

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 -

竹ヶ原 竜大、虎田 真一郎、朝野 英一、大内 仁、坪谷 隆夫

平成 16 年 9 月

本報告書は、経済産業省からの委託で（財）原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した「モニタリング機器技術高度化調査」のうち、モニタリングに関わる研究成果の一部をまとめたものである。

目 次

はじめに	1
第1章 研究の目的と背景	3
1.1 目的	3
1.2 背景	3
第2章 地層処分モニタリングの考え方	6
2.1 地層処分モニタリングの「定義」についての検討	7
2.1.1 スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB)	7
2.1.2 ドイツ廃棄物処分施設建設運営会社(DBE)	7
2.1.3 国際原子力機関 (IAEA-TECDOC-1208)	8
2.2 地層処分モニタリングの「目的」に関する検討	8
2.2.1 国際原子力機関 (IAEA-TECDOC-1208) での目的の整理	9
2.2.2 地層処分モニタリングの目的の整理	9
2.3 地層処分モニタリングと地層処分の品質管理	17
2.4 ステークホルダーとの関連	18
2.4.1 処分事業実施者	19
2.4.2 安全規制機関	19
2.4.3 社会 (一般公衆及び技術者)	19
2.5 事業段階との関係	20
2.5.1 処分地選定段階	20
2.5.2 建設・操業および閉鎖段階	21
2.5.3 閉鎖後段階	21
2.6 モニタリングを行う対象との関係	21
2.7 パイロット施設との関係	22
2.8 計測と評価システムとの関係 (モニタリング結果の利用)	23
第3章 モニタリング技術の検討	25
3.1 地層処分モニタリング技術に関する情報の整理	27
3.1.1 モニタリングの技術検討にあたって	27
3.1.2 事例検討の進め方と今までの検討例 (水理および地下水化学特性)	28

3.1.3 技術調査の進め方と今までの検討状況.....	31
あとがき	35
参考文献	37

(添付資料)

添付資料 - A 制度的管理に関する国際的な議論の状況.....	A - 1
添付資料 - B 国内外のモニタリング検討状況の調査と分析	B - 1
添付資料 - C モニタリングに関するワークショップの記録	C - 1
添付資料 - D セーフティー・ケースとそれにおけるモニタリングの位置付け.....	D - 1
添付資料 - E 国際機関におけるセーフティー・ケース.....	E - 1
添付資料 - F 国内外の地下研究施設(URL)に関する調査と分析	F - 1
添付資料 - G 地層処分モニタリングシステム検討委員会 委員名一覧	G - 1

図目次

図 2-1	地層処分の性能評価のレファレンスケース	22
図 3-1	モニタリング技術メニューの整備に関する検討フロー	26
図 3-2	地中無線通信機（プロトタイプ機）	34
図 3-3	地中無線通信結果と媒体の導電率	34

表目次

表 2-1	地層処分モニタリングの目的とその分類	16
表 2-2	モニタリングの目的と利害関係者の関与	20
表 2-3	事業の各段階におけるモニタリングの役割	21
表 3-1	地層処分モニタリングにおいて考慮すべき計測環境条件	26
表 3-2	計測対象とセンサ技術動向調査のまとめ	31

はじめに

高レベル放射性廃棄物は、廃棄物に含有される放射性物質が十分に安全なレベルにまで低減するまでの間、人間とその生活環境の安全を確保できる方策で隔離をすることが求められる。その期間は数千年以上におよぶと考えられるため、人による監視など制度に依存して隔離をしようとすることは将来世代に過度な負担を迫らせる方策であるとされている。長期間にわたって安定な地質環境を有する深い地層中に、地下水対策を念頭に置いた人工的な構築物を施して高レベル放射性廃棄物を埋設する、いわゆる「多重バリアシステム」概念に基づく地層処分技術は、制度に依存して安全を確保することをもとめない極めて現実的な隔離方策であるとしてその実現に向けた準備が進められている。

地層処分の長期安全性は、多重バリアシステムに関わるシナリオを設定し、そのシナリオに関わる多くのモデルおよびパラメータをもちいた数値解析に基づく安全評価によって説明されるが、解析結果には、シナリオ、モデル、およびパラメータに起因する不確実性が伴うことが指摘されている。

また、廃棄物を収容する深部地質環境場についても地質環境の空間的不均質性や地質環境の将来に向けた時間的变化などが関わり、その知識の信頼性に限界がある。

地層処分技術は、安全評価の不確実性や深部地質環境場に対する知識の信頼性の限界を考慮して十分に裕度をもたせたシステムによって長期安全性を確保している。また、その一方で、計画段階から最終処分の実施・処分場の閉鎖などに要する期間が百年オーダの長い時間を要することを利用して、地層処分技術の信頼性は「段階的処分場開発」、即ち、地質環境に対する知見をたゆみなく蓄積するとともに最新の地層処分技術を整備し処分場開発に反映すること、および処分地選定および地層処分の実施を段階的に進めていく中でその向上を図ることが重要である。

地層処分では、このような技術的信頼性を考慮した上で、処分地選定の段階から地層処分場を閉鎖した後一定の期間にわたって、実際の処分場に関する所期の安全性能やその状況について確認する観点から、モニタリングの実施が考えられている。

「モニタリング」は、一般には「監視」と和訳される。地層処分は制度に依存すること

なく高レベル放射性廃棄物を隔離する方策であるとしても、予期通り安全性が確保されていることを実際に地層処分場を監視して確認することが望ましいとする、一層の安心を希求する社会の要請に応える方策のひとつとして、地層処分におけるモニタリング技術が期待されている。

地層処分におけるモニタリングは、その方策が確実に実施されるために制度的な裏付けを必要とするため「制度的管理技術」の一つと位置づけられる。現在、国際的に検討されている制度的管理技術としては、このほかに「地層処分に関わる記録の保存技術」が知られている。

我が国は、地層処分の実施に向けた社会的な意思決定段階にあるといえる。このような、社会的な意思決定に役立てるために、制度的管理技術についても考え方や技術基盤などの整備が重要である。

原環センターは、経済産業省からの受託に基づき地層処分におけるモニタリングについて、海外における検討状況の調査、国際ワークショップの開催、地層処分専門家等で構成した「地層処分モニタリングシステム調査検討委員会」における継続的審議などを通じて調査研究を実施してきた。

この報告は、地層処分の特徴を踏まえたモニタリングを特に「地層処分モニタリング」と呼んで、今までに優先的に取り組んできた、その考え方の整理、技術的可能性などの検討状況を取りまとめたものである。

まず、地層処分モニタリングの定義および目的について整理し、ついで、地層処分に関わる多様な事項とモニタリングの関わりを検討し論点を整理し、それをふまえた我が国における地層処分モニタリングの考え方を整理するとともに若干の考察を試みた。

モニタリング技術に関する検討では、現状の技術調査、計測技術の可能性、地下深部から地上への計測情報の伝達技術などの検討を実施し、地層処分モニタリングの技術的可能性を論ずるとともに課題を整理した。

第1章 研究の目的と背景

1.1 目的

地層処分モニタリングの実の方策や計画等が、今後、国及び関係機関等、いわゆるステークホルダー（利害関係者）によって検討されるものと考えられる。そのため、今までに行われてきた国内外の関連した議論およびモニタリング技術について調査・整理を行い、それらに基づいて地層処分モニタリングについての考え方を整理するとともにモニタリングの技術的可能性を検討し、併せて今後の課題を整理することを目的とした。

1.2 背景

原子力発電環境整備機構（原環機構）は2002年12月に高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する概要調査地区選定に関する公募を開始し、我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分は、その実施に向けた本格的な実施準備段階に入ったといえる（原環機構，2002）。

それに先立ち2000年に、原子力安全委員会は、地層処分の安全確保に必要な指針の策定に向けた国による安全規制の骨格となる基本的な考え方をとりまとめた（原子力安全委員会，2000）。同報告書において、地層処分の安全性は、長期安全確保対策（サイト選定、工学的対策）及び安全評価等による安全確認によって確保されることが「安全確保原則」として示された。また、処分事業においては立地段階（概要調査地区の選定、精密調査地区の選定、最終処分施設建設地の選定）、事業許可申請、建設段階、操業段階、閉鎖段階、管理段階～事業廃止の各段階で安全確認を行うことが示されている。さらに、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とされている。

地層処分モニタリングは、従来から処分場閉鎖後の制度的管理のテーマとして議論されてきた（添付資料 - A）。高レベル放射性廃棄物の最終処分方策として地層処分が実施される場合には、「はじめに」に述べたように、制度に依存して安全性を確保する仕組みを求めない受動的なシステムでなければならず、その長期安全性を確保することを目的とする処分場閉鎖後の管理（モニタリング等）を前提としてはならないことが原則とされてい

る（OECD/NEA, 1982; IAEA, 1995 等）。しかしながら、この原則に加えて、例え、受動的な安全の仕組みが確保されているとはいえ、それを確認する仕組みとして様々な制度的な手段が用意されることが望ましいと考えられるようになってきている。このような制度的な手段の一つとして、最終処分地選定の初期の段階から処分場閉鎖後の一定期間までモニタリングを実施することが、地層処分に社会的な信頼を与えていく上で重要であるとの考え方が国際的な検討で支配的になりつつある（IAEA, 2001）。

このような背景を念頭に置くと、目的で述べたように、地層処分に関わるモニタリングは、実施主体、安全規制当局、地方自治体などがそれぞれの目的で計画を策定することが考えられる。

地層処分の安全評価によれば、地層処分施設は、放射能や環境関連物質が一定の濃度で環境に放出される他の原子力施設や環境関連施設とは異なり、正常に廃棄体が製造され人工バリアが施された埋設が行われているかぎり、埋設後長い期間にわたり埋設に由来する放射性物質は人工バリアの近傍はもとより周辺の地質環境において有意に検出されることはないものと考えられる。さらに、地層処分は、処分地選定調査、廃棄体の埋設、処分場の閉鎖など人為的な行為で擾乱を受けた地質環境が、処分場の閉鎖ののち一定期間を経て原状に戻ることが安全評価で示される。

したがって、地層処分モニタリングの対象となるパラメータとしては、最終処分地選定の初期段階から処分場の閉鎖後における、地質環境の擾乱や原状に戻る変化の状況を確認していくことを念頭に置いた、「地質環境特性の計測」について考慮する必要があると考えられる。

一方で、地層処分モニタリングは、処分施設の長期安全性を損なわないような手段で、世代を越えた長い期間を、信頼性の高い技術で、継続的に実施することも考慮していかなければならない。

このように、地層処分モニタリングは、どのようなパラメータを計測し、どのような期間にわたって、どのような技術を用いて、など十分な検討が必要である。したがって、地層処分モニタリングに関わる調査研究は、他の多くの地層処分に関わる技術課題と異なり、まず、「なぜ（目的）、誰が、何時（いつから、どの期間）、何処で、何を、どのように

（手法）」、いわゆる5W1Hの視点で「地層処分モニタリングの考え方」を整理することが重要であると考えた。とりわけ、5W1Hの中で「どのように」という命題に関しては、世代を超えた長期にわたる継続性を念頭に高い信頼性を維持できる技術を整備する必要があると考えられる。

地層処分モニタリング技術開発は、ここで述べたように地層処分モニタリングの考え方を整理するとともにそれに適用できるモニタリング技術を開発することを目的とすることとした。また、「誰が」に関して、地層処分モニタリングは、安全規制機関、実施主体、地方自治体等が実施することも視野にいれる必要がある。したがって、地層処分モニタリング技術開発の中期的な目的は、各機関の計画するモニタリング計画に資する「技術的選択肢（技術メニュー）」の整備を念頭に置くことが重要であると考えた。

第2章 地層処分モニタリングの考え方

モニタリングは、「はじめに」で述べたように「監視」と和訳されるが、具体的には連続的あるいは間隙をあけて対象とするシステムの状態を計測又は観測するための手法と解釈できる。

本章においては、地層処分モニタリングについて、今までに国際機関などにおいて検討されてきたその考え方を調査し、分かりやすく整理することを試みた。実施に当たっては、地層処分モニタリングシステム検討委員会における議論、国内外の情報調査（添付資料 - B）、ワークショップの結果（添付資料 - C）、関係する学識経験者へのヒアリング結果等を踏まえ幅広い視点から整理を行った。

2.1 地層処分モニタリングの「定義」についての検討

地層処分モニタリングについて、まず、その定義について検討を行った。

ここでは、海外の地層処分実施主体に対する調査の結果及び IAEA-TECDOC-1208 (IAEA, 2001) におけるモニタリングの定義の概略を紹介する。

2.1.1 スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(SKB)

SKB は、「一般にモニタリングは、処分場開発を段階的に進めるための基礎を提供するとされることから、処分場開発の全期間を通じて重要であると考えられる」(*monitoring is generally considered important during repository development as it is expected to provide a basis for proceeding with stepwise development*) とし、処分場で行われるその他の計測や観測と区別するため、以下のように地層処分モニタリングを定義している。

- ・ 概して、処分場開発のいくつかの段階をまたがってより長期にわたり繰り返し行われる計測または観測 (*repeated measurements or observations during a longer period of time, generally expanding over several stages of repository development*)

この定義に従い、SKB はモニタリング項目として処分場システムの構成要素の挙動、もしくは処分場の操業による環境への影響を評価するのに有用な計測を考えている。たとえば、後述するベースラインの把握について、処分地選定調査の段階から、動水勾配、地下水化学特性、岩盤変位 (GPS の活用) などの項目を中心に実施するとしている。

2.1.2 ドイツ廃棄物処分施設建設運営会社(DBE)

DBE は、地層処分のモニタリングについて次のように定義をしている。

- ・ モニタリングは安全にとって重要であると思われるすべての性質について、計測した値を集めること (*In general monitoring can be defined as collecting measured values of all properties considered important to safety*)

DBE では、「モニタリングは、事象を記録することおよび記録結果を評価基準

(assessment standards)と比較することから構成される。記録は、主に様々な計測およびグラフ上の検討によって実施される。評価基準は、限界値、あるいは運転条件として規定され、もしくは代表的なモデル計算から導かれる。モニタリング行為の目的は、評価基準の遵守である。その目的は、安全解析と密接な関係があり、また、最終処分場の立地条件に大きく依存する」 (*Monitoring consists, on one hand, of the recording of states of affairs and, on the other hand of the comparison of the recorded results with assessment standards. The recording is carried out mainly by different types of measurement and graphical surveys. The assessment standards are defined as limits or operational conditions, or derived from representative model calculations. The objective of monitoring procedures is the compliance with the assessment standards. They are closely connected to the safety analysis and are as such largely depend on the final repository situation.*) としている。

2.1.3 国際原子力機関 (IAEA-TECDOC-1208)

IAEA は、地層処分モニタリングについてとりまとめた技術報告書において、地層処分モニタリングを次のように定義している。

- ・ 処分システムの構成要素の挙動または処分場とその操業が環境に及ぼす影響を評価する上で役立つような工学、環境または放射線に関するパラメータの継続的または定期的観測および計測 (*For the purpose of the present publication the following definition of monitoring has been employed: continuous or periodic observations and measurements of engineering, environmental or radiological parameters, to help evaluate the behaviour of components of the repository system, or the impacts of the repository and its operation on the environment*)

2.2 地層処分モニタリングの「目的」に関する検討

次に、地層処分モニタリングの目的について、整理を行った。

ここでは、まず、IAEA における検討状況を示し、次いで国内外の高レベル放射性廃棄物地層処分に関わる機関等に対して実施した調査の結果を受け、なるべく広範囲に地層処分モニタリングの目的を列挙した。その結果、地層処分モニタリングには多岐にわたる目

的（ニーズ）が存在することが明らかになったので、さらにこれらの調査をもとにモニタリングの目的を目的別に分類して整理することを試みた。

2.2.1 国際原子力機関（IAEA-TECDOC-1208）での目的の整理

処分場の建設、操業、および閉鎖に係る段階的計画において管理上の決定に必要な情報提供

(to provide information for making management decisions in a stepwise programme of repository construction, operation and closure.)

処分場のセーフティー・ケース（添付資料 - D,E）の開発への寄与

(to strengthen understanding of some aspects of system behaviour used in developing the safety case for the repository and to allow further testing of models predicting those aspects.)

処分場の開発計画を、社会全体が受け入れる際の拠り所となる情報提供

(to provide information to give society at large the confidence to take decisions on the major stages of the repository development programme and to strengthen confidence, for as long as society requires, that the repository is having no undesirable impacts on human health and the environment.)

将来の意思決定者に有用となりうる処分場サイト及びその周辺に関する環境データベースの蓄積

(to accumulate an environmental database on the repository site and its surroundings that may be of use to future decision makers.)

