の例（I A E A, 2001 を和訳）

カテゴリ／モニタリングの目的	典型的なパラメータ	評価手法	典型的な計測方法
処分場の構成物の劣化 処分場の構成物／隙間の安定性のモニタリング	岩盤の温度	処分場におけるモニタリング（処分場から掘削したボーリング孔を利用したモニタリングを含む）。無線や地電流を使った原位置に設置された機器の利用を含む。	熱電対など
	隙間の変形（方向，開口幅，伝播速度）		変位計
	処分場近傍の岩盤応力の変化		ひずみ／荷重センサー
	湧水量		体積の計測
	支保の状態		ひずみ／荷重の計測
	処分場の温度，湿度		様々な技術
	埋め戻し材の再冠水		埋め戻された隙間の原位置／遠隔操作モニタリング
廃棄体パッケージと緩衝材の挙動 定置された廃棄体パッケージの状態／緩衝材の状態のモニタリング	ひずみ，腐食速度	廃棄体パッケージの原位置／遠隔操作モニタリング	ひずみゲージ，速度メータ
	パッケージ温度，パッケージ近傍の湿度	パッケージ近傍の環境の原位置／遠隔操作モニタリング	多くの技術が存在
	排水の放射能	処分場からの流出水の放射線モニタリング	ガンマ検出など様々な技術
	廃棄体から発生するガス	放射性・非放射性ガスのモニタリング	ガス分析器
	緩衝材の再冠水／膨潤圧	パッケージ金部の環境の原位置／遠隔操作モニタリング	圧力計，水分計
ニアフィールドの化学的な相互作用 埋め戻し材の化学的な状態／人工バリアの挙動／コンクリート構造物の状態／ニアフィールド環境の変化／行動壁面のプロパティ／処分場の再冠水挙動	処分場の温度，湿度	処分場におけるモニタリング	温度，水分，圧力
	坑道壁面の鉱物，化学，生物学的変化	定期的なサンプリング	様々な分析技術が存在
	湧水が終了した時点のニアフィールドの含水比，圧力，化学特性の変化	定期的なサンプリングまたは連続的な観測	様々な技術が存在
地圏の変化 周辺の地圏における変化／人工バリアと岩盤，地下水の相互作用／アルカリブルームの影響	地下水の水圧と経路の変化	新規または既存のボーリング孔を利用	ピエゾメータなど飽和領域に対する圧力モニタリング機器，テンシオメータなど不飽和領域に対する機器
	地下水の化学特性の変化（例えば，pH，Eh，溶質，放射能，微生物活動）	同上	サンプリングやガンマ線検出など様々な技術が存在
	重要構造物の力学的変化	同上	電気-力学ゲージ，AE モニタ
	鉱物の変化	同上	サンプリング
	温度場	同上	ボーリング検層
	応力場	同上および遠隔操作（微小地震）	ひずみ／荷重センサーおよび微小地震観測技術
	地震とその応答	処分場内，地表，ボーリング孔	地震波検出
環境データベースの蓄積	気象，水文など		様々な技術が存在
保障措置	人工バリアの擾乱		サイト調査 航空写真 衛星サーベイランス

付録E. 概要調査の段階から開始するモニタリング項目の例

本文中において、初期ベースライン把握のためのモニタリング項目として、少なくとも地下水の水圧（水位）、気象に関する情報、環境放射線を挙げた。表-E.1 に、概要調査の段階から開始するモニタリング項目の例を示す。

表-E.1 概要調査の段階から開始するモニタリング項目の例

	モニタリング項目の例
閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> ・気象（降水量，気圧，気温，湿度，風速，日照時間，日射量など） ・降水の水質 ・河川流量 ・河川水の水質 ・海水位，湖沼水位 ・海水，湖沼水の水質 ・地下水の圧力（水位） ・地下水の水質 ・地下水の温度
放射線安全の確保に関するモニタリング	本文中表-2 参照
一般労働安全の確保に関するモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> ・関連する法令（労働安全衛生法および関連規則など）などに準拠 ・メタン，硫化水素，一酸化炭素，酸素など ・騒音 ・気温，湿度
周辺環境の保全に関するモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> ・関連する法令（水質汚濁防止法など）などに準拠 ・排水水の汚染状態 ・BOD，COD ほか河川水，海水，湖沼水の水質 ・騒音・振動 ・希少動植物

付録F. FEBEX

FEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment) (ENRESA, 2000, 2006) は、スペインのENRESAによってスイスのGrimsel Test Siteにおいて行われた実規模人工バリア試験であり、当初1994年から2003年の計画で行われた。

FEBEXではベントナイトブロック横置き方式が採用されており、廃棄体を模擬したヒーターが2つ設置されている。人工バリアおよび周辺の岩盤内に合計632に及ぶセンサーが設置され、1997年2月から熱負荷試験が開始されている。2年間（報告書で対象とされた時点まで）の計測において、ロスはずかに10.4%、特に温度センサー（熱電対）は189個のうちわずかに3個のみ欠損という結果が得られている。一方、湿度センサーでは59のうち17と約3割が欠損したとしている（ENRESA, 2000）。その後、2002年の一部解体までの5年以上に渡る期間においても、85%以上のセンサーの耐久実績が示されている（ENRESA, 2006）。

参考文献

ENRESA: FEBEX project, Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high level radioactive waste in crystalline host rock, Final Report, Publ. Tec. 01/2000, 2000.

ENRESA: FEBEX Full-scale Engineered Barriers Experiment Updated Final Report 1994-2004, Publ. Tec. 05-0/2006, 2006.

原子力発電環境整備機構

(略称:原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)