処分場に使用済燃料またはプルトニウムを多く含む廃棄体が収容される場合、原子力保障措置を維持するための要件

(to address the requirement to maintain nuclear safeguards, should the repository contain fissile material such as spent fuel or plutonium-rich waste)

2.2.2 地層処分モニタリングの目的の整理

IAEA において検討された地層処分モニタリングの目的に加え、国内外の地層処分に関わる機関等に対する聞き取り調査（添付資料 - B）をもとに地層処分モニタリングの目的

について一層の整理を試みた。調査で把握されたモニタリングの目的（ニーズ）は多岐にわたることが明らかになったが、大別して次の目的に分類できると考えられる。

- 目的 1 処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認
- 目的 2 法令要件に対する適合性の確認
- 目的 3 政策および事業実施上の意思決定に資する情報提供
- 目的 4 概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握
- 目的 5 社会的な意思決定に向けた情報提供

目的 1 処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認

技術的な観点からモニタリングは、安全評価結果を導き出す条件となる処分システムの実環境が、事前の解析等で予想された状態に近く、それに応じた処分システムの工学的対策が適切であることを示す根拠となる。安全評価に基づいて説明される性能を確認する手段としては、地質環境場および人工バリアの状況を監視することが考えられる。具体的には、廃棄体が埋設される地下施設周辺の水理や地下水化学特性、廃棄体周辺の熱、水理、応力、地下水化学特性などが挙げられる。

これらの状態変化をモニタリングする期間は、先に述べた不確実性などの観点から検討する必要があるが、例えば、地下施設の閉鎖後、数十年から百年オーダと見積もられる地下施設の再冠水が進んでいく期間であるとした場合でも、将来の安全性を理解する上で貴重な情報を提供するものと考えられる。また、このような閉鎖後の地下水位の状況は、処分場建設等の擾乱を受ける前の地下水位を含む環境データ（ベースライン）などを把握し比較できるようにしておくことが不可欠であると考えられる。

処分システム構成要素の機能の確認

処分システムの構成要素であるオーバーパック、緩衝材、岩盤などが所期の性能を発揮しているかどうかの確認を行う。室内試験により求められた人工バリア等の物性値が、実際の施工環境でも同様で、それらの物性値を用いて解析的に推定されている応力緩衝機能、温度上昇など物理特性や腐食や水質に関連する化学特性など、主要な評価パラメータの予測が妥当であったかどうかの確認を行う。

設計・施工上の設定値の確認

空洞の設計の際には、岩盤物性や地圧等は一定、または、あるばらつきがあるといった仮定がされているが、実際の岩盤は不均一性を有し、空間的な変動が大きい場合もある。また、処分場の湧水量や地温勾配、地下水涵養量なども調査の結果を受け設計に際して仮定されるものである。このように保守的に設定した設計値の裕度がどれくらいあるかを示すことは、地層処分システムの信頼性を示す上で重要であり、実際の処分場開発の段階においてこれらの設計・施工上の仮定を検証確認する。

安全評価モデルの検証

地下水シナリオに基づく処分システム安全評価においてモデル化される、岩盤の亀裂ネットワークモデルやクリープモデル、あるいはモデルのパラメータである酸化還元電位や pH など、モデルの構成や物理的・化学的諸量が妥当に設定されているか検証を行う。あるいは安全評価モデルの境界条件である広域の動水勾配分布や掘削影響領域の特性などもこれに含まれる。

処分場の操業・施工に係る改善や補修の判断

掘削工法や排水・換気方式の選択など工学的方策の改善、地震発生時や事故発生時の安全維持対策の検討にフィードバックするためのデータ取得を行う。また、支保、オーバーパック、緩衝材など、何らかの要因により品質の劣化が認められた場合は、これらを補修することが考えられる。補修を行うか否かの判断には、カナダにおいて考えられているように、より詳細な調査を行うかどうかの基準値であるアクションレベルや許容値、即時に補修が必要な限界値などのレベルの設定が重要である (Simmons et al, 1994)。

目的 2 法令要件に対する適合性の確認

多くの国の地層処分プロジェクトにおいて、地表からのサイト調査に始まり、処分施設の閉鎖までの複数の段階に分けて段階を追った処分場開発手法が採用されている。これらの各段階から次の段階への移行に際しては、安全規制機関による安全確認や認可が行われる可能性がある。認可申請する処分事業実施者は、告示や技術基準等の形で示されたこれら確認や認可の判断基準に照らし、モニタリングの情報を考慮して申請書を作成及び改訂することになると考えられる。

また、目的 1 において述べた「処分場の安全評価と工学的対策の妥当性確認」に資する多くのモニタリング情報や品質管理記録のうち、重要な情報やそれらの基準値が規制側の要件として法令等に反映されることも考えられる。

処分場の建設、操業に際しては、原子力施設に準じて作業員や周辺住民の安全確認の視点で放射線などの測定、観測のモニタリングとともに、環境や水質など一般的な安全監視と規制基準への適合性が求められると考えられ、これらの目的に沿ったモニタリングの実施が必要である。

処分場閉鎖後の法令要件

我が国の地層処分に関するモニタリングに対する安全規制上の要件整備は、今後の課題である。米国の環境保護庁（EPA）は、40 CFR Part 191(EPA, 1993) で一般的な放射性防護基準を規定した。さらに、40 CFR Part 194(EPA, 1996)で「40 CFR Part 191 適合のための WIPP サイトにおける具体的要件」を規定し、その中で、長期モニタリングに関する保証要件について言及している。DOE は、40 CFR Part 194(EPA, 1996)に基づき WIPP での閉鎖前、閉鎖後のモニタリング・パラメータを選定している。これらのパラメータは、FEP やシナリオに基づく感度解析の結果、重要なパラメータとして抽出されたものであり、COmpliance Monitoring Parameters (COMP) と呼ばれている。このように、地層処分に特有な処分場閉鎖後の安全規制の一環としてモニタリングの役割があるものと考えられる。

建設・操業時法令要件（作業員及び周辺住民に対する安全）

事業実施、特に施設の建設・操業に際しては、技術的な信頼性を担保するモニタリングに加えて、建設時及び操業時の作業員及び周辺住民の安全の視点で、線量などのモニタリングが安全規制機関から求められている。以下にこれらの分類を示す。

- ・ 通常の原子力施設等と同様に、法的な規制要求に従い、処分場の操業時における作業員や公衆への放射線影響を監視するため
- ・ 掘削あるいは建設作業による水源への水の供給や水質変化など、環境に関する法的な規制要求に従い、処分場の操業時における周辺環境への非放射線影響を監視するため
- ・ トンネル工事によるダスト、ガスあるいは騒音など、地下施設における一般の非原子力産業の場合の安全要件への適合性の確認のため

環境影響に関わる法令要件

安全規制機関からの要件として、環境影響評価のためのモニタリングが要求されている例が多く、これらは既存の大規模事業での適用と考え方が共通している。本目的に係るモニタリングは、地層処分における地質環境特性のベースライン把握を目的としたモニタリング項目と重複する項目が多いものと思われる。

目的3 政策および事業実施上の意思決定に資する情報提供

目的1に示す技術的な視点や目的2に示す法例要件の視点とは別に、事業実施者が、処分事業実施の各段階において、事業推進や計画修正のために利用することが考えられる。具体的には、安全性を説明する資料の改訂や、設計変更のための基礎データとしてモニタリング・データや評価結果を利用することが考えられる。

地質環境情報の有する不確実性に対処するために通常のトンネル工事などでは、工事を進めつつ得られる実際の地質環境情報に基づいて設計施工方法の変更を柔軟に実施（いわゆる reversibility や design as you go）することが知られている。長期安全性に関わる地層処分計画においても、建設・操業前に処分場建設や廃棄体の埋設に必要な全ての設計条件を特定することは合理的でなく、設計上のパラメータに基づいて建設・操業計画が進められるものと考えられる。モニタリングで設計上の仮定と異なる原位置データが得られた場合には、そのデータに対応して設計施工方法の柔軟な変更を実施することが可能である。

意思決定に向けた情報提供

近年、我が国および欧米諸国において、極めて長期間におよぶ事業であるとの観点のみならず、処分事業に関する社会的な信頼感の向上を目的の一つとして地層処分の計画や実施に柔軟性(reversibility)を持たせて段階的に進めるとする方策が採用されつつある。計画の初期段階においては、最終処分施設建設地の段階的な選定、設計変更などがそれに当たる。計画が進んだ段階においては、処分場の建設、操業及び閉鎖という段階がそれに当たる。IAEAが定義したセーフティー・ケース(添付資料-D, E)には、処分場開発の各段階における未解決な課題が存在することを認め、それらの課題は、後続する段階において解決していく方策を含めて意思決定を実施することとしている。各段階における意思決定、例えば建設から操業段階へ移行するかどうか、数十年におよぶ廃棄体の埋設をどのような段階に分けて実施するのか、後述する埋設廃

棄体の取り出し、操業終了後に処分坑道やアクセス坑道の閉鎖段階に移行するかどうかの意思決定のために、地層処分モニタリングは、処分事業実施者の意思決定上に重要な役割を期待される。また、SKB は、本格的な埋設に先立って先行的な埋設を考えているが、先行処分から本処分への移行の意思決定に向けてのためのモニタリングが実施される可能性がある（添付資料 - B）。

埋設廃棄体の回収可能性への対処

定置した廃棄体を取り出すことを念頭に置いた、いわゆる回収可能性（retrievability）は、柔軟性を持たせた地層処分の実施方策において、幅広い視点から検討を要する重要な課題であると考えられる（OECD/NEA, 2001）。

諸外国において、定置された廃棄体が回収可能であることを国の要求または実施主体の方針として定めている国としてアメリカやフランスがあげられる（アメリカ；EPA, 1993、フランス；ANDRA, 1991）。フランスでは岩盤のクリープによる廃棄体の拘束の度合いや廃棄体の腐食環境等を積極的にモニタリングすることにより回収可能性を担保することになっており、回収可能性と地層処分モニタリングに密接な関係が見られる。

目的 4 概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握

ベースラインとは、処分地選定の際に実施される地表面からのボーリング調査や処分施設建設による地質環境の擾乱を受ける前の最終処分地区の地質環境特性などを計測することを指す。これらの情報は、処分場の性能確認や工学的対策の実施に必要なパラメータとして役立つことが可能であり、目的 1 で行うモニタリングと重なる部分が多い。

また、目的 4 の社会的な側面からの地層処分モニタリングの目的のひとつとして挙げている「将来世代のためのデータベースの蓄積」として、ベースライン把握は、そのデータベースに記録されるべき環境の初期条件として、重要であると考えられる。

また目的 2 で記した法令要件への適合に関しても、地質環境特性のベースラインの情報は必要と考えられる。したがって、概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握は、地層処分計画を進める上で基盤的な情報を提供する重要な役割を有するものと考えられる。

地質環境特性のベースライン把握

処分事業による環境への影響の把握に供することを目的とした、水理特性、地下水化学特性などの地質環境特性のベースラインを取得する。一定の間隔を持って実施される地質環境特性のベースライン把握は、地表面から地下深部に至る空間的な広がり
と長期間という時間を考慮した地質環境情報の追跡性を確保するためにも重要であると
考えられる。

海外事例調査結果によれば、地質環境特性のベースライン把握は、前記 IAEA の報告書 (TECDOC-1208) でその意義が記されているのをはじめ、既にフィンランド等
その考え方を踏まえたモニタリング計画を進めている。段階的に処分地を選定してい
く地層処分事業では、地表面からのボーリングなど地質環境の擾乱が避けられない調
査の段階からベースライン把握が必要になるものと予想される。

目的5 社会的な意思決定に向けた情報提供

地層処分モニタリングは、地層処分に関する社会的な意思決定に必要な技術的な情報
の提供という現世代における社会的要求と、将来世代の意思決定に資するために必要な
データベース蓄積という、二つの目的が考えられる。

先に述べた、廃棄体の回収可能性や処分事業の段階的な実施方策に関わるモニタリン
グは、社会的な意思決定に向けた技術情報の提供という役割を有する。

スイスにおいては、EKRA(EKRA, 2000)がまとめた長期監視付処分概念のように、処
分場の閉鎖前に、種々の処分システムの性能や処分場近傍の地下環境特性に関する情報
を収集し、当該処分システムの安全性について社会の理解が得られた後に、処分場の閉
鎖を実施するという概念も提示されている。このような処分概念では、処分場閉鎖まで
の間、モニタリングによりデータ収集及び処分場の性能確認が実施される。

国民・地域住民の地層処分に対する信頼性の向上

地層処分システムの安全性が確保されていることを示す実測的な情報は、国民・地
域住民の地層処分事業への信頼性を高めることができると考えられる。

そのためには、パブリック・インボルブメント (PI) など社会的意思決定に資する
社会との対話において、実現可能で社会の安心に役立つ具体的な地層処分モニタリン
グ項目が議論されるものと考えられる。

将来世代のためのデータベース蓄積

IAEA では、将来の意思決定者に役立つかもしれない処分場サイト及びその周辺についての環境データベースを蓄積することを地層処分モニタリングの目的の一つとして検討している。

以上のように、地層処分モニタリングには、多岐にわたる目的に対応する役割があることを明らかにした。これらの目的について細分し、表 2-1 にモニタリングの目的とその分類として整理した。

表 2-1 地層処分モニタリングの目的とその分類

目 的	分 類
1. 処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認	処分システム構成要素の機能の確認
	設計・施工上の仮定の確認
	安全評価モデルの検証
	処分場の操業・施工に係る改善や補修の判断
2. 法令要件に対する適合性の確認	処分場閉鎖後の法令要件
	建設・操業時法令要件(作業員及び周辺住民に対する安全)
	環境影響に関わる法令要件
3. 政策及び事業実施上の意思決定に資する情報提供	意思決定に向けた情報提供
	埋設廃棄体の回収可能性への対処
4. 概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握	地質環境特性のベースライン把握
5. 社会的な意思決定に向けた情報提供	国民・地域住民の地層処分に対する信頼性の向上
	将来世代のためのデータベース蓄積

今までに整理した、地層処分モニタリングの目的は、次のような相互関係にあると考えられる。

目的 1「処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認」と目的 2「法令要件に対する適

合性の確認」については測定対象と評価方法が比較的明確であり、事業の進捗の上で積極的に情報が活用されるものである。

これに対して、目的 3「政策及び事業実施上の意思決定に資する情報提供」は今後の処分計画の進捗や、地層処分をとりまく諸情勢を踏まえて意思決定が求められた場合に、事業者や政策決定者が、他のいろいろな要因(例；地層処分技術の進捗、地層処分に対する社会の理解など)と併せて意思決定に資する情報として提供されるものと考えられる。

目的 4「概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握」は、目的 1、2、および 3 に示したモニタリング目的や評価も含めて、いろいろな要求に応じられる基礎基盤的な情報データの蓄積ととらえることができ、特に時間的に長期間を想定しなければならない地層処分において、地表から地下深部に至る空間と長期間にわたる地質環境情報の追跡性の確保を目的としたものといえる。

目的 5「社会的な意思決定に向けた情報提供」は、上記の各目的と多くは重複するものと考えられるが、最終処分地の選定段階における社会意思決定に向けた議論を十分踏まえて、計測すべきモニタリング・パラメータが決定されるものと考えられる。

2.3 地層処分モニタリングと地層処分の品質管理

地層処分の品質管理は、多重バリアシステムの安全性確保に直接関連した諸々の品質方針、目標や責任を定め、処分システムを構成する要素の目標性能を確保するという意味で極めて重要である。

処分事業及び処分場の建設操業についての品質管理は、日本工業規格（JIS）等に規定された従来の産業活動への適用例に則して実施することにより、安全を含めた処分システム性能の積極的な確保を目指すものと考えられる。

例：JIS Z 9904 / ISO 9904

「品質管理は・・・品質方針、品質目標、及び責任を定め、品質システムにおいて品質計画、品質管理（狭義）、品質保証、改善などを実施する全ての活動」

上記のような品質管理の体系については、地層処分の事業計画の一環として計画が具体化していくものと考えられる。

地層処分モニタリングは品質管理と共通する部分はあるが、地層処分に特徴的な閉鎖後におけるシステムの状態監視を主眼とした行為であり、品質管理のように人工バリア/天然バリアの性能を積極的に確保することを目標とするものではない。

建設操業を経て閉鎖に至る事業活動において、「処分場」という製品を完成させる上で必要な完成検査に相当する測定確認は、地層処分モニタリングとは区別して品質管理とそれに関わる計画の下で体系的にその内容を検討し具体化が進められるものと考えられる。

一方、地層処分モニタリングは、閉鎖によってシステムとしては完成された処分場が、安全評価によって解析予測された挙動に沿って事象が進みつつあるかどうかを、直接的にいくつかの評価パラメータに結びつくデータを取得する目的で実施される。解析予測には時間的、空間的にも不確実性が伴うため、上記の地層処分モニタリング・データは、予測解析の範囲を大きく逸脱しないか、またはその時間に対する変化と予測解析の比較をもとに、処分場の閉鎖後についての動向を把握する手段となる。

以上、処分場の段階的な管理において、閉鎖前に処分場の所定の品質とシステム性能を確保するための確認検査の行為を含めた品質管理と、主として閉鎖後の処分場の状態の把握を主眼とし、そのため閉鎖前にもその長期の経時変化の初期値をベースラインとして取得するモニタリングは、その計画や実施する機関及び適用する技術の考え方等必ずしも同一でないとの観点に立って、それらの体系及び技術の整備を進めて行くことが必要であると考えられる。

2.4 ステークホルダーとの関連

2.2.2 項で述べた地層処分モニタリングの目的を踏まえ、地層処分にかかわるステークホルダー^(*)の中から、処分事業実施者、安全規制機関、社会（一般公衆及び仲介する技術者）が、地層処分モニタリングの目的に関しどのように関与すると考えられるか整理して表 2-2 にまとめた。

^(*) OECD/NEA (2000)の序文では、ステークホルダー (stakeholder) には、廃棄物発生者、廃棄物管理機関、安全規制機関、地元自治体、選挙で選ばれた代表者、及び公衆と意思決定者間の技術的仲介者などが含まれるとしている。

2.4.1 処分事業実施者

事業の実施者は表 2-1 に示す目的 1～5 の全てに対応して様々なモニタリングを実施することが考えられる。モニタリング目的 1 は、特に処分場のセーフティー・ケースについての説明を強固にする観点から重要である。目的 2 は実施者の責務として行うもので、安全規制機関に対して法令要件を満たしていることを示す際にこの目的に沿ったモニタリング情報を活用することが考えられる。目的 3 は処分計画やプロジェクトを改善し、合理化等のために適切な判断情報を得ること。目的 4 は地質環境条件の確認、目的 5 は、処分地の選定、建設、操業、閉鎖等の段階的实施のプロセスと裏づけを明示することや、閉鎖後モニタリング等のオプションを用意しておくことで社会との対話を促進させることに寄与するものと考えられる。

2.4.2 安全規制機関

地層処分モニタリングに関する具体的な法令要件が定められている事例は、米国の WIPP 以外にはなく、各国とも検討途上といえる。したがって一般的なレベルでの考察であるが、地層処分モニタリングに関する何らかの法令要件が定められた後、安全規制機関は技術上の法令基準に適合していることの確認を処分事業実施者に要求することなど適切な方策をとることが考えられる。

米国の WIPP の例では、環境保護庁（EPA）により提示されたモニタリング要件に対し、実施者の米国エネルギー省（DOE）が性能確認プログラムを支援する目的で適合モニタリング計画（Compliance Monitoring Program; CMP）を開発し、10 個の適合モニタリング・パラメータ（COmpliance Monitoring Parameters; COMP）を選定した（EPA, 1996）。DOE は EPA に 5 年ごとに適合確認申請書を出すことになっている（DOE, 1999）。

目的 2 を中心に、他の目的に関しても法律および規制の内容に含まれる可能性があると考えられる。

2.4.3 社会（一般公衆及び技術者）

一般論としては、立地の候補地では住民は処分場が安全であることや将来の世代、特に子供や孫の世代が守られることを確認したいわけであり、それに対し処分事業実施者がどのような対策を示すのかが意思決定にとって重要である。したがって、処分事業の

進め方に対する信頼や、閉鎖後モニタリング等のオプションを含めた目的 3 の観点で選定されたパラメータを含む地層処分モニタリングが重要になると考えられる。また、一般公衆と意思決定者の間を仲介する技術者は目的 1~5 の全てに関して関心を寄せるものと考えられる。

表 2-2 モニタリングの目的と利害関係者の関与

(横:利害関係者) (縦:モニタリングの目的)	処分事業実施者	安全規制機関	社会 (一般公衆及び技術者)
1. 処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認	セーフティー・ケースの補強		技術者によるレビュー
2. 法令要件に対する適合性の確認	規制当局への報告	左記に対する判定	技術者によるレビュー
3. 政策および事業実施上の意思決定に資する情報提供	段階的実施のプロセス及び裏づけの明示、社会との対話		技術者によるレビュー 経営、政策担当者の関与
4. 概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握	プロジェクトの改善、合理化、不具合の場合の対応		技術者によるレビュー
5. 社会的な意思決定に向けた情報提供	段階的実施の確認		社会的意思決定

2.5 事業段階との関係

近年、多くの国において技術進歩に適切に対応するとともに社会のニーズにも柔軟に対処するために段階的な処分場開発が求められるようになり、その中で、「各事業段階における意思決定プロセス」が計画に考慮されるようになってきている(例えば OECD, 2001)。したがって、表 2-3 に地層処分モニタリングの目的を処分事業の段階ごとに対応させ、各事業段階におけるモニタリングの役割を考察した。

2.5.1 処分地選定段階

- ・ 安全規制における要件に加え、処分場の立地と建設開始に向けての政策上の意思決定への判断情報の提供と同時に、立地に対する社会的意思決定の面でも重要な情報となる。
- ・ 立地環境の特性を示すベースラインの理解をもとに、処分事業者が適切な処分システムのセーフティー・ケースを整備するための情報となる。
- ・ 閉鎖後にいたる長期的な地質環境条件の動向や処分場設置前後の影響と閉鎖後の地質環境回復動向のデータをもとに、技術的、社会的両面での必要に応じられる情報ともなり得る。

2.5.2 建設・操業および閉鎖段階

- ・ 安全規制要件に応じた工学的対策や安全性能に関わるデータを提供する。
- ・ 事業の段階的な展開と、社会的な意思決定に資する情報を提供する。

2.5.3 閉鎖後段階

- ・ 処分システムが積極的な安全管理を必要としない状況に置かれることから、
- ・ ベースラインとして長期の動向を把握してきた処分場をとりまく地質環境条件の回復と安定化の動向をつかむ。
- ・ それらモニタリング結果を、再回収や社会的側面での処分場閉鎖後の情報提供に資する。

表 2-3 事業の各段階におけるモニタリングの役割

事業段階 モニタリングの目的	処分地選定	建設・操業	閉鎖の決定 / 閉鎖	閉鎖後
2. 法令要件に対する適合性の確認	許認可にかかわる規制要件	建設・操業にかかわる規制要件	閉鎖にかかわる規制要件	該当しない
1. 処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認	該当しない	該当する ・（規制要件）	該当する ・（規制要件）	該当しない
3. 政策および事業実施上の意思決定に資する情報提供	該当する ・ 立地決定に関する事業判断	該当する ・ 段階的な事業展開	該当する ・ 閉鎖の判断	該当しない
4. 概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握	該当する ・ 事前のベースラインデータ	該当する ・ 事業実施に伴う擾乱の有無	該当する	該当する ・ 閉鎖後の回復、安定化
5. 社会的な意思決定に向けた情報提供	立地にかかわる社会的意思決定	処分事業に対する信頼	閉鎖に関する社会的意思決定	社会が望む限りモニタリングを継続

2.6 モニタリングを行う対象との関係

地層処分モニタリングの対象としては、前節までに整理したモニタリング目的との関係から考えると、人工バリアと処分場を構成する工学的要素や、その周辺環境の状況、さらに天然バリアの構成要素としてのファーストフィールドにいたる広い領域を考慮しておく必要がある。

特に着目すべきは、廃棄物から人工バリア、天然バリアを経て放射性核種が移行する経路であり、地層処分場の長期挙動を評価するシナリオの標準ケースとされる、図 2-1 に示

される要素をまず対象として考える。

ニアフィールドの性能に関しては、廃棄体及び緩衝材の挙動、及びそれらに影響を与える周辺岩盤の環境が主たる要因に挙げられる。これらは廃棄物の回収可能性の議論とも関係し、利害関係者の関心が寄せられやすいと考えられる。しかし、これらを直接的にモニタリングを目的として計測するためには、結果的にバリア性能に影響を及ぼす可能性のある多くの機器の設置が必要となることを、あわせて考慮する必要がある。

ファーフールドの性能に関わる評価では、地下水環境が還元性で緩慢な流動状態であること、深部地質環境が安定であること等、処分場のおかれた状況が適切であることを裏付ける情報が求められることを考慮して、そのために必要なモニタリングを長期にわたり行うことを主眼とした技術検討が重要である。

地層処分モニタリングに関する技術的取り組みの考え方については、第3章において述べることとする。

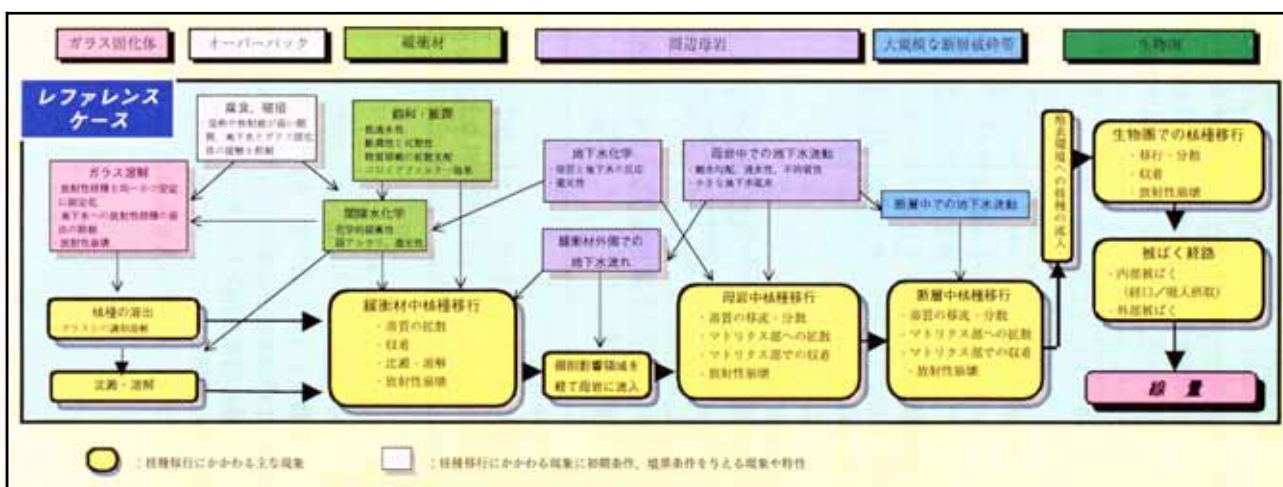


図 2-1 地層処分の性能評価のレファレンスケース（核燃料サイクル開発機構,1999）

2.7 パイロット施設との関係

廃棄体に直接アクセスしてモニタリングを行うことは工学的バリアの長期性能に対して潜在的マイナス影響を及ぼす可能性がある。この問題に対応するための提案のひとつとして、実処分エリアとは別の位置に実証のための施設を設け、モニタリングを実施するという考えがある（IAEA, 2001）。

スイス・EKRA が提案したパイロット施設（添付資料 - B）は、本格的な地層処分施設における廃棄体の埋設に先立って建設される小規模な施設である。この施設には、安全性を確認するためのモニタリング機器を設置した少数の廃棄体を埋設する。本格的な地層処分施設ではモニタリングは実施しない。パイロット施設は、本格的な地層処分施設が操業した後まで共用される。

2.8 計測と評価システムとの関係（モニタリング結果の利用）

原環センターが 2002 年 2 月に主催したモニタリングに関する国際ワークショップ（添付資料 - C）では、モニタリングで得られたデータが当初期待した範囲をはずれた場合どうするのか、という問題が提起された。モニタリングで得られたデータを評価するためには、モニタリングの実測値と、それらのデータを理解するための評価ツールが関連していることが重要である。以下に、ワークショップで紹介された米国 WIPP で採用されているトリガー値（Trigger values）の考え方を紹介する。

（WIPP のトリガー値）

トリガー値とは、WIPP のモニタリング・データの上限值あるいは下限値である。これらはモニタリングにおいて予期しない値が生じた場合の原因調査を行い、規則遵守への影響がないかどうかの評価を行うために、処分事業実施者（米・エネルギー省、DOE）が設定している自主基準である。評価結果に応じて必要ならば別の措置を講じることもあるし、トリガー値を修正するだけで済む場合もある。一部のモニタリング・パラメータについては、処分場の長期的性能がモニタリングで正確に表現されないため、トリガー値を与えていない。EPA は閉鎖前及び閉鎖後のモニタリング計画にこのようなシステムを適用することを義務づけていないが、DOE はトリガー値がモニタリング計画全体の重要な一部と判断している。各モニタリング・パラメータのトリガー値を引き出すために、DOE は次の 5 つの段階を踏んでいる。

- ・ 第 1 段階：モニタリングのデータ特性（実測値、観測値、届出値等）の明確化
- ・ 第 2 段階：モニタリング関連データの性能評価要素（性能評価パラメータ、FEP 確定論拠、概念モデル等）へのマッピング
- ・ 第 3 段階：遵守確認申請に関わる性能評価の裏づけに使用されたパラメータの関連データを明確化

- ・ 第4段階：性能評価要素の変化が処分システム性能に及ぼす影響の明確化
- ・ 第5段階：トリガー値を与えて良いかどうかの判定（精通している性能評価研究責任者による）。与えて良いならばモニタリング・パラメータ及びモニタリング・データ、またはそのいずれかについてトリガー値が設定される。

DOEはWIPPにおける10個の適合モニタリング・パラメータのうち、7個にトリガー値を与えている。

以上の事例より考察すると、モニタリングに関わる計測と評価システムを構築するための課題として、以下の事項に関する標準化があげられる。

- ・ データの取得方法
- ・ データの評価方法
- ・ 判断（エキスパート・ジャッジメント）の方法・基準

第3章 モニタリング技術の検討

地層処分モニタリング技術は、第2章において整理した地層処分モニタリングに関する多様な目的を念頭に置いて整備することが望まれる。また、先に述べたように地層処分モニタリングは、処分事業実施者、安全規制機関、地方自治体等がそれぞれの役割や目的に応じて実施することも視野に入れる必要があり、今後、そのようなモニタリング実施の多様な目的（ニーズ）に備えておく必要がある。

従って、地層処分モニタリング技術開発は、各機関の計画するモニタリング計画に柔軟に資することの出来るよう、「なぜ(目的)、いつ(時期、期間)、どこで、誰が、何を、どのように(手法)モニタリングを行うのか」の視点で分類整理した「技術的選択肢(技術メニュー)」の整備を目的として実施することとした。

最終処分地選定段階から建設・操業期間中には、ボーリング孔や調査坑道が開放した状態で計測機器へのアクセスも比較的容易であり、既存の測定技術、手法をもとに実施できる部分が多いと考えられるが、処分場およびモニタリング機器へのアクセスが極めて限定される処分場閉鎖後を想定した技術の適用性の見通しがより重要となる。そこで、地層処分モニタリングの技術メニューは、長期にわたり堅牢で信頼性の高い技術が要求され、且つ、地層処分に特徴的で最も重要であると考えられる処分場閉鎖後の安全性を確認することを念頭に置いて整備することにした。

地層処分モニタリングの技術メニューの整備に当たっては、地層処分の技術的特徴を踏まえ、事例検討と技術調査の知見をもとに、現状で考えられる技術をもとに実現可能性を示しつつ、その限界や一方で技術の更新も視野に置いて、図3-1に示すような検討手順に基づき進めることとした。

「事例検討」は、地層処分モニタリングの最も重要な計測対象となりうるパラメータとなると考えられる水理、地下水化学におけるケーススタディとして、現状技術をもとに計測手法を検討するとともに、今までの類似事例の調査などを参考に技術開発課題を抽出することを目的とした。

「技術調査」は、地層処分モニタリングに適用可能な計測センサなどの要素技術(シー

ズ)について調査・検討を行い、適時事例検討に反映を図ることとした。

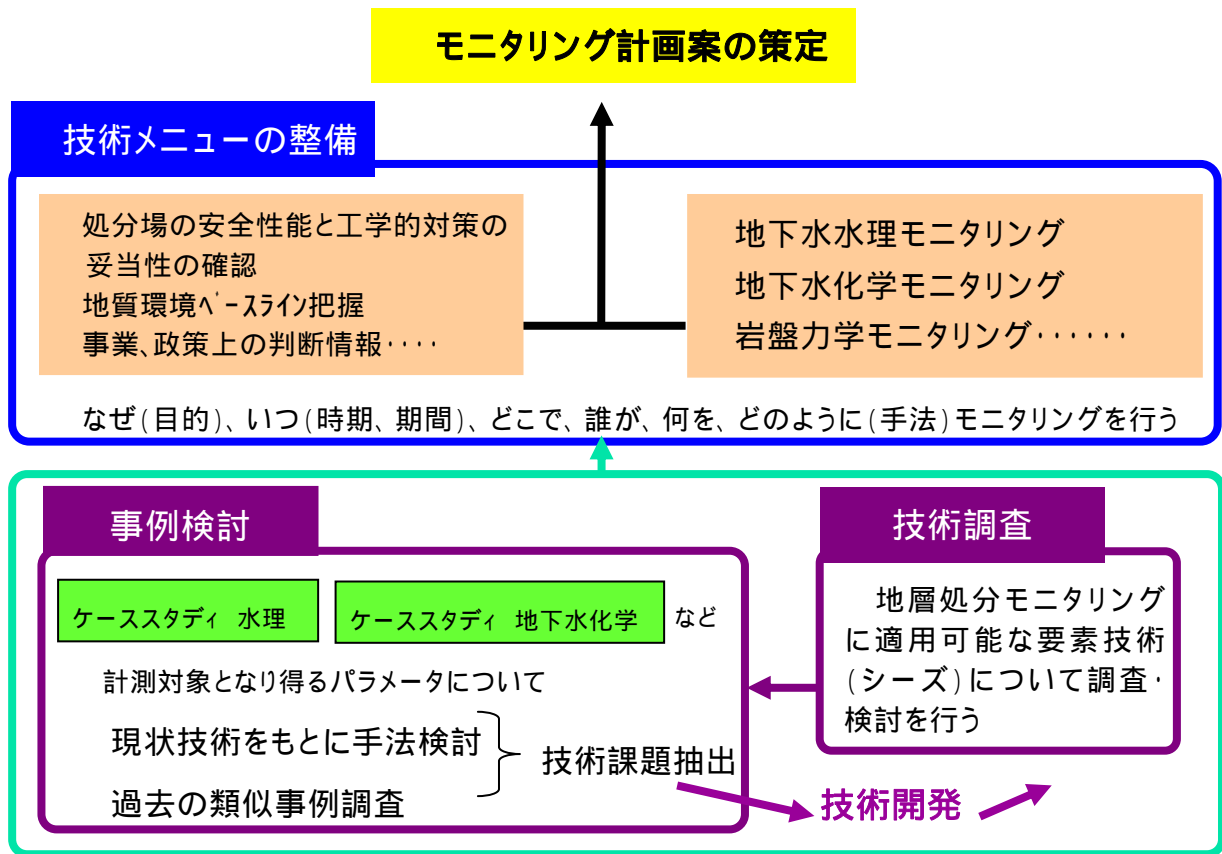


図 3-1 モニタリング技術メニューの整備に関する検討フロー

3.1 地層処分モニタリング技術に関する情報の整理

3.1.1 モニタリングの技術検討にあたって

地層処分モニタリングは、地表付近における計測などを除いて、多くの場合、表 3-1 に示す条件の計測環境を念頭に置いて技術開発することが必須条件となる。

表 3-1 地層処分モニタリングにおいて考慮すべき計測環境条件

項目	廃棄体近傍	廃棄体遠方
温度	最大 100	45 (深度 1000m) *
圧力	11MPa** (深度 1000m)	10MPa (深度 1000m)
水質	塩水 / 淡水	塩水 / 淡水
放射線***	3X10 ⁻⁰ mGy/h(ガンマ線)	考慮する必要なし
	3X10 ⁻² mGy/h(中性子線)	

* (核燃料サイクル開発機構、1999)

**深度 1000m での静水圧(10MPa) + 緩衝材の膨潤圧力(1MPa)を想定

***オーバーバック厚さ 190mm の場合のオーバーバック表面での値 (核燃料サイクル開発機構、1999)

地層処分モニタリングの技術課題の抽出整理にあたっては、技術メニューに示すべき 5 W 1 Hのうち、時間（計測開始時期・計測間隔・計測終了時期）や場所（地表面における二次元的な広がりおよび深度）の要因と機器システムの保守、交換の有無を含めた手法について考慮する必要がある。

これまでの調査研究の結果、地層処分モニタリング技術として適用可能な既存技術の検討とともに、以下の課題について技術の整備を行うことが重要と考えた。

- ・ 水理及び地下水化学特性のモニタリング
- ・ 地中無線通信技術

上記の 2 つの技術開発課題は、次の理由から選定した。

高レベル放射性廃棄物の処分における安全評価のシナリオでは、第 2 章、図 2-1 に核燃料サイクル開発機構の第 2 次とりまとめ報告書のレファレンスケースを参照したように、地下水の作用で廃棄物に含まれる放射性核種が地下水に溶出し、地層（天然バリア）を経て人間の生活環境である地表に運ばれる。そのことから、水理および地下水化学特性を計測するためのモニタリングをまず課題としてとりあげ、技術の見通しをつけるものとする。また、地中無線通信技術は地下深部で計測された測定データを地表に伝える手段として、多くのモニタリング技術に共通な技術であり、センサからデータを伝送するためのケーブルを用いない技術として、処分場の閉じこめ性能に影響を及ぼさない有望な技術として開発課題とした。

3.1.2 事例検討の進め方と今までの検討例（水理および地下水化学特性）

水理特性に関しては、水理挙動に擾乱をおこした事例として、道路トンネル、鉱山などにおける調査を行った。

(1) 岡谷トンネルの事例（植下ら、1989）

検討目的：道路トンネル建設工事における地下水環境影響

現象：全長 1,400m の道路トンネルの建設（土被り 50～100m）に伴う周辺の地下水位の低下

現象の概要：掘削開始後 1 年以内に水位低下が始まり、5m 以上の低下が生じた領域は南北方向におよそ 1500m、東西方向におよそ 1000m にわたる。トンネル開

通後も定常的に水位は低下している。ただし、これらの影響範囲は、山岳地形によるところが大きいと考えられる。有限要素法による定常地下水流動解析においては、トンネル内への湧水量の設定値により、計算される地下水位の低下範囲は変化する。

(2) 常磐炭田の事例（小原ら、1997）

検討目的：炭鉱の操業から閉山およびその後の管理期間にわたり、計測孔による実測の経験

現象：常磐炭田地域（採掘面積約 20km²）での石炭掘削時から閉山を経て、現在に至る約 100 年の水位変動。

現象の概要：地下水位の低下は、操業時坑道からの排水が行われた約 80 年の間継続し、閉山後の約 20 年の間には地下水位が回復している状況が確認された。定点実測は、計測孔を維持しつつ計器を交換して約 100 年行われた。計測手法は水位実測または圧力計測と直接的であるが、操業を停止した後回復にいたる経過が残されている。

(3) 地下石油備蓄基地の事例（岡本ら、1993）

検討目的：久慈・菊間地下石油備蓄基地の空洞掘削に伴う地下水位の変化の検討事例

現象：深度 30～100m の地下に、およそ 500m 四方の範囲に岩盤タンク施設を建設する際の地下水位の変化。

現象の概要：亀裂など高透水帯を有する岩盤地域での地下水位影響範囲は、900m 程度までに及んでいる。また、地下水位低下量は、高透水帯と測定点との位置関係で大きく影響される。従って、このような岩盤におけるモニタリング水位計測点の選定と配置にあたっては、高透水帯の連続性、範囲、深度、透水性などが考慮されていなければならない。

地下水化学特性については、地層処分モニタリングに参考となるような長期にわたる計測をした事例は見いだせなかった。そのため、事例調査をもとに地下水化学特性の計測に関わる技術課題を抽出する試みは困難であることがわかった。

これまでに示した事例は、地層処分モニタリング技術の開発に参考となる水理挙動の計測を対象としているが、加えて岩盤特性なども対象として考え、大深度地下の探査や計測

の知見について収集することにより、地下での計測に関する技術的課題の抽出につとめる考えである。上記水理の事例をみても長期間にわたる計測対象の変動に着目した既存事例を求めることは難しいと思われる。しかし、比較的短い期間の事例であっても、計測目的、計測パラメータ、使用した計測機器と当該計測機器が設置された地質環境についてモニタリング技術が対象とする環境条件の実状と機器の使用に関する情報に着目して事例調査を行い、今後の調査研究に資することとする。

3.1.3 技術調査の進め方と今までの検討状況

地層処分モニタリングの基盤となる要素技術（シーズ）の調査は、他の分野において実用化されている既存技術の調査と並行して、早期に開発に着手する必要があると考えられる地下水などを対象とする計測技術（センサ）、および地中無線通信による伝送技術について、重点的に技術調査検討を実施することとした。

(1) 計測技術

計測技術の現状については、国内外の地層処分に関わる深地層の研究施設（URL）等で実施されている計測内容を調査した（添付資料 - F）。日本をふくめスウェーデン、フィンランド、スイス、フランス、ベルギー、スペイン、ドイツ、英国、米国、カナダにおける調査研究に適用されたモニタリング、もしくは試験計測の事例から計測機器の耐用性について事例を抽出した。

その結果、カナダのトンネルシーリングやスイスグリムゼルの人工バリア試験で比較的長期の使用例があり、既存のセンサは数年間程度の稼働は見込めるが、地層処分環境において今後はさらに長寿命化が課題とされることがわかった。その結果を総合すると、地層処分で想定している地下深部の環境で長期間の計測を行うニーズがこれまでほとんど存在しなかったため、計測システムの機能維持や材料寿命の点で信頼できる技術情報が伴っておらず、それを補う技術開発を含めて、なお検討を要するといえる。

地下水の化学特性の計測、とりわけ酸化還元電位（Eh）及び水素イオン濃度（pH）は、放射性核種の物質移行特性に大きく関与することから、重要なパラメータであり、その測定技術はモニタリングを検討する上でもまず着目しておくべきものである。国内外のURLにおいては、サンプリング取水した地下水を対象に測定しているが、連続的な計測の事例は無い。

Eh に関しては、酸化還元環境の把握を行うことが可能な現状の機器の調査を行った結果、特に長期間にわたって地下深部の酸化還元環境を把握し続けることを目的に開発されている機器は見出せなかった。また pH に関しては、一般的な pH 測定手法が電気的測定法または比色測定法であり、それぞれの計測機器の処分環境における適用性を、温度、圧力・衝撃、酸化還元雰囲気、センサと水の接触の程度、放射線および長期特性などの視点

で整理した。既存の計測機器は Eh, pH とともにセンサの化学反応による検出を原理としており、そのままでは長期の連続的計測に適用が難しく、機器のおかれる使用環境にあわせた校正、使用材料の変化、劣化など技術的課題が提起された。そのため調査の分野を拡大し、類似の環境において開発されている技術として、地下深部の酸化還元環境を把握するシステムに近い、「しんかい 2000」のために開発されたセンサの技術(下島, 1998)や宇宙開発など探査調査分野、小型でエネルギー負荷の少ない医療分野の技術などを参考に、それぞれの技術の応用の可能性を探りつつある。なお、近年技術進歩が著しい地球計測技術(リモートセンシング技術; 物理探査学会、地盤工学会、日本地震学会、地下水学会等の論文情報)は、水理や岩盤特性についての情報を把握できる計測技術として発展する可能性があるため、今後の技術開発の動向を調査していきたい。

また、計測技術の最新技術動向として、光ファイバと複合させたセンサが、化学、温度、ひずみなどの計測のため活用されつつある。このような最新の技術について、測定原理、センサの性能を調査するとともに技術開発を実施し、地層処分モニタリングへの適用性を検討する。

地層処分のモニタリングで想定される計測対象について、今までに実施したセンサの技術動向調査の結果を表 3-2 に取りまとめた。

表 3-2 計測対象とセンサ技術動向調査のまとめ

計測対象分類	計測項目	計測方法	地層処分モニタリング技術の観点での課題
熱	温度	熱電式計測	導電性金属使用のため、環境での変化、劣化をきたす
地下水	水位、間隙水圧 含水率	水位、水圧、水分計	化学法、電気法(導電計測)ともに長期の信頼性が課題
応力	岩盤圧、亀裂 変位、ひずみ	音響(AE) ひずみ/変位計	音響等発信・受信計測のエネルギー供給
化学	水質化学 溶存成分	Eh/pH 計測 腐食電位	原理的に化学反応センサのため変化、劣化への対処
その他複合計測	光学ファイバ複合センサ (反射型、透過型等) 応力 - 光透過特性変化 化学 - 光波長 感熱 - 光波長、屈折率変化		センサとファイバ材料の、化学的構造的耐久性が未知である 光通信ケーブル等の知見の反映

*) 計測項目、方法については、(IAEA, 2001、POSIVA 2003、SKB, 2001) 等を参照
光ファイバ複合センサについては (Jobmann, 2000) 等を参照

(2) 地中無線通信による伝送技術

我が国においては、高レベル放射性廃棄物の地層処分は、地下 300m 以深に廃棄体を埋設することとしている。このような地下深部における計測データなどの情報を地表に伝達する方法として、ケーブル等を用いる有線方式とケーブル等を用いない無線方式が考えられる。

有線方式は、ケーブルを通すことに起因する水みちにより周辺の水理場に影響を与えることが想定されるため、出来るだけ避けることが好ましい。従って、無線方式の可能性を検討していくことが重要であると考えられる。

無線方式は、電磁波や光、音波によるものがあるが、地層処分モニタリングへの適用性の点で、電磁波のうち通常の通信で用いられる高周波帯域は、伝搬媒質が水や岩盤の場合その伝搬の原理上減衰が大きく適さない。光通信については実用的には通信ケーブルが必要であり、また音波通信は減衰の点や通信できるデータ情報を大きく出来ないなどの基本的な問題がある。

それに対し、低周波帯域の電磁波の利用は、これまでも地盤沈下計測データ送信や、土木工事での利用など、地層処分モニタリングに類似した条件での実績があることから、もっとも適用性が高いと判断し、開発を行っている。従来は、電波の特性上送受信機器が大規模であったものを小型化し、省電力を図った上で実際の地層中での機能確認試験に供した。試験に使用したプロトタイプ機の構成を図 3-2 に示す。

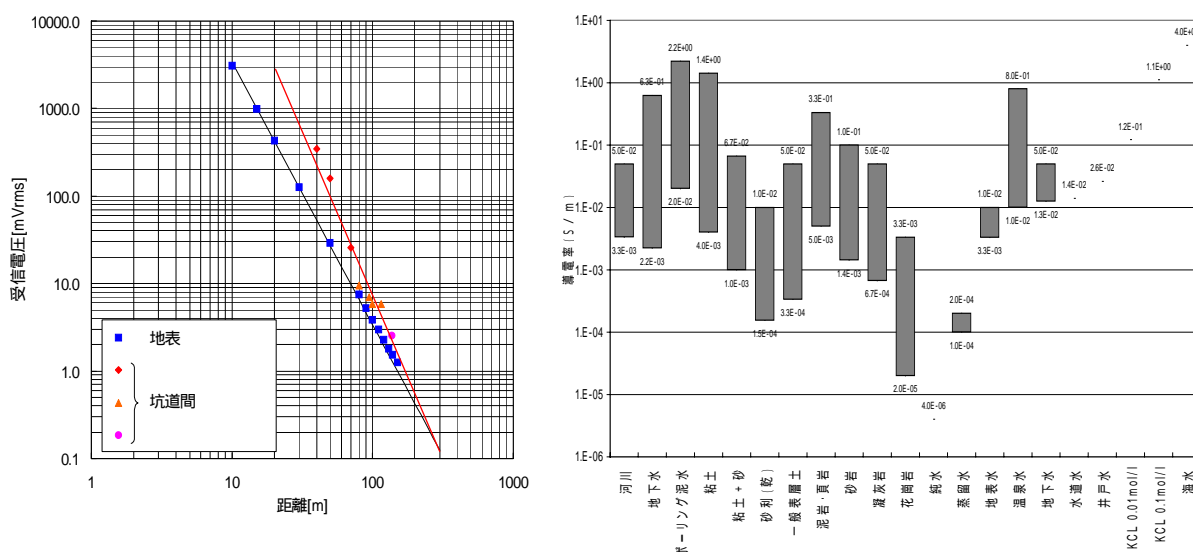
まず、スウェーデンの地下岩盤施設 (HRL) で、低周波の電磁波による地中無線伝送試験を行い、基本的な通信が行えることを試験的に確かめた。その結果を電磁波の伝搬についての理論解析と比較することにより、地中での基本的な通信特性を理論を踏まえて検討している。図 3-3(a)に受信電圧と通信距離 (送信機と受信機との間の距離) の関係を示した。図中の は地表での通信試験結果である。 , , は、地中での通信試験結果であり、 では約 40~70m、 では、約 80~100m、 では、約 130m の岩が送信機と受信機との間に存在している。図 3-3(a)から、地表及び地中における通信特性は、距離が離れるほど受信電圧が小さくなる傾向がみられるものの、送信機と受信機の間が存在する媒体の違いによる影響はほとんど見られなかった。この試験結果を検証するために、地中における低周波の電磁波の伝搬解析を、図 3-3(b)に示す媒体の導電率を参考にして行っている。これまでの試験結果に 2 次元的な伝搬の理論解析を適用し、地中媒体について電磁波の伝

搬に関わる誘電率などの一般的特性データに基づき検討した結果、上記スウェーデンでの実験例の均質な結晶質岩・塩水地下水環境では、約 100m 程度までデータ伝送できるという。

今後は、実際の処分場での多様な地質環境への適用も考慮し、3 次元的な構造をもつ対象地質についての解析手法の検討をすすめ、また実際の使用環境に類似した各種の地下施設における試験確認もあわせて実施しつつ開発を進めることとする。また、地層処分場の深度（例：結晶質岩で～1000m、堆積岩で 500m 程度）や、処分場の特殊な環境を考慮すると、通信距離の長距離化、耐圧・耐熱・耐放射線性についても検討が必要である。さらに、機器の動作に必要な電源の確保策など、長期の信頼性、適用性を念頭に置いた運転・保守性及び小型化についても今後取り組むべき課題である。



図 3-2 地中無線通信機（プロトタイプ機）



(a)受信電圧と距離の関係

(b)媒体の導電率

図 3-3 地中無線通信結果と媒体の導電率

あとがき

地層処分においてどのようなモニタリングを行うことになるかは、今後、議論がなされるものと考えられるが、その判断のために技術的可能性を示しておくことは重要である。

地層処分モニタリングの技術メニューの整備については、5W1Hの視点でモニタリング計画に資する情報となるよう、調査研究を実施する。

また技術面での適用性検討においては、計測技術、データ伝送など地層処分モニタリングの要素技術について技術的可能性を明らかにする調査研究とともに、実際の深部地質環境のフィールドを活用した技術の確認が重要となる。

特に、地層処分モニタリングに求められる環境条件において、かつ、長期間のモニタリングを可能とするセンサ技術は、これまで需要に乏しかったことから積極的な開発が進められてこなかったため、新規の開発が必要な分野であることを指摘してきた。従って、宇宙開発、海洋開発等の幅広い先進の科学技術分野における技術調査（シーズ調査）を今後も継続するとともに、有望なセンサや地中無線伝送技術の開発を進める考えである。

また、地層処分モニタリング技術として見通しのある技術については、技術的により信頼性の高いモニタリングシステムの構築に向け、国内外における深地層の研究施設などフィールドにおける試験確認を実施しつつ技術開発を進めていくものとする。

謝辞

本報告書は、経済産業省からの委託により（財）原子力環境整備促進・資金管理センターが実施してきた「モニタリング機器技術高度化調査」の研究成果などをもとに地層処分モニタリングに関する最新の知見をとりまとめたものである。

取りまとめにあたり、モニタリングシステム検討委員会の委員（添付資料 - G）をはじめとする学識経験者各位のご協力をいただきましたことに謝意を表します。

参考文献

ANDRA : Loi No. 91-1381 du 30 decembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des dechets radioactifs (1991)

DOE : 40 CFR Part 191 and 194 Compliance Monitoring Implementation Plan : Document DOE/WIPP-99-3119. DOE, Carlsbad Area Office, Carlsbad, New Mexico (1999)

EKRA : Disposal Concepts for Radioactive Waste: Final Report (2000)

EPA : Environmantal Radiation Protection Standards for the Management and Disposal of Spent Nuculear Fuel, High-level and Transuranic Radioactive Wastes, 40 CFR 191, Final Rule, Federal Register 58, 66398 (December 20, 1993). U.S. Environmental Protection Agency, Radiation Protection Division, Washington, D.C. (1993)

EPA : Criteria for Certification and Recertification of the Waste Isolation Pilot Plant's Compliance with 40 CFR 191 Disposal Regulations, Final Rule, 40 CFR 194, Federal Register 63, 27353-27406 (February 9, 1996). U.S. Environmental Protection Agency, Radiation Protection Division, Washington, D.C. (1996)

原子力発電環境整備機構：公募にあたって～ 高レベル放射性廃棄物の安全・確実な処分に
向けて～（2002）

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）

IAEA : The principles of Radioactive Waste Management, IAEA Safety Series No.111-F,
(1995)

IAEA : Retrievalability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. Proceedings of an
International Seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste
in co-operation with the IAEA, Saltsjöbaden, Sweden, 24-27 October 1999.
IAEA-TECDOC-1187 (2000)

IAEA : Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste,
IAEA-TECDOC-1208 (2001)

Jobmann, M., Fischer, S., Voet, M. : New monitoring methods for operational safety
requirements based on fiber optic technology, Distec'2000, International Conference
on Radioactive waste disposal, Berlin, Germany. (2000)

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, JNC TN1400 99-023 (1999)

日本規格協会：品質管理及び品質システムの要素 — 指針, JIS Z9904 (1994)

NRC : One Step at a Time: The Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Waste (2003)

小原欽一：深部地下水の水質形成機構に関する研究（その3），PNC TJ1676 97-001，pp.1-127（1997）

OECD/NEA : Disposal of Radioactive Waste, An Overreview of the Principles Involved, (1982)

OECD/NEA : STAKEHOLDER CONFIDENCE AND RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL, Inauguration, First Workshop and Meeting of the NEA Forum on Stakeholder Confidence in the Area of Radioactive Waste Management Paris, France 28-31 August (2000)

OECD/NEA : Reversibility and retrievability in geologic disposal of radioactive waste- reflection at the international level, oecd/nea 3140 (2001)

岡本淳，有元平，山本和彦，大津宏康：菊間地下石油備蓄基地建設工事での空洞掘削に伴う地下水挙動に関する検討，土木学会論文集 巻:480/ -21号，土木学会，pp.481-494（1993）

Posiva : Programme of Monitoring at Olkiluoto During Construction and Operation of the ONKALO, POSIVA 2003-05 (2003)

Simmons, G.R., P. Baumgartner, G.A. Bird, C.C. Davison, L. H. Johnson and J.A. Tamm. : An approach to criteria, design limits and monitoring nuclear fuel waste disposal. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10737, COG-94-30 (1994)

下島公紀、許正憲：化学センサの海洋学への適用 - ISFET を用いた深海用 pH センサの開発 - ，地球化学，32，1-11（1998）

SKB : RD&D-Programme 2001 Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, SKB TR-01-30 (2001)

植下協、大東憲二：山岳トンネル建設工事における地下水環境影響評価 - 中央自動車道長野線岡谷・塩尻トンネルの場合 - ，土と基礎，37-6（377），pp.23-28（1989）

添付資料 - A 制度的管理に関する国際的な議論の状況

制度的管理*は、諸外国において 1970 年代頃から議論された。国際的な文書での言及としては、OECD/NEA(1982)が制度的管理の役割の有効性を認めたとうえで、基本的に制度的管理に依存しないパッシブな処分方法により対策を立てるべきであると述べた。OECD/NEA(1995a)では不注意な人間行動の評価を行い、より積極的に制度的管理に言及した。また、OECD/NEA(1995b)では放射性廃棄物の処分に関わる倫理的な問題について議論し、世代間公平と世代内公平について配慮する必要性があることを述べている。なお、回収可能性及び可逆性について議論したOECD/NEA(2001)は、上記の世代間倫理に関し、将来世代が自ら意思決定を行う権利について述べ、1995年の議論をさらに深めている。

OECD/NEA(1999)は、信頼という用語を「信頼を得るということは、導かれた結論が十分に支持される、肯定的な判断に達したということである」(*To have confidence is to have reached a positive judgement that a given set of conclusions are well-supported*)と定義した上で、処分場開発における意思決定において、完全なシステムの理解は要求されないことを述べている。その上で、放射性廃棄物管理に携わる人たちにとって極めて重要なテーマは、地層処分の長期的な安全性に対する信頼、またそうした信頼を得ながらコミュニケーションをはかっていく方法であるとし、そのために処分場開発が段階的かつ柔軟性をもったものであることの重要性を指摘した。さらに、回収可能性と倫理的側面を議論したワークショップ(IAEA, 2000)や利害関係者(ステークホルダー)の信頼に関するフォーラム(OECD/NEA, 2000)などが引き続き開催され、社会的信頼の観点での議論が今日でも継続されている。

このような社会的信頼に関する国際的議論がなされる中、IAEAはその技術文書(IAEA, 2001)においてモニタリングの目的、情報の活用、方法論に関する検討状況をまとめた。

上記のことから、制度的に関する国際的な動向の概略は以下のようにまとめられる。

- ・ 原則：地層処分の安全性確保は制度的管理には依存しない。

* 制度的管理：国あるいは地方政府の法律の下で指定された当局あるいは公的機関による廃棄物サイト(例えば、処分サイト)の管理。この管理は能動的(モニタリング、監視、修復作業)または受動的(土地利用の管理)なものであってもよく、原子力施設(例えば浅地中処分施設)の設計の際に考慮すべき項目の一つであってもよい。*(Institutional Control: Control of a waste site (for example, disposal site) by an authority or institution designed under the laws of a country or state. This control may be active (monitoring, surveillance, remedial work) or passive (land use control) and may be a factor in the design of a nuclear facility (for example, near surface disposal facility)).*...(IAEA, 1995)

- ・ 1980年代から、社会的信頼の獲得が必要との観点から、制度的管理の役割の有効性が国際機関においても明示的に認められた。
- ・ 近年、処分場開発プロセスの柔軟性、段階的アプローチの必要性が議論され、その中で制度的管理の役割がより積極的に位置付けられるようになった。社会的信頼と受容性の視点で、制度的管理の手段であるモニタリングの活用が検討されるに至っている。

【参考文献】

IAEA : The principles of Radioactive Waste Management, IAEA Safety Series No.111-F, (1995)

IAEA : Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste, IAEA-TECDOC-1208 (2001)

IAEA : Retrievability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. Proceedings of an International Seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste in co-operation with the IAEA, Saltsjöbaden, Sweden, 24-27 October 1999. IAEA-TECDOC-1187 (2000)

OECD/NEA : Disposal of Radioactive Waste, An Overreview of the Principles Involved, (1982)

OECD/NEA : Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories; Future Human Actions at Disposal Sites. A Report of the NEA Working Group on Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites, OECD/NEA, Paris, France (1995a)

OECD/NEA : The Environmental and Ethical Basis of the Geological Disposal of Long-lived Radioactive Waste; Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee, OECD/NEA, Paris, France (1995b)

OECD/NEA : Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories - Its Development and Communication (1999)

OECD/NEA : STAKEHOLDER CONFIDENCE AND RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL, Inauguration, First Workshop and Meeting of the NEA Forum on Stakeholder Confidence in the Area of Radioactive Waste Management, Paris, France 28-31 August (2000)

OECD/NEA : Reversibility and retrievability in geologic disposal of radioactive waste- reflection at the international level, oecd/nea 3140 (2001)

添付資料 - B 国内外のモニタリング検討状況の調査と分析

B - 1 各国におけるモニタリングの検討状況

我が国におけるモニタリング検討に資することを目的として、諸外国の地層処分計画におけるモニタリングの検討状況の調査を 2001 年から 2002 年の間に実施した。調査の対象はスウェーデン、フィンランド、フランス、スイス、ベルギー、スペイン、イギリス、ドイツ、米国（YMP 及び WIPP）及びカナダとした。調査は既存文献、インターネット等による情報収集のほか、各国の関係機関に当該内容に関するレポートを委託するとともに、必要な場合はその機関を訪問し、担当者からのヒアリングを実施した。

調査結果を整理して表 B-1 にまとめた。本表では次の内容について整理した。

地層処分における管理の考え方

- ・ 基本的な考え方
- ・ 実証等を目的とした地下試験施設
- ・ 回収可能性

規制側からのモニタリングに関する要請

実施主体等によるモニタリングに関する取り組み状況

- ・ 要件
- ・ 計画
- ・ モニタリング項目選定要件

B - 2 地層処分場の管理

(1) 段階的实施

諸外国における地層処分の考え方は、IAEA の「放射性廃棄物の管理の原則, SS No.111-F」(IAEA, 1995) に記載されている「放射性廃棄物の管理は、必要な安全機能として長期の制度的管理にできる限り頼るべきではない」という考え方を原則としている。処分の基本方針が明確に示されている国と検討途上の国がある。基本方針が示されている国はいずれも処分場開発を段階的に実施する立場を明確にしており、関連するモニタリングの実施を明示あるいは示唆している。

(2) 地下試験施設

処分技術の実証等を目的とした地下試験施設等については、以下の国で方針が明示されている

か、実施されている。

- ・ スウェーデン：SKB の計画として、第一段階として先行的に全体の 10%の廃棄体を定置し、当該期間においてモニタリング等により得られた知見を評価し、合意がなされれば残りの廃棄体を定置する処分エリアを建設する。
- ・ 米国 WIPP：処分場の一部が地下研究所として利用されており、岩盤挙動のモニタリングや回収可能性の実証試験等も実施されている。

そのほか、スイスでは放射性廃棄物処分概念専門家グループ（EKRA）が「長期間監視付地層処分」の概念を示し、その中で実際の廃棄物定置施設（主要施設）に加えてテスト施設及びパイロット施設を建設してモニタリングや管理を行うことを勧告した（EKRA, 2000）。最近米国でも、全米科学アカデミーの附属パネルが、ユッカマウンテンの処分場プログラムを「適応性の高い段階的な取り組み」とするべきであり、そのために少なくとも中心的な役割を果たすいくつかの概念をテストするための試験段階を計画に組み込むように DOE に勧告した（National Research Council, 2003）。

（3）回収可能性

廃棄物の回収可能性あるいはそれを含む可逆性を処分計画または法律等で明示しているのはフィンランド、フランス及び米国（YMP、WIPP）である。その他の国でも、最近の国際的な検討状況を踏まえ、関係機関内部では回収可能性に関する検討を開始していることがわかった。

以上の調査結果より、近年の国際的な動向は、処分場開発の段階的な実施にスポットがあてられており、これに関して回収可能性等が検討されてきているといえる。従来そのような立場を明示していなかった国や、回収可能性を考慮していなかった国でも内部的には検討が始まっていることが示唆された。社会的意思決定に関わる対策の文書作成やワークショップの開催が国際機関の主導により行われており（OECD/NEA, 1999, 2000; IAEA, 2000 等）、これらが各国においても重要な課題と認識されていることがわかる。これらのことから、今後も各国や国際機関の議論の動向を注視し、情報交換しながら研究開発を進める必要がある。

B - 3 モニタリングの目的

一般的な安全要件に従い、処分場の長期安全性は将来世代によるモニタリングに依存しないように設計されることを原則としている。とはいえ、上記に述べた段階的实施やその他の規制上の要件等により、各国でモニタリングを実施することが検討されている。米国及びカナダでは規制により最低限必要なモニタリング要件が示されている。

表 B-1 に示した各国の検討内容から、モニタリングの目的として考えられている内容を包括的に抽出した。すでに操業段階に入っている米国の WIPP を除いて、各国のモニタリングに関する計画は検討途上であり、以下に示した内容は本研究の調査時点のものであり、国や責任機関の公式な見解でないものも含まれることに注意されたい。

安全評価の補完及びモデル・仮定の実証または理解の促進：スウェーデン、フランス、スイス、ベルギー、スペイン、イギリス、米国、カナダ

処分場の設計・建設データの補完、確認：スイス、スペイン、カナダ

現況（ベースライン）の把握：スウェーデン、スペイン、イギリス、ドイツ、米国、カナダ

事業向上のための理解、フィードバック、修復判断等：カナダ

社会の意思決定のための情報及び理解提供：スイス、スペイン、カナダ

回収可能性（retrievability）あるいは可逆性（reversibility）に関わるモニタリング：フランス、スペイン

公衆の信頼の構築：カナダ

将来世代の信頼感を保持：スイス

管理終了後の公衆への再保証：イギリス

規制要件への遵守、適合性の実証：スイス、ドイツ、米国、カナダ

一般的な環境影響評価：フィンランド

処分場から環境、一般公衆、及び従業者への非放射線あるいは放射線影響の評価：スウェーデン、スイス、スペイン、イギリス、ドイツ

核不拡散に関する保障措置要求への対応：スウェーデン、スイス、スペイン

上記にリストアップした 13 項目のうち、～ の項目は以下のようにくることが可能である。

- ・ 処分場の工学的対策と安全性能の確認：
- ・ 環境の現況（ベースライン）の把握：
- ・ 管理上の判断のための情報提供：
- ・ 社会的な側面：
- ・ 法律、規制からの要件に対する適合性確認：

【参考文献】

IAEA：The principles of Radioactive Waste Management, IAEA Safety Series No.111-F, (1995)

IAEA : Retrievability of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel. Proceedings of an International Seminar organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste in co-operation with the IAEA, Saltsjöbaden, Sweden, 24-27 October 1999. IAEA-TECDOC-1187 (2000)

EKRA : Disposal Concepts for Radioactive Waste: Final Report (2000)

NRC : One Step at a Time: The Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Waste (2003)

OECD/NEA : Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories - Its Development and Communication (1999)

OECD/NEA : STAKEHOLDER CONFIDENCE AND RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL, Inauguration, First Workshop and Meeting of the NEA Forum on Stakeholder Confidence in the Area of Radioactive Waste Management, Paris, France 28-31 August (2000)

表B-1 諸外国におけるモニタリング調査結果のまとめ(1/3)

調査項目		スウェーデン	フィンランド	フランス	スイス
地層処分における管理の考え方	基本的考え方	スウェーデンの処分場における管理の基本要件は次のとおりである。 処分場の長期安全性は、将来世代によるモニタリングやメンテナンスに依存すべきではない。しかしながら、廃棄物の処分あるいは閉鎖後のモニタリングが実施されないとは必ずしも言い切れない。処分場閉鎖は、将来の処分場の変更や廃棄体の回収に関する決定を妨げるものであってはならない。 廃棄体、処分システム及び処分サイトに関する知見は、合理的にかつ将来まで保存されるべきである。	STUKは、処分場における管理の考え方を「処分は、長期的安全性の保証のために処分サイトのモニタリングを必要とすることがないような形で、また、技術開発が望ましいオプションをもたらした場合には備え廃棄物キャニスタの回収可能性を維持するような形で、計画されなければならない」としている。	放射性廃棄物管理に関する法律では、「(処分の許認可は)段階毎に実施される。このため各段階のリバースビリティ要件が必要である。建設された構造物等は許認可の終了時に撤去されるものとする。条例において、リバースビリティの原則が導入されている。また、1992年法律で「異なる廃棄物施設の影響に関する研究も、サイトの修復条件並びにその他技術の導入が不可能な場合に用いるべき廃棄物回収技術の言及が必要である。」とし、リバースビリティの必要性が強調されている。なお、フランスにおけるリバースビリティとは事業の中止も含む、回収可能性よりも広い概念である。	スイスでは処分場における管理の考え方を「スイスでは、処分場の長期的安全性は閉鎖後モニタリングあるいは(制度的)管理なしで達成可能でなければならない」としている。 一方、EKRA報告書では、処分場の長期管理の目的として、「人間および環境の防護と将来世代、世代間の公平性あるいは社会的意決定プロセス」が挙げられている。
	地下試験施設	SKBは段階的な処分場開発に従い、先行処分場を考えている。これは地層処分場を2段階に分けて建設するもので、第1段階では全体の10%を定置し、当該期間で得られた知見について評価する。第1段階の知見で得られた評価結果が予想とおりであれば、第2段階の建設を開始する。	フィンランドで実証エリアの概念は見られず、少なくとも本調査で得た公開情報からは見受けられない。	フランスで実証エリアの概念は見られず、少なくとも本調査で得た情報からは見受けられない。	EKRA報告書の「長期監視付地層処分概念」ではメイン施設以外に、試験施設やパイロット施設の設置が報告されておりNagraもこの報告を受け、処分概念を検討する予定である。
	回収可能性	SKBが各段階のリバースビリティを検討している。 SKIは現在回収可能性要件を含む規制を策定中である。	現在、Posivaは回収可能性の計画策定プログラムを開始したところである。これには閉鎖前及び閉鎖後段階のモニタリングと回収可能性に関する方針が含まれる予定である(未公表)。なお、これまでのPosivaの見解では「回収可能性要件は現在の処分概念によって十分満足される」としていた。	上記の様にフランスでは回収可能性に関して法律で定められており、ANDRAも地層処分場におけるリバースビリティを実施可能にするためには、処分場の具体化、操業の各段階の把握、また化学、水理あるいは科学的処分場挙動を把握する事が重要であると考えている。また、「仮に処分場全体あるいは一部分が埋め戻されたとしても、最終的にリバースビリティが含まれていれば、何らこれを妨げるものではない。よって廃棄物容器の回収方法(例えば、廃棄物容器に含まれる放射能から、作業者を防護するための特殊なハンドリング技術等)は、処分概念の評価と同様に初期に特定する必要がある」としている。	スイスの指針では社会的な観点あるいは回収可能性に関して「廃棄物の回収あるいは処分場の監視及び管理目的で実施される如何なる計測も処分場本来のバリア機能の安全性を損なうものであってはならない」と記されている。これに対しEKRA報告書では「社会的な要件は、回収可能な処分場へ向かいつつある。これに対して、EKRAは処分と回収可能性の要素を併せ持つ、監視付長期地層処分概念を開発した」としている。
規制側からのモニタリング要請	SKIの基本要件: 高レベル廃棄物地層処分に関する基本要件は、処分場の長期安全性を将来世代によるモニタリング又はメンテナンスに依存してはならない。さらにモニタリングプログラムを実施することで、処分場の安全性能を脅かすことがあってはならない。	フィンランドの原子方法では、国(State)は放射性廃棄物管理のため、あるいは処分場の安全性を確保するための施策を要求する権限が与えられているが、一般的な安全要件によれば、長期的な安全性は処分場のモニタリングに何等依存することなく保証されなければならないため、もし、ある種の閉鎖後モニタリングが要請されたとしても、それは安全目的やキャニスタの再取出に係わる決定のためのものとはならない。	フランスでは規制側からのモニタリングに対する要請は見られず、(少なくとも本調査で得た情報からは見受けられない)。	スイスの指針ではモニタリングについて「異なる計測行為も安全性の担保になるべきではない。処分場は数年以内に封入(seal)することができるよう設計されなければならない」と記されている。これはEKRA報告書でも同内容である。	
モニタリングに対する取り組み(実施主体等)	モニタリング要件	SKBによるモニタリング目的 処分場開発及び操業あるいは閉鎖後の影響について特定及び評価するための季節変化を含めた現況の把握 処分場の安全評価の補完あるいはモデルや仮定の検証に資するシステム挙動の理解への促進 処分場からの環境への非放射線あるいは放射線影響の評価 建設及び操業期間における作業員の非放射線あるいは放射線学的な安全要件への適合確認 核不拡散に係る保障措置(セーフガード)要求への適合	PosivaのEIA報告書より、以下の要件が読み取れる。 処分場閉鎖前の現況の把握 処分場からの環境への放射線影響評価 一般の環境影響評価 核不拡散に係る保障措置	ANDRAではモニタリング要件として、「すべてのリバースビリティ期間及び各実施段階中に適合した地下環境でのモニタリングを特定することが必要である。特に地下環境、施設および廃棄物容器の変化について監視(monitor)する機器開発が必要である」とし、上記の「リバースビリティのためのモニタリング」が挙げられている。	Nagraは各段階でのモニタリング目的を次の様にしている。 処分場の設計および建設、並びに安全評価データの補完 規制要件との適合性の検証、作業員、一般公衆および自然環境に対する処分場の放射線および非放射線影響を把握するためのデータ収集 処分場の段階的なプロセスに関する、社会の意思決定への情報提供 保障措置要件への適合 将来世代の信頼感を保持
	計画	規制側からの具体的な課題等はない。また、SKBもサイト特性調査段階以降の具体的な計画はない。	環境影響のフォローアップ(環境監視:モニタリング)提案書が準備され、その実施段階は閉鎖前後で二区分されている。Posivaは閉鎖後のフォローアップが実施される場合には、地表及び地下試験坑内での放射線計測、試験坑内の地下水位、地下水流、地下水化学等の計測あるいは地表での微小地震観測の実施を提案している。	リバースビリティに係るモニタリング目的を達成するため、ANDRAは以下の計測を想定している。 処分坑及び坑道の構成要素の変化に関する観察及び計測 処分された廃棄物容器の周辺環境の計測 処分場挙動が予測と一致することを立証するための処分場環境の計測	Nagraは、処分場におけるモニタリング目的を設定しているが、規制側から長期モニタリングに関する要請はない。ため、処分場の各段階でどのようなパラメータをモニタリングするのか、計測のためのどのような技術を用いるのか、どのような性能基準や許容基準が必要なのか、モニタリング結果を最終検証、介入あるいは回収に関する意思決定のためにどのように使用するのか、といった詳細について論じた公式見解は見受けられない。
	項目選定要件	SKBによる項目選定要件は以下のとおりである。 計測機器の校正及び管理が可能かどうか 予測値の設定が不確かさの範囲内で可能かどうか 予想範囲外であった場合の行為を予測しているかどうか		ANDRAでは「全てのリバースビリティ期間及び各実施段階中に適合した地下環境でのモニタリングを特定することが必要である。特に地下環境、施設および廃棄物容器の変化について監視する機器開発が必要である」としている。	

表 B-1 諸外国におけるモニタリング調査結果のまとめ(2/3)

調査項目		ベルギー	スペイン	イギリス
地層処分における設備の考え方	基本的な考え方	NIRAS/ONDRAF による地層処分概念は「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システム」として開発されている。しかし、回収可能性が必要と判断された場合でも現在の処分概念であれば、技術的な問題はなく、さらにその場合には、処分場のモニタリングが不可欠な要素と考えられている。	スペインの深地層処分概念の基本となっているのは、現在のところ、回収を考慮しない放射性廃棄物の最終処分であり、規制側からの回収可能性に関する公式見解は見られない。	英国環境省による指針(1997)には、放射性廃棄物処分を認可するために満たすべき要件として、下記の4基本原則が規定されている。 第1原則：管理に依存しない安全性 第2原則：将来における影響 第3原則：最適化 (optimization) 第4原則：放射線リスク基準 第1原則の実務的解釈として、閉鎖後の処分システムによる閉じ込め性が、将来世代の継続的な安全についてモニタリング・監視・予防的・修繕的行動に依存しないことを示すまで、処分許可は規制者から与えられない。
	地下設備施設	ベルギーでは実証エリアの概念は見られない(少なくとも本調査で得た情報からは見受けられない)。	スペインでは実証エリアの概念は見られない(少なくとも本調査で得た情報からは見受けられない)。	イギリスでは処分場開発のどの段階で実証エリアが必要かどうか確立されていない。
	回収可能性	現在、ベルギーでは、HLW 及び使用済燃料等の回収可能性に関する法規制や許可要件はないが、LLW に関しては内閣決定が公式に示されており、将来 HLW あるいは使用済燃料処分に関しても同要件が適用される可能性はある。また NIRAS/ONDRAF は回収可能性の目的を次の様に定義している。 汚染源のレベル、あるいは想定外の擾乱の発生に関する意思介入を含めた、将来世代の環境保護に関する権利を確保するため 使用済燃料を資源利用する場合のアクセス方法確保のため	上記の側に規制側では回収可能性を考慮していないが、ENRESA の HLW/LLW 処分施設では、回収可能性は許容要件とされており、HLW の深地層処分に対しても回収可能性が要求される可能性がある。現在、ENRESA は深地層処分の段階的プロセスに対する社会受容性の観点から、処分場のリスクと安全性にとっての回収可能性の意義を研究することを決定している。また ENRESA は回収理由として以下の3点を挙げている。 分離変換等の新規技術の開発 エネルギー (U、Pu) の再利用 処分場の安全要件が十分でないことが判明した場合	Nirex は、アーチ型地下空間 (vault) を埋め戻し処分場を密閉した後に、埋め戻し材を取り除き、容器へ到達する必要が生じる可能性があると考え、これが可能なことを示すために実証的検証を行ってきた。原寸大の廃棄物容器を埋めた処分場からウォータージェットとロボットアームによって取り除いた。
規制側からのモニタリング要請	長期モニタリングに関する法令は整備されていないため、処分場の各段階でのモニタリング項目、計測技術、性能基準や許容基準及び、最終閉鎖、介入あるいは回収に関する意思決定どのようにモニタリング結果を反映するかは未決定である(少なくとも本調査で得た情報からは見受けられない)。	(少なくとも本調査で得た情報からは見受けられない)。	基本原則に加えて、指針では11の付加的要件が示されている。その一つがモニタリングに関するものであり、「安全な状況を維持するために、開発者は施設建設及び廃棄物配置に起因する変化をモニタリングする計画を実行しなければならない」と規定されている。	
モニタリングに関する取組(実施主体等)	モニタリング要件	NIRAS/ONDRAF による地層処分概念は「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システム」として開発されている。しかし社会受容性の観点から回収可能性が必要とされ処分開発に採り入れられれば、処分場の長期モニタリング目的となる。この場合の計測の目的は次のとおりとなっている。 計測値と予測値との比較によるモデル・データの確認 比較の結果、両者の一致が良好であれば性能評価のコンフィデンス・ビルディングの一助	スペインにおけるモニタリングの必要性は、以下に示すとおりであると考えられている。 処分場のリスク・建設及び長期安全性評価に使用する知見(現状把握を含む)の提供 作業員、公衆及び環境に対する影響評価する知見の提供 核不拡散に関する保障措置の要件 回収可能性に係るデータ提供及びシステム性能が期待通りであることの実証等による社会的な意思決定プロセス支援	英国環境省による指針(1997)は以下のモニタリングに係る指針を示している。 安全な状況を維持するために、廃棄物配置及び施設建設に起因する変化をモニタリングしなければならない。 サイト及び設備をモニタリングする合理的な方法及び実証計画を確立しなければならない。 モニタリング手間は、設備の長期的安全性を低下させてはならない。 ベースラインを得るために、調査及び建設前の段階にモニタリングを開始する必要がある。また、建設と廃棄物設置の結果生じる挙動変化及び安全性に関連する地質学的、物理化学的パラメータを測定する必要がある。 放射線モニタリングを実施し、放射線量の遵守及び公衆の放射線学的防護基準の証拠を示す。 第1原則に基づき、管理終了後における施設安全性の確保はモニタリングや監視に依存してはならない。モニタリングは、主に公衆への再保証のために実施される。
	計画	NIRAS/ONDRAF が規定しているモニタリングは次のとおりである。 操業中や搬送ギャラリの閉鎖前におけるニアフィールドのモニタリング 閉鎖後段階におけるファーフールドのモニタリング	現状ではモニタリングに関する具体的な規制は実施されていないが、将来のモニタリング戦略の策定は、スペインで現在進行中の反復プロセス (iterative process) の主要段階となり、モニタリングが放射性廃棄物の深地層処分が行われる際、実施されるだろうと予想される。	英国には現在モニタリングに係る計画はない。
	項目選定要件	長期モニタリングに関する法令は整備されていないため、処分場の各段階でのモニタリング項目、計測技術は未決定である(少なくとも本調査で得た情報からは見受けられない)。		

表 B-1 諸外国におけるモニタリング調査結果のまとめ(3/3)

調査項目		ドイツ	米国 (YMP)	米国 (WIPP)	カナダ
地層処分における管理の考え方	基本的な考え方	DBE のモニタリングの考え方としては、地層処分の安全性はモニタリングに依存してはならないという IAEA が示した原則を基本としている。政府からは具体的にモニタリング項目は指定されず、規制に適合していることを示すことが求められる。そのため、DBE はモニタリングについて、規制への適合を示し、許認可を得るための手段の一つとしてとらえている。そして、許認可を得た後も、処分場の状態が予め予測されたものとなっていることを示し、それによりシステムの安全性に係る信頼性を高めるための手段としてモニタリングを用いている。	YMP では、規制期間及びそれ以後の長期的な処分場の挙動について予測する総合システム性能評価の計算結果を基に、処分の認可及び作業を行うこととしている。性能評価にデータを提供するために事業の最終段階で性能評価プログラムを実施する。また、核廃棄物政策等により作業開始から 50 年間は、回収可能性を維持することが定められている。 全米科学アカデミーの付属ボードは、DOE に YMP の処分場プログラムを「適応性の高い、革新的な取り組み」とするべきとの勧告を行った (2003 年)。	WIPP では事業者の DOE が規制 EPA に 5 年ごとに適合証明申請書を提出することが義務付けられており、その手続きを通じて適切な処分の遂行及び処分システムの安全性を確認することとしている。また、40CFR Part 191 により再取出しの可能性が排除されない、処分システムであることが定められている。	カナダでは、全事業期間を通じて一般の参加とモニタリングが連続して実施され、それらを通じて形成された社会的合意の下に各段階が進められることになる。特に閉鎖前後に延長モニタリング期間を設け最終段階に対する住民合意に資することとしている。
	地下試験施設	ドイツでは実証エリアの概念は見られない (少なくとも本調査で得た情報からは見受けられない)。	米国 (YMP) で実証エリアに関する明確な概念は見られない (少なくとも本調査で得た情報からは見受けられない)。ただし、YMP では処分場のサイト選定、認可、建設、操業、モニタリングの最終段階で性能評価プログラムが計画されており、本施設中で処分に関する実証も実施されることになっている。	米国 (WIPP) では処分場の一部が地下研究所として利用されている。該当エリアでは、サイト選定段階における地質調査に加え、岩盤挙動のモニタリング、回収性の確認等の実証も実施されており、その意味で実証エリアの役割も果たしている。	カナダにおける正式な実証エリアに対する概念は公表されていない。しかし AECL は、実証エリア内に 1 個又は 2 個以上の実証用廃棄物容器を置き、その周辺エリアである緩衝材、埋戻し材及び岩盤に適切なモニタリングシステムを設置し、閉鎖段階までモニタリングを継続、また廃棄物容器の再取出しを行うこと等を考えられている。
	回収可能性	ドイツでは、放射性廃棄物の最終処分はこれまで、維持管理の要らない (maintenance-free)、安全で最終的な廃棄物の除去と定義されてきたため、回収の予定は一切なかった。放射性廃棄物処分のこの定義に従って、ドイツでは処分場からの放射性廃棄物回収可能性の基準はない。しかし、新たな国際的な検討状況に従って、深地層へ処分された放射性廃棄物の回収可能性の考慮は、現在ドイツ連邦で再検討 (review) 中である。	本調査で得た公開情報では、回収性の証明に関する情報は得られなかった。ただし、性能評価プログラムの中に、坑道内に設置されていた廃棄体の材料劣化を確認するプログラムが計画されており、そのプログラムの中で廃棄体の回収性が証明されるのではないかと推測される。	WIPP では 1992 年に再取出しの実証が行われた。すべての再取出し作業は、遠隔制御装置を使用して実施された。	具体的な回収可能性の証明方法は未検討である。しかし、AECL では机上検討により現状技術を駆使することで回収の実現性を示している。
規制側からのモニタリング要請	モニタリング項目を具体的に定めた法律はない。	10CFR Part60 (高レベル放射性廃棄物処分場に関する行政命令) 及び 10CFR Part63 (ユッカマウンテンサイトを対象とした行政命令) により、規制上最低限必要なモニタリング項目が提示されている。	40CFR Part 191 (高レベル TRU に関する行政命令) 及び 40CFR Part 194 (WIPP を対象とした連邦規制) により、規制上最低限必要なモニタリング項目が提示されている。	R-104 (放射性廃棄物の処分に対する規制の目的、要求事項、指針) により規制要件が示されている。	
モニタリングに対する取り組み (実施主体)	モニタリング要件	DBE は、モニタリングについて、一つには、物事の状態を記録すること、もう一つは、記録結果を評価基準との比較することからなっている。記録は主に異なったタイプの測定及び調査によって実施される。評価基準は、限度または作業条件として定義され、代表的モデル計算から導かれる。モニタリング手順の目標は、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。	YMP でのモニタリングは 24 の性能評価プログラム (2001 年 2 月時点) の中で実施されることになっており、処分場の性能、建設、操業に関する工学的技術の実証や確認を目的としている。	WIPP でのモニタリングの目的は以下の通り。 ・ 州規制、公定、連邦規制、健康及び安全からの要求及び準拠を満足することの確認 ・ サイト選別に使用される特性値の提供 ・ 基準状態を示すデータの提供 ・ 性能評価 (Performance Assessments : PA)、及び予測の確認 ・ 不確実性の低減のためのデータの提供	カナダにおけるモニタリングの目的を以下に示す。 ・ 現状の把握 ・ 法律、規制からの要件への適合性の判断 ・ 処分システム及び要素の性能 ・ 機能の評価、設計上の反定の確認 ・ 要素 (天然バリア、人工バリア、設備、廃棄体等) とプロセス (建設・操業方法等) についての理解度、信頼性の構築 ・ 性能評価モデルの予測の確認 ・ 事業向上のための理解とフィードバックの供給 ・ 修復の必要性の決定及びその効果の予測 ・ 意思決定のための情報と理解の提供 ・ 公衆の信頼の構築
	計画	DBE は論山法令や規制当局による安全規則等の要件を満たすようなモニタリング項目を検討している。	YMP では処分場性能に係る 24 の性能評価プログラムが計画されており、サイト選定段階にある現時点で 2,3 のプログラムが開始されている。今後、詳細検討の後に順次開始されることになっている。	適合証明申請において適合モニタリング・パラメータとして閉鎖前 10 項目、閉鎖後 5 項目を策定し、モニタリングを行っている。	将来実施されるべきモニタリング・プログラムとして下記のモニタリングが考えられている。 ・ 現況モニタリング：特定地点での現況をプロジェクト/種加により乱れが生じる前の段階から測定すること ・ 準拠モニタリング：処分プロジェクトによる作用が規制要件及び性能基準を満足していることの確認 ・ 性能モニタリング：設計想定事項の検証、処分プロセスの理解を構築及び性能評価モデルの検証
	項目選定要件		現在、DOE は「試験・分析評価計画」という採掘試験・モニタリングに関する詳細検討書を作成中である。その草案によれば、法規制での要件、処分性能の確認の必要性をベースとし、測定可能性や不確実性等を考慮しながらモニタリング項目を選定することを検討しているようである。	WIPP では適合証明申請においてモニタリング項目の選定を実施した。モニタリング項目は、FEP、法規制での要件をベースに感度解析、時間的変動性、不確実性、計測可能性等を考慮して選定された。	具体的なモニタリング項目選定方法は未検討である。

添付資料 - C モニタリングに関するワークショップの記録

本資料は、原環センターが主催し平成 14 年 2 月 18 日に開催したワークショップ “Workshop on Monitoring of geological repositories for HLW (The present status, framework and issue of monitoring project)” の記録に基づき、主要なポイントを要約したものである。

C - 1 ワークショップの概要

開催日時：平成 14 年 2 月 18 日

開催場所：虎ノ門パストラル（東京都港区虎ノ門 4 - 1 - 1）

開催目的：モニタリングに関する原環センターの研究に対するレビュー及び情報交換

参加者（敬称略）：次のとおり、役職等は開催当時のもの

主査

田中 知 東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻

委員

石黒 勝彦 核燃料サイクル開発機構 東海事業所

佐々木 泰 日本原燃株式会社

高田 進 (財)電力中央研究所

三谷 泰浩 九州大学大学院工学研究院デザイン部門

アドバイザー

渋谷 朝紀 経済産業省 資源エネルギー庁 原子力政策課放射性廃棄物対策室

沼田 博男 経済産業省 資源エネルギー庁 原子力政策課放射性廃棄物対策室

玉手 和彦 経済産業省 資源エネルギー庁 原子力政策課放射性廃棄物対策室

赤坂 秀成 原子力発電環境整備機構

竹内 光男 原子力発電環境整備機構

宮原 要 核燃料サイクル開発機構 経営企画本部

招聘者

Ferruccio Gera Via Monte dell'Ara 18, 00060 Formello, Rome, Italy

Daniel B. Bullen Iowa State University

Michael J. Apted Monitor Scientific LLC

Richard L. Beauheim Sandia National Laboratories

Eric Webb Sandia National Laboratories

Cecelia Williams Sandia National Laboratories

事務局

坪谷 隆夫 (財)原子力環境整備促進・資金管理センター

大内 仁 (財)原子力環境整備促進・資金管理センター

藤原 愛 (財)原子力環境整備促進・資金管理センター

高尾 肇 (財)原子力環境整備促進・資金管理センター

杉山 和稔 (財)原子力環境整備促進・資金管理センター

加藤 修 (財)原子力環境整備促進・資金管理センター

オブザーバー

池田 孝夫 日揮株式会社

棕木 敦 日揮株式会社

石黒 純一 日揮株式会社

杉山 武 日揮株式会社

齋藤 茂幸 三菱マテリアル株式会社

佐々木 良一 三菱マテリアル株式会社

山口 耕平 三菱マテリアル株式会社

古市 光昭 鹿島建設株式会社

奥津 一夫 鹿島建設株式会社

升元 一彦 鹿島建設株式会社

高村 尚 鹿島建設株式会社

雨宮 清 ハザマ

鬼頭 孝通 株式会社 三菱総合研究所

田久保 善彦 株式会社 三菱総合研究所

中山 紀夫 産業技術総合研究所

蛭沢 重信 (財)エネルギー総合工学研究所

中村 雅英 (財)エネルギー総合工学研究所

吉添 誠 三菱商事株式会社

杉田 健一郎 三菱商事株式会社

このワークショップでは、地層処分のモニタリングについて、以下の発表と議論が行われた。

原環センターの研究説明

IAEAの技術文書 (IAEA-TECDOC-1208^(*)) におけるモニタリングの位置付け
ユッカマウンテンプロジェクト (YMP) におけるモニタリング
廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) におけるモニタリング
討論及びまとめ

(*) IAEA (2001)

上記のうち および の主要なポイントを以下に要約する。

C - 2 IAEA の技術文書におけるモニタリングの位置付け

IAEA の技術文書 (TECDOC-1208) の編集者であった Ferruccio Gera 氏による講演及び質疑応答の主要なポイントは次の通りである。

まず、IAEA による技術文書は、地層処分場の開発が段階的に進められることを前提として記述されていることが説明された。その前提においては、ひとつの段階から次の段階に進むまでに意思決定が必要であり、そのときに最も重要なのは合理的にその問題が理解されていることである。意思決定を行うのが規制当局だとすれば、その当局は安全性を確認しなければならず、そのセーフティー・ケースはデータベースに基づいたものとなる。モニタリングは複数の目的を持つが、長期的な主要な目的はセーフティー・ケースを主張することであり、不確実性を乗り越えて安全性の主張が出来るほどロバストな議論が必要であることが説明された。

IAEA の技術文書では、モニタリングの目的として以下の5項目を示した。

モニタリングの目的 (IAEA-TECDOC-1208)

処分場の建設、操業および閉鎖の段階的計画において管理上の決定を行うための情報を提供する。
処分場のセーフティー・ケースを開発する際に用いるシステム挙動のある側面の解明を進め、そのような側面を予測するモデルをさらに試験できるようにする。
処分場開発計画の主要段階でなされる各種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、社会が求める限り、処分場が人間の健康や環境に不都合な影響を与えないという確信を強める。
将来の意思決定に参考となるような処分場サイトおよびその周辺に関する環境データベースを蓄積する。
使用済燃料またはプルトニウムを多く含む廃棄物が処分される場合、原子力安全保障を維持するための要件に対応する。

上記の目的及び関連する現象の詳細検討の結果に基づいて、モニタリングを行う可能性のあるパラメータが次の6種類に大別された。

- ・ 処分場構造物の劣化
- ・ 廃棄物パッケージとそれに関連する緩衝材の挙動
- ・ 使用材料、地下水および母岩のニアフィールドでの化学的相互作用
- ・ 周辺の地圏に対する化学的、物理的变化
- ・ 環境データベースの蓄積
- ・ 原子力安全保障

(IAEA-TECDOC-1208)

モニタリング全般の考慮事項として、以下の内容が強調された。

- ・ 合理的に判断を下すためには、コスト効果分析が必要である。すなわちモニタリングを実施する事でどういうメリットとデメリットがあるかを理解しておく必要がある。特に計器による侵入のデメリットは、長期的な安全性も含めて十分理解しておく必要がある。
- ・ 一旦「セーフティー・ケース」が受け入れられれば追加のモニタリングは不要であるという考え方もある。
- ・ ニアフィールドのモニタリングは処分場の性能を劣化させる恐れがあるため、ひとつの解決策として試験施設の利用が考えられる。そこにおいても自信が持てる程度の測定を実際に行い、意思決定にかかわる、異なる利害関係者の人たちにも確信が持てる程度にまで測定を行い、典型的な処分場の条件下ではこういう挙動になるであろうと理解できる程度に測定を行う。

最後に、モニタリングに関わる倫理的側面として以下の提起があった。

- ・ 将来世代にモニタリングの負担を残すのであれば、将来世代がきちんとモニタリングをするだけのリソースを用意しておくべきであり、それを保証する何らかのメカニズムを考える必要があるという議論がある。
- ・ ただし、将来世代がどのような決定を下すかを現時点で予測することは不可能である。したがって、上記のようなメカニズムを考えるベースが不確定である。
- ・ 国際的なレベルで議論は必要であるが、結局は国単位で決定が下されることになる。この時、すべての利害関係者が関与して、これが「学習プロセス」であることを理解して進めることが重要である。
- ・ そのようにして今日何らかの決定を下したとしても、将来世代にはそのままは適用されないかもしれないことを認識しておく必要がある。

なお、本ワークショップに先立ち、IAEAの技術文書に関する質問に対する回答書が Ferruccio Gera 氏により準備された。ワークショップ当日には十分説明されなかった部分で閉鎖後のモニタリングに関

する内容を以下に記す。

回収可能性に関して：回収可能性の内容には大きく2つのオプションがあり、ひとつは人工バリアの定置を遅らせることにより長い期間廃棄物を容易にアクセス可能な状態に保っておくというものであり、他方はバリアは定置するがそれらは確実に元に戻すことができる状態であるというものである。

閉鎖後モニタリングに関して：地層処分場で処分される大部分の放射性廃棄物に絡む危険の存続期間に鑑みて、処分システムについては、要求される安全レベルの受動的な実現が合理的に保証されなければならないとの見解で広く一致している。これは、処分場閉鎖後の安全性は、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を意味する。従来からの知見によると、十分な安全性は、適切な特性を持つサイトおよび母岩を選定し、要求されるレベルの廃棄物隔離を保証するよう期待される多重バリア・システムが十分に堅牢かつ信頼性の高いものであることを確認することによって達成することができる。それにもかかわらず、長寿命放射性廃棄物のための地層処分場の建設に必要な許認可の取得において多くの国の廃棄物管理プログラムが直面している困難は、提案されている手法（すなわち、処分場閉鎖後は当該処分場を放棄し、多重バリア隔離システムの効果に完全に依存すること）の健全性に完全に満足していない社会のセクタが存在することを物語っている。その上、保障措置体制の外に置くことができない物質を保有する処分場の管理およびモニタリングの継続を正当化する特定の理由もある。このような考えから柔軟な手法を提案することとなった。それらは以下のとおりまとめることができる。

- ・ 長寿命放射性廃棄物地層処分場の長期的安全性は、モニタリングを含む閉鎖後の制度的管理に（科学的小および技術的な見地からも）依存しないセーフティー・ケースによって保証される必要があるものの、処分場閉鎖後のモニタリングの継続を選択することで、意思決定が容易になり、社会の懸念が幾らか低減するのであれば、ある特定の国が処分場閉鎖後のモニタリングの継続を計画するのを否定する理由はない。
- ・ このような閉鎖後の活動を行う期間は、それらの活動が安全要件によるものではないことから、先天的事項（アプリオリ）として確立することはできず、将来の世代による再評価および意思決定に依存する点を指摘しておくことが肝要である。
- ・ しかし、いかなる閉鎖後の活動も、処分システムの安全性を低減することのないように計画され、かつ実施されることが必要不可欠である。

C - 3 討論及びまとめ

議論は Michael J. Apted 博士のイニシアチブにより進められた。主要な論点について以下に記述する。

まず、モニタリングの定義について意見が交わされた。IAEA-TECDOC-1208 による定義「処分システムの構成要素の挙動または処分場とその操業が環境に及ぼす影響を評価するうえで役立つような工学環境または放射線に関するパラメータの継続的もしくは定期的観測及び測定」に対し、人間活動のモニタリングを含めるべきであるとの意見が Beauheim 博士より示された。

次に、混乱されがちな用語である「Variability」と「Uncertainty」、及び、「Reversibility」と「Retrievability」について、以下のように区別すべきことが提案された。

Variability（ばらつき、あるいは変動性）：地層処分システムの特性及び状態の自然の変動。システム固有の特性。たとえば、地下水位の年変化、長期の地殻運動などベースラインの挙動等が該当する。

Uncertainty（不確かさ）：我々の知識や測定能力の限界による不確かさ。測定の不確かさ、概念モ

デルの不確実性、シナリオの不確実性等がある。

Reversibility (可逆性)：処分の各段階のどの時点においても完全に可逆である（元に戻すことができる）ようなアプローチ。処分場の閉鎖中における廃棄体の回収（Retrieval）を含む。

Retrievability：可逆性の一部であって、廃棄体を地表まで回収する（恒久閉鎖時まで）ことができること。

Apted 博士は、retrievability は歴史的には米国では 1970 年代末から導入された概念と考えられる。最近になって、より広義に捉えようという議論の中で reversibility という概念が出てきたことを紹介した。これに関し Gera 氏は IAEA での経緯を次のように紹介した。Reversibility はフランスの代表によって提案され、議論を経て一般的な文言として決定された。背景のひとつには、retrievability を処分場の埋め戻しをせず開放しておくことに求めようとする大きな困難が生じると大方の人が考えていた。そこでいくつかのオプションに門戸を開こうということで提示されたのが reversibility である。そのときのスウェーデンからの発言は、ロバストな廃棄体パッケージであれば埋め戻しをしても何千年にもわたって健全性が確保できるので、この処分概念でも当初計画した通りに操業を進めることができるというものであった。

次にモニタリングに関する議論では、関連する用語の相互関係を整理するために図 C-1 が Apted 博士により示され次のような説明が加えられた。本図は Yucca Mountain の「性能確認」を参考に一部の活動を取り上げて図式化したものである。性能確認はそのかなりの部分がモニタリングに関係している。またかなりの部分がサイト特性調査という当初の取り組みにも関係している。性能確認はそれ以外にも研究室での試験に関連する部分がある。さらに岩盤圧力の測定のように実際の処分場の現場でも検討しなければならない部分、機器の試験、回収技術とも関連している。本図にはそれら全てではなくその一部を示している。このように性能確認はこれらの境界を越えて収集提供される必要がある。また、性能確認はサイトごとに、コンセプトごとに、及び母岩ごとに固有の特性を持っている。いずれにしても品質管理はあらゆる部分に該当する。たとえばプログラム全てを通じて文書化しておく必要があり、決定内容を追跡管理できるようにしておかなければならない。

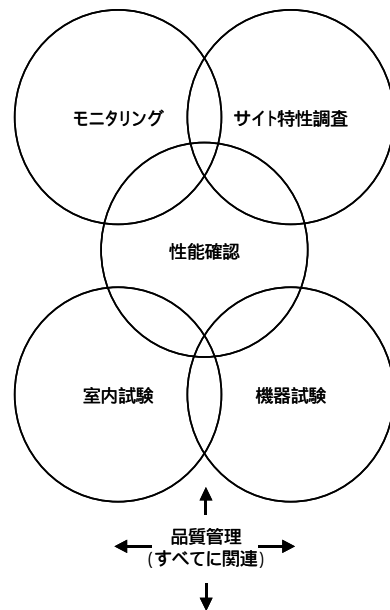


図 C-1 関連する用語の相互関係

Apted博士はワークショップの関係者から出されたコメントを整理し、ディスカッションポイントとして説明を続けた。なぜモニタリングをするのかという質問がまずある。これは具体的に考える必要がある。モニタリングには数多くの異なった目的が反映されるかもしれない。そのような目的は経時的に処分場の寿命の間変化をとげて行くかもしれない。一般的に段階的なプロセスをとるといふことの決定の裏づけをするためにモニタリングを行う。米国の場合には規制上の要件としてモニタリングが必要となっている。規制当局だけではなくて独立のピアレビュー・グループが社会にはあるので、彼らに対してもいかに我々のやっていることが安全か、評価状況を提示する必要がある。さらに世論に対しても安全を保障し、世論に受け入れられるようにするためにもモニタリングは必要である。今回の直接のテーマではなかったが、作業員の安全性確保、環境に対する stewardship、保障措置のためにもモニタリングは実施される。何をモニタリングするのか：当然ながら測定可能なパラメータでなければならない。いつモニタリングを行うのか：ベースラインは早い段階から開始する必要がある。どれだけ良いレベルで調べるか：どういうTrigger levelで正常ではないと決めるのか、どの値からアクションをとるのか、予測と実測値が違っていた場合にどうするのかという問題に関係する。どうやってモニタリングをするのか：過酷な環境で長期間維持できるシステムが必要である。そしてApted博士は航空宇宙部門で使われている戦略が役に立つかもしれないと述べた。

Apted 博士はモニタリングの目的が地層処分事業のどの段階にかかわっているかを示す表を提示し、議論を進めた（表 C-2）。

表 C-2 処分段階とモニタリング目的

モニタリングの目的	立地段階	操業段階	閉鎖段階	閉鎖後段階
決定の支援	該当する	該当する	該当する	該当しない (閉鎖認可手続き後はモニタリングや制度的管理は不要)
立地の確認	該当する (ベースライン)	該当する (広範囲)	該当する (長期間)	該当しない ?
人工バリアの確認	該当しない	該当する (廃棄体 - 廃棄体) (廃棄体 - 母岩)	該当する (長期間)	該当しない ?
保障措置	該当しない	該当する	該当する	該当する (遠隔監視)
社会受容性	該当する (特性調査を認めても候補地住民は安全か?)	該当する (サイト/構想が納得できない時、候補地住民は計画を撤回できるか?)	該当する (モニタリングで安全性に関する前提条件やモデルの妥当性が確認できるか?)	該当する (社会が望むかぎり長期にわたって地上の監視装置を維持: Stewardship)
規制機関/技術者によるピアレビュー	該当する	該当する	該当する (ロバストシナリオ)	該当しない ?
各段階の最適化	該当する (サイト特性調査)	該当する (処分場設計) (人工バリア設計)	該当しない	該当しない

本議論においては参加者から以下のような意見が交わされた。

- ・ 柔軟性の維持は重要であるが、米国の例ではマイナスの側面もある。
- ・ 安全評価、性能評価だけで信頼性を追求するのは限界があり、ナチュラルアナログやモニタリングの助けも借りて信頼性を高め、不確実性を減らしてゆくところに意義があると感じた。
- ・ 信頼性に関しては、表の下から2番目にあるように、規制当局だけでなく技術者間のピアレビューも受けることになる。彼らはかなり難しい質問をするであろうが、そのようなときモニタリングは必ず役に立つものと思われる。
- ・ 許認可申請前のモニタリングと操業開始後のモニタリングは区別されるべきではないか。初期段階では情報を収集し、ベースラインを理解し、システムを理解し、セーフティー・ケースを積み上げて行く。その段階ではモニタリングでかなりの情報を提供できる。一方操業が始まった後はいかに一般公衆との信頼関係を維持するかが問題となる。それはどれだけ情報を開示できるかによってくると思われる。その情報が予想通りでなかった場合でも、そうした情報をいかに開示できるか。収集した情報に対してどのように対処してゆくかということも関連事項である。
- ・ 人工バリアシステムの確認ということでは、例えば廃棄体と岩盤の相互作用のような、研究室では検知出来ないものも理解できるというモニタリングのメリットがある。長期的なモニタリングではベースラインの挙動を理解できるというメリットがある。

- ・ パブリックアクセプタンスの中でモニタリングは有効である。飲料水への影響、ローカルな安全性、閉鎖後管理等、どうかたちでモニタリングするのかを説明できる。人々の質問に答えることが出来る。
- ・ 地震、海面変化、気候変化といったシナリオ検討に対しても、モニタリングは技術的なベースとして情報を提供することが出来る。
- ・ モニタリングの付加価値的な意義かもしれないが、処分システムの最適化、コストのかからない設計及び処分方法への変更といったことも考えられる。
- ・ モニタリング結果の信頼性には限界がある。予測値に合わない実測値が出たとき、セーフティ・ケースの中でこのようなことが特に重要性を持たないことがわかっていれば、その項目は単に付加的に測定するものと指定しておく。特定の測定項目を選ぶときに、その有効性、根拠を指定しておくことが必要である。
- ・ 実測値と、このデータを理解するための解釈ツールの関連性を忘れてはいけない。
- ・ 制度には寿命があり、それによってモニタリング期間は決まる。ただし、制度がいつまで継続するかは今答えはない。
- ・ 処分場の閉鎖を承認する際には、学術的な見地からは制度的管理とモニタリングを継続する必要はない。しかし、社会の要求がある。それに加えて保障措置の要件がある。

上記の議論の後、Apted 博士はワークショップのまとめとして、また原環センターの研究に対する示唆を含めて、モニタリングの社会的な側面と技術的な側面について発言した。

社会的側面：立地の候補地では、安全であることや将来世代、特に子供や孫などが守られていることを確認したいわけで、一般の人たちに語りかける際にモニタリングは重要である。また、一般の人たちが何を心配しているか、どういう動機付けがあるのか、どのようにすれば一般の人たちが確信を持つことができるのかを知るために、フォーカスグループは有効である。原環センターはそのような社会的側面に関する過去の事例を学ぶために、諸外国の調査を実施している。

技術的側面：モニタリングの計画、計画や政策は処分場の概念（サイト、設計）に依存するであろう。例えば、母岩の種類、人工バリアの設計、安全に関する重要なプロセス、サイト固有の要因（活断層の有無、海洋との関係等）などが影響する。

また、多くの参加者が発言したように、ベースラインは重要である。ベースラインを測定することにより、選定されたサイトが適切であったことを確認し、地下開発による擾乱の把握、モデル予測値と測定値の比較、周囲への影響度合いなどを確認することができる。今回とくに議論にならなかったが、地震活動が活発であることから地質工学的な側面のモニタリングは欠かすことができないのではないだろう

うか。高い放射線場や高温の場が存在することによる勾配の問題が生じるため、これによって何をモニタリングすべきかを検討する必要がある。この点日本の場合は WIPP に比べて難しい状況のように思われる。さらに、モニタリングは性能評価のモデリングとそれに関する研究開発とのリンクが重要である。性能評価の予測からずれてしまうパラメータは何か、ずれの度合いと経時的な変化はどうか、安全性にとって重要なパラメータは何か、システム最適化のための現実的なモデルにしてゆくことができるか等について考慮する必要がある。

上記の説明のうち最後の項目に関して参加者から次のような質問があった。すなわち性能評価とモニタリングをリンクさせることが、全体的な性能評価の中で意味のあることなのかということである。この質問に関し、Bullen 博士はユッカマウンテンの経験から次のように説明した。当初の調査ではサイト特性を十分に理解できなかったことから廃棄体の適切なデザインを行うことができず、それがコスト評価にも影響した。これは米国の教訓であるが、モニタリングを性能評価にリンクすることによりそのサイトを理解することができれば、即刻それをデザインに取り入れることも重要である。コストの見積にしても現実的に対応できる。

添付資料 - D セーフティー・ケースとそれにおけるモニタリングの位置付け

(本添付資料は、平成 13 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査 報告書
- モニタリング機器技術高度化調査 - (その 1) からの抜粋である)

セーフティー・ケース(Safety case)は、近年、高レベル放射性廃棄物処分の安全性を取り扱う中で議論が進められてきたものであり、従来の安全評価の枠組みでは対応が難しい処分技術についての非専門家(政策立案者でもある人々をも含む)や一般公衆により良く理解してもらうための、安全を伝え、確信を得るためのより大きな枠組みである(例えば、「Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories – Its Development and Communication – (OECD/NEA, 1999)」)。また、我が国においても議論が公に開始されたところである(例えば、「廃分第 6-3 号資料(第 6 回、H14.2.6)(原子力安全委員会原子力総合専門部会放射性廃棄物分科会, 2002)」)。このセーフティー・ケースの枠組みの中でモニタリングの位置付けが議論されることは、モニタリングについての様々な議論の基礎として重要と考えられる。以下に、セーフティー・ケースの定義とそれにおけるモニタリングの位置付けを取りまとめることとする。

D - 1 セーフティー・ケースの定義

セーフティー・ケースの定義ないし内容について、以下に 3 例を提示する。

Michel J. Apted 博士による提示(2002 年 2 月 18 日に開催された RWMC による monitoring workshop において)

処分場システムの安全性が安全基準を適切に満たしており、そして合理的に保証されるものであることを示す一揃いの様々な議論と種々の証明(例えば、ナチュラルアナログ)

原子力安全委員会原子力総合専門部会放射性廃棄物分科会(第 6 回、H14.2.6)廃分第 6-3 号資料で引用されている内容及びその原文表現

「地層処分における長期安全性への信頼 - その展開とコミュニケーション」(Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories – Its Development and Communication – (OECD/NEA, 1999))では、「セーフティー・ケースとは、処分場のある特定の開発段階において、処分場が長期にわたって安全であるということを支持する論拠を集めたものである。セーフティー・ケースは、安全評価の結論やそうした結論に対する技術的な信頼性の表明などで構成されている。未解決の問題があることと、そうした論拠が、将

来の開発段階でこうした問題を解決するための作業の指針となるということを示す必要がある。」

なお、廃分第 6-3 号資料では、「様々な観点からの論理構築(multiple lines of reasoning) (OECD/NEA, 1999)」において用いられる安全評価のアプローチや手法の例として以下のものが挙げられている。

- ・ 簡略かつ直接的なアプローチにより安全性を示すこと
- ・ 様々な評価手法を適用すること
- ・ ナチュラルアナログ
- ・ 古水理地質学
- ・ 専門家の判断
- ・ 国際的なコンセンサス

IAEA/WASSAC 会合での地層処分の基準に関わる議論で safety case についてまとめられた内容 (Issues related to the preparation of safety standards on the geological disposal of radioactive waste (IAEA WASSAC Proceedings of a Specialist Meeting held from 18 to 22 June 2001)での提示内容)

セーフティー・ケース : 以下の内容が safety case には含まれるべきである。

- a) 事業者は、その議論とそれを支援する情報を明白に資料として残すよう求められるべきである。
- b) セーフティー・ケースは異なった聞き手を納得させる必要性を心に留めて適切に構築されるべきである
- c) 新しい情報が利用できるようにセーフティー・ケースの相互の開発と向上を可能にする良く構成された手法が採用されるべきである。
- d) セーフティー・ケースは安全評価の上に構築され、その結果を記述すべきである
- e) セーフティー・ケースは全体の安全戦略と様々なバリアの安全機能を記述すべきである。
- f) セーフティー・ケースは定量的であるとともに定性的でありうる。
- g) 不確実性は明示的に扱われるべきであり、処分場性能の意味合いは明らかにされるべきである。
- h) セーフティー・ケースは様々な分野の証拠や様々な推論 (論拠) を用いるべきである。

- i) セーフティー・ケースは安全な処分場性能と規制要件への適合性を実証すべきである。
- j) セーフティー・ケースは安全指標とそれがどのように用いられるべきかを示すべきである。
- k) セーフティー・ケースは、次の承認プロセスの段階に向かうための同意が得られるように、安全性に十分な信頼性を与えなければならない
- l) セーフティー・ケースは将来の作業の予定を記述すべきである。
- m) セーフティー・ケースは人間侵入、回収可能性及び多重バリア(すなわち、セーフティー・ケースは複数のバリアに依拠するのかどうか、及びどのように依拠するの)を扱うべきである。
- n) セーフティー・ケースは決定論的及び確率論的な評価手法を取り扱うべきである。

意思決定プロセス：最終的に、セーフティー・ケースと安全評価は意思決定プロセスに関連すべきである。セーフティー・ケースと安全評価の両者にとっての文脈は段階的な意思決定プロセスであるということが明らかにされるべきである。セーフティー・ケースと安全評価の特性はすぐ使える特定の決定と決定者を反映すべきである。セーフティー・ケースと安全評価は処分場性能と実施主体に備わっている確信のレベルを明白に示すべきである。評価結果の文脈は安全が提供するレベルと議論される時間スケールの観点から議論されなければならない。

D - 2 セーフティー・ケースにおけるモニタリングの位置付け

セーフティー・ケースは様々な地層処分の安全性に関わる判断や情報の受け手の知識レベル、判断レベルを十分意識すると共に、尊重することから始まる。このような受け手としては、幅広には、

- ・ 事業者ないし推進側の人々
- ・ 規制者ないし規制側の人々
- ・ オピニオンリーダー
- ・ より幅広い一般公衆

に分けられるであろう。問題は、事業者側の立場の人々以外に対して、適切な情報をいかに適切に伝達し理解してもらうのかである。

それぞれの立場の人々にはそれぞれの理解の仕方があり、また既に理解している内容レベルも異なるため、種々の伝達方法で、種々のエビデンスや論拠を提示しなければならない。これらグルー

ブ、あるいは理解レベルに関して、以下の問題の整理が可能であろう。

- ・ 地層処分技術の全体ないし構成要素に対する知見や関心度が異なったり、欠けているために、その有効性に対する理解度が重要な基礎情報となる。容器の健全性、他のバリアの物理的閉じ込め性、岩盤やサイトの安定性などは、一部の人々にとっては安全性理解のための重要な判断材料である。
- ・ 将来発生するかもしれない事象についてのモデル化などの数学的な処置は、多くの人々に対して信頼に足るものとはなっていない可能性がある。これらの人々は、理論的論拠よりは処分の安全性の実際的な提示を求めているのかもしれない。
- ・ 安全性の担保や安心感の継続に対して、万が一何かまずいことが生じた時、発生した事態に対する緩和策が取られるということであれば、一部の人々にとっては信頼感を増進させることができるかもしれない。これは、モニタリングや回収可能性の問題の意味合いを増大させることに繋がるであろう。
- ・ 安全性に関わる論拠が、全ての受け手によってすぐに理解できるように、専門用語を用いずに表現される必要がある。
- ・ 一部の人が直接関心を示すような短期間の、例えば 100 年程度までの安全性の実証を行うことに、大きな重点が置かれる必要があるかもしれない。
- ・ 一般公衆の関心を呼ぶ多くの問題や現象が信用され、セーフティー・ケースの一部として取り扱われる必要がある。

このようにセーフティー・ケースの視点で問題を整理すると、モニタリングは以下のような位置付けが与えられるものであると整理できる。

- ・ 専門家の判断としては少なくとも 1000 年以内での漏洩は考え得ないとしても、それでも万が一漏洩があった場合を想定したとしても、モニタリングという行為が施されていれば、それによって、その漏洩が把握され、対策に結び付けられる仕組みが施されることで安全性は同様に確保されるものであると万が一の漏洩を心配する人々からは意識されること
- ・ 漏洩に直接結びつかないまでも、その前兆や関連する現象を把握することにより、安全性のレベルを推論でき、また、必要に応じて判断や対策に結び付けることができること、あるいは対策に結び付けられる仕組みを施すことで同様に安全性確保の意識が持たれること
- ・ モニタリングの適切なシステム構築と維持そのものが人々に安心感を与えることに繋が

ること

- ・ モニタリングの技術的側面が適切に取り扱われ、その内容が適切に理解されることによって、モニタリング自体への信頼感とそれが対象とする処分システムへの信頼感が増すこと
- ・ モニタリングはOECD/NEA(1999)が示す安全評価のアプローチや手法の一例である「簡略かつ直接的なアプローチにより安全性を示すこと」を担う一つであること

したがって、モニタリングは上記のような位置付けを満たすようにその内容が検討されることが望ましいであろう。

【参考文献】

OECD/NEA : Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories - Its Development and Communication (1999)

原子力安全委員会原子力総合専門部会放射性廃棄物分科会、「セーフティケース」の考え方について（OECD/NEA 報告書）、廃分第 6-3 資料（第 6 回、H14.2.6）(2002)

添付資料 - E 国際機関におけるセーフティー・ケース

(本添付資料は、平成 14 年度放射性廃棄物地層処分の安全基準等に関する調査報告書からの抜粋である)

国際機関で考えられているセーフティー・ケースの内容をまとめた(表 2.13.1 参照)。

地層処分でセーフティー・ケースが唱われたほぼ最初のレポートである OECD/NEA の「地層処分の長期安全性への信頼 - その展開とコミュニケーション」(OECD/NEA, 1999)では、安全評価を含んだ上位概念として、『処分場のある特定の開発段階において、処分場が長期にわたって安全であるということをサポートする論拠を集めたものである。セーフティー・ケースは安全評価の結論やそうした結論に対する信頼の表明などで構成されている。』と定義している。

また、「放射性廃棄物の地層処分についての科学的基礎」(IAEA, 2003)には、『施設又は活動の安全性に関する合理的な保証を提供するための、議論及び根拠を集大成したもの。これには、通常、安全評価のみならず、安全評価のロバスト性及び信頼性、この中で行った仮定に関する情報(支えている証拠及び推論を含む)が含まれている。』と定義している。

このように、セーフティー・ケースは、安全評価を書くとして、処分の安全性を示すための情報を集大成した「情報データパッケージ」であり、処分の段階の進捗に応じた充実、改訂がなされるものと想定される。

【参考文献】

OECD/NEA : Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories - Its Development and Communication (1999)

IAEA : Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste, Technical Reports Series No.413 (2003)

IAEA : Geological Disposal of Radioactive Waste , Draft Safety Requirements, DS154 (2002)

表 -2.13.1 国際機関におけるセーフティー・ケース

機関・国名	文書名	セーフティー・ケースの内容、考え方
経済協力開発機構 / 原子力機関 (OECD/NEA)	「地層処分場の長期安全性への信頼 - その展開とコミュニケーション」(1999年)	<p>[安全評価とセーフティー・ケースの対比]</p> <p>安全評価 安全評価は、長期性能、受け入れ基準への遵守、評価結果によって示された安全性に関する信頼性の評価である。</p> <p>セーフティー・ケース セーフティー・ケースは、処分場のある特定の段階において、処分場が長期にわたって安全であるということをサポートする論拠を集めたものである、セーフティー・ケースは、安全評価の結論やそうした結論に対する信頼の表明などで構成されている。未解決の問題があるということと、将来の開発段階でこうした問題を解決するための作業の方針となるということを確認の必要がある。</p> <p>[構築の手順]</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>評価の基礎の確立</p> <ul style="list-style-type: none"> - セーフティケースを構築するに当たっての適切なアプローチを示した安全戦略を策定する - 処分場のサイトと設計（システムの基本的考え方）を定める - 処分システムの性能を評価するための手法、モデル、データとともに、システムに関する現在の意見を取りまとめる </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>性能評価の実施</p> <ul style="list-style-type: none"> - 評価事例について処分場の性能を検討する - 受入基準への遵守を評価する - 感度分析を実施する </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>試算された安全に対する信頼を検討する。必要な場合には、評価の基礎を変更する。</p> <p>～ は、安全評価と定義する。</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <p>セーフティケースの取りまとめ</p> <ul style="list-style-type: none"> - 安全評価の文書化 - 安全評価によって示された安全に対する信頼の記載 - 将来の開発段階に向けての作業指針の提示 </div> </div> <p>意思決定者との協議、ならびに必要な場合は評価の基礎の改訂</p>

表 -2.13.1 国際機関におけるセーフティー・ケース

機関・国名	文書名	セーフティー・ケースの内容、考え方
国際原子力機関 (IAEA)	「放射性廃棄物の地層処分についての科学技術的基礎」(2003年、Technical Reports Series No.413)	【セーフティー・ケースの定義(IAEA 安全用語集からの改訂)】 施設又は活動の安全性に関する合理的な保証を提供するための議論及び根拠を集大成したもの。これには、通常、安全評価のみならず、安全評価のロバスト性及び信頼性、この中で行った仮定に関する情報(支えている根拠及び推論を含む)が含まれている。
	「放射性廃棄物の地層処分、安全要件ドラフト(DS154)」(2002年10月14日)	【セーフティー・ケースの定義】 5.5 セーフティー・ケースは、放射性廃棄物処分施設の安全性および安全に対する信頼性について説明、定量化、立証した論説と証拠を集めたものである。セーフティー・ケースは、施設に関するあらゆる重要な決定事項に対する基本的データである。これには、安全評価の結果(以下を参照)とその基本となる仮定条件に関する裏付けとなる証拠や推論などの追加情報が含まれるだろう。セーフティー・ケースには、放射性廃棄物処分の必要性に関するより一般的な論説や、安全評価結果を理解するための情報なども含まれる場合がある。セーフティー・ケースでは、施設開発の特定の段階において未解決の問題が存在することを認め、このような問題を今後解決するための作業に対して指針を提供すべきである。 【安全評価の定義】 5.6 安全評価は、処分施設に伴う放射線学的危険と、安全機能を実施して技術的要件を満たす設計能力を統計的に分析するプロセスである。これには、性能の全体的レベルの定量化、付随する不確実性の解析、関連する設計要件・安全基準との比較が含まれるであろう。安全評価では、科学的理解の重要な欠落や、提示した結果に影響を与えるかもしれないデータや解析技術も明らかにすべきである。 【セーフティー・ケース及び安全評価の要件】 【要件 11】セーフティー・ケースと安全評価の作成 処分施設開発における各段階で、必要に応じてセーフティー・ケースとこれを裏付ける安全評価を作成・更新しなければならない。これらは、各段階で必要とされる決定を提示するのに必要な技術的データを提供できるように、十分に詳細で包括的であればならない。 【要件 12】セーフティー・ケースと安全評価の適用範囲 地層処分施設のセーフティー・ケースは、サイト、施設設計、操業及び規制管理における安全に関連するあらゆる面について記述しなければならない。セーフティー・ケースとこれを裏付ける評価では、提供される防護レベルを説明しなければならない。また、安全基準を満たしているという妥当な保証を提供しなければならない。 【要件 13】セーフティー・ケースと安全評価の文書化 セーフティー・ケースとこれを支える安全評価は、詳細で質の高いレベルで作成し、各段階での決定を支援し、独自の審査を実施できるようにしなければならない。

添付資料 - F 国内外の地下研究施設(URL)に関する調査と分析

国内外の地層処分に関わる地下調査施設(URL)等で実施されている計測内容を調査し、表 F-1 に示した。

各 URL ではそれぞれの目的のための計測が実施されている。モニタリングの観点で参考になると思われる事例をいくつか述べる。

カナダ・ホワイトシエルでのトンネルシーリング試験 (TSX) は、地下 420m の坑道でプラグの間に砂を充填させ、水圧を高めることによりプラグ性能を評価している。本試験では 900 個以上にわたる各種のセンサ (温度、間隙水圧、圧力、応力、変形、ひずみ及び AE 測定機器) を設置し、3 年後における稼働率は 90% (コンクリートプラグ内の水分関係のセンサを除くと 94%) である。試験では径 9.5mm の 245 本のケーブルがプラグ内を通過している。これまでもケーブルが水みちになることが知られていたため、ケーブルポートのセメントグラウトやプラグ等の対策を行っている。

スウェーデンのエスポ URL におけるプロトタイプ処分場においても、ケーブルの水みち化に対する対策を行っている。

スイスの Grimsel Test Site (GTS) において実施されているスペインのプロジェクト「FEBEX 原位置試験」は、人工バリアに関する実規模の原位置試験である。本試験では粘土バリア及び周辺岩盤内の熱 - 水 - 応力プロセスのモニタリングを目的として 632 個の各種センサ (温度、全圧、間隙水圧、水分量、変位等) が設置された。ベントナイトに設置されたセンサは 100 以上の温度、5MPa の圧力、高腐食環境に耐え得る必要があり、機器に要求される寿命は 3 年間であった。これらの要件のために利用可能なセンサを市場で検索することは困難であったため、特別設計や保護のための開発が必要であった (ENRESA, 2000)。結果的には機器の信頼性は期待以上であり、冠水や物理的ダメージ以外の原因で破損したセンサは全体の 5.7% 程度であった。報告書は、全ての機器の寿命をさらに延ばすことが必要と述べている。

上記のように、URL での経験から、ある種のセンサは地層処分環境における数年程度の稼働は期待できるが、今後はその寿命を延ばすことが課題として示されている。また、センサからデータを伝送するケーブルが水みちになってしまうので、その対策が必要であることが示されている。

【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, PT-01/00 (2000)

表 F - 1 各国の URL で実施されている計測内容の概要 (1/4)

	スウェーデン	フィンランド	フランス	スイス
名称	Åspö Hard Rock Laboratory (Åspö)	Olkiluoto (選定サイト)	Bure (建設中)	Grimmel Test Site (花崗岩)
概要	目的: 使用済燃料の地下深部の地層処分場を設計、建設、実証及び選定された処分場サイトの特性調査を行う方法の開発並びに検証 1990年: 建設開始 1995年: 掘削作業完了	現状: 低中レベル放射性廃棄物処分場は建設中であり、同処分場の調査坑道において掘削影響に関する計測が実施 2000~2010年: 立坑建設予定 2010年: 建設予定開始	現状: 建設中(立坑掘削段階) 1999年: 地表物理探査 2000年: 地表試錐孔掘削(環状/立坑建設目的)/地上施設建設 2000~2002年: 立坑建設(約500m) 2003~2006年: 地下ギャラリ試験	目的: 処分概念の実証及び評価(フェーズ) 現状: 1983年に掘削が開始された地下450mの地下研究施設で現在はフェーズ 段階(2002年まで)
モニタリング(掘削)の主な試験及び計測項目	本調査で得た情報は次の通りである。 プロトタイプ処分場 ・ キャニスタ、緩衝材、埋戻し材、岩盤中温度の変遷 ・ 周辺岩盤の透水系数と水頭 ・ 周辺岩盤での応力と変位 ・ 熱 - 水 - 応力の連成 ・ 緩衝材及び埋戻し材の湿潤 ・ 緩衝材、埋戻し材、岩盤中の間隙水圧の変遷 ・ 緩衝材及び埋戻し材中での飽和度と変位の変遷 ・ キャニスタの変位 ・ 緩衝材及び埋戻し材中のガス組成 ・ 緩衝材及び埋戻し材間隙水とニアフィールド岩中での地下水の化学組成 試錐孔モニタリング ・ 地下水位 ・ 地下水圧 ・ 地下水電気伝導度 ・ 地下水化学特性 ・ 気圧 ・ 潮位 ・ Oskarshamnでの降雨量及び気温	本調査で得た情報は次の通りである。 物理探査 ・ 岩盤特性(磁化率、天然線、法による岩盤密度、中性子 back scattering、亀裂特性) ・ 試錐孔内部の地下水流 ・ 高透水性亀裂頻度 ・ 試錐孔周辺岩盤特性 調査坑道モニタリング ・ 処分坑掘削表面相度 ・ 処分坑の EDZ	本調査で得た情報は次の通りである。 深部試錐孔モニタリング ・ 試錐孔データ(天然放射線量/深部の比抵抗/地層の密度及び光電子ファクタ/空隙率/試錐孔の孔径計測/圧力水頭の回復/温度/透水系数設定のための流速、水位及び温度) 岩盤水理 ・ 間隙水圧 ・ 吸引圧 ・ 水分量 ・ 水位 岩盤力学 ・ 初期応力 ・ 岩盤変位 地下水化学 ・ 地球化学特性(イオンの量、溶存酸素、pH、Eh、P _{CO2} 、電気伝導度等) ・ 温度	本調査で得た情報は次の通りである。 地震トモグラフィ(TOM): 岩盤内部の構造を逐層で識別する本手法の適用可能性評価を目的とした試験 試錐孔の封入(BOS): 水平かつ長い試錐孔の封入技術試験を目的とした試験 核種移行プロジェクト(RRP): 核種の収着およびマトリクス拡散モデルの実証を目的とした試験 フルスケール人工バリア試験(FEBEX): 高レベル廃棄物の定置技術の実証を目的とした試験 トンネル・ニアフィールド音画(CTN): 結晶質岩環境の周辺岩盤トンネルの妥当性研究 - EDZ(掘削影響領域) - ZPK(亀裂ネットワーク内の二相流) - ZPM(岩盤マトリクス内の二相流) - TPF(Shear Zones 内の二相流) なお、このうち、CTNはフェーズ V においても実施中である。またフェーズ V では GMT(ガス移行試験)や FEBEX なども実施されている。
主な機器/手法	・ 温度: 光ファイバ、熱電対 ・ 応力: 振動弦、光ファイバ ・ 応力変位: 伸縮型センサ搭載型歪み計、歪み計 ・ 透水系数: 水圧計 ・ 水分量: 水分計 ・ 地下水位水圧: ハイドロリックマルチプレクサ、圧力トランスデューサ ・ 電気伝導度: EC センサ、電気伝導度計 ・ 気圧: 独立型圧力計 (BORRE) ・ 潮位: 潮位計 (フロート式)	・ 岩盤特性: シングルホール検層 ・ 岩盤特性: 電気検層 ・ 岩盤特性: 弾性変位検層 ・ 試錐孔内部の地下水流: 流体検層 ・ 高透水性亀裂頻度: チューブ放射計法 ・ 試錐孔周辺岩盤特性: レーダ法、VSP、HSP ・ 処分坑掘削表面相度: レーザ・プロファイロメータ ・ 処分坑の EDZ: He ガス法や C-14 ポリメチルメタクレート法	・ 試錐孔データ: 検層 ・ 間隙水圧: ピエゾメータ ・ 吸引圧: 吸引湿度計 ・ 水分量: 中性子水分計 ・ 水位: リミニメータ、MADO、THALIMEDES ・ 初期応力: 水圧破壊法 ・ 岩盤変位: 振動弦センサ ・ 地球化学特性: 循環式地下水採取技術と電極 ・ 温度: 金属熱電対、白金プローブ、電磁気圧力ゲージ	・ 岩盤水理/EDZ: サーフェスパッカ/短間隔パッカ/連結パッカシステム/MMPS システム/スリムホールピエゾメータシステム/小管巻プローブ/スリムホールピエゾメータシステム ・ 岩盤内の水分分布: TDR ・ 岩盤特性: 小管巻プローブ

表 F-1 各国の URL で実施されている計測内容の概要 (2/4)

	スイス	ベルギー	スペイン	イギリス
名称	Mont Terri Tunnel (Opalinus 粘土)	Mol (HADES 研究施設)	FEDEX : Grimsel Test Site	Rock Characterisation Facility (Sellafield)
概要	目的: Opalinus 粘土層の地質、水理、地球化学及び岩盤力学調査と処分場としての適用性検討 現状: 1989 年掘削開始され、現在はフェーズ 5 が実施中	目的: 原位計測と大規模な総合試験 現状: 1984 年以降の HADES プロジェクト (1 本のアクセス立坑と地下 230m レベルの 2 つのギャラリ)	目的: 実規模人工バリア試験 現状: 1994 年以降現在まで継続中。実規模以外にも室内モックアップ試験も実施	現状: Nirex による Sellafield での RCF 計画の申請は、1995 年 9 月 ~ 1996 年 2 月の公聴会により却下され、全てのモニタリング機器は撤去された。そして、全てのサイト特性調査用試験孔は巨的に放棄された。
モニタリングに関連する主な試験及び計測項目	本調査で得た情報 (フェーズ 1~7: 予定を含む) は次の通りである。 <ul style="list-style-type: none"> 地下水流シミュレーション (流体挙動) 地下水流シミュレーション (トレーサ) 地下水サンプリング (原位置) 試験孔流体影響 EDZ 水質試験・ガス圧試験 EDZ 岩盤力学特性 EDZ 自己回復作用 浸透圧 高 pH セメント間隙水 岩盤内の広域移行 断層中の移行 ヒータ試験 間隙水圧 水平掘削試験孔 小口径処分坑道 深部試験孔シミュレーション 	Mol 原子力研究センターで実施中 (予定) の主要プロジェクト及び概要は次の通り。 <ul style="list-style-type: none"> PRACLAY: HLW の粘土処分に関する予備的実証試験 実規模処分ギャラリを用いた建設・操業のフィジビリティの実証 大型連結トンネル建設 人工バリア及び周辺母岩の熱・水・応力挙動モニタリング CERBERUS: 地下施設における線源利用実験 廃棄体近傍周辺岩盤の放射線、熱及び掘削の複合的な影響に関する実証試験 (回収可能性試験を含む) RESEAL: 大規模原位置封入試験 封入材施工技術の実証 / 実規模封入施工の実証及び事後調査 CORALUS: 地下処分場条件下におけるガラス腐食試験 ガラス固化体の処分後の挙動及び廃棄体移行に関する研究及び実証 CLIPLEX: 地下研究所の拡張に伴う粘土計測プログラム 連絡ギャラリ掘削時の粘土の水理応答のモデル化及びモニタリング 	試験内容 <ul style="list-style-type: none"> Grimsel Test Site に建設された坑道内部の自然環境条件における実規模原位置試験 実規模を模擬したモックアップ室内試験 上記の 2 つの試験から得られる知見を補完するための一連の室内試験 計測パラメータ <ul style="list-style-type: none"> 温度 水分 応力 全水圧 変位 水圧 その他 (ガス発生及び移行計測) その他、計測データの管理システム等の研究も実施されている	Sellafield で実測されたモニタリング項目は次の通りである。 <ul style="list-style-type: none"> 地下水圧 地下水温度 大気圧 河川流量データ
主な機器 / 手法	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤水理: トレーサ注入岩盤のオーバーコアリング / 理パッカ試験 地下水化学: 原位置採水及び地下水分析 / 岩盤試料の圧搾及びリーチング 試験孔の安定性評価: 試験孔の膨張度及びキャリバ EDZ 水理: 水質試験支持 EDZ 岩盤力学: 地震波速度分布計測支持 岩盤応力: コアリング手法 / 試験孔スロット 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線 (CERBERUS): 電離箱, LiF 線量計 岩盤の温度: 温度プローブ 間隙水化学 (pH, Eh): pH センサ, サンプリング分析 岩盤・支保表面の全水圧: 応力トランスデューサ, 圧力センサ 岩盤・プラグの間隙水圧・吸引圧: ピエゾメータ 岩盤・プラグの変位: 歪み計、変位センサ、傾斜計 プラグ内の水分量: 熱伝導率の変化計測 支保工応力: 荷重計 (コンクリート支保の場合) 歪み計 (鋼鉄支保の場合) 内容変位: テープ式伸縮計 	<ul style="list-style-type: none"> 温度: 熱電対式センサ 岩盤全水圧: 振動式センサ 模擬廃棄体の全水圧: 振動式センサ 岩盤試験孔水圧: 圧電抵抗型センサ 試験孔パッカ圧力: 圧電抵抗型センサ ベントナイト間隙水圧: 振動式センサ 水分量: 容量性 (Capacitive) 水分計 / 水分計 / TDR 岩盤変位: 振動式伸縮計 ヒータ変位: 振動式センサ ベントナイト膨張圧: 振動式センサ ベントナイト変位: 変位計 岩盤特性 (走向・傾斜): クリノメータ / クラックメータ LVDT ベントナイトガス圧: 磁気センサ 雰囲気圧力: 圧電抵抗型センサ 抵抗強度 / 抵抗電圧: 電気コンバータ 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水圧: 水圧センサ 地下水温度: 温度センサ 流量データ: 流量計

表 F-1 各国の URL で実施されている計測内容の概要 (3/4)

	ドイツ	米国 (YMP)	米国 (WIPP)	カナダ
名称	Gorleben, Konrad, Morsleben	Yucca Mountain Site	WIPP サイト	Underground Research Laboratory (Whiteshell)
概要	現状：現在、政府はドイツの廃棄物処理処分計画を精査中である。Gorleben での新しい探査坑道の建設や新しい探査ボーリングの掘削は政府の命令で中断しているが、既に建設されている測定機器によるデータ収集、及び評価プログラムは継続される。	YMP では研究のみを対象とした施設はないが、将来地層処分場として有力である実際のサイトにおいて数本の坑道を掘削し、サイト特性調査を兼ねた調査、研究が行われている。Yucca Mountain Site が地層処分場としてふさわしいとの大統領の判断が得られた後、すでに掘削されている坑道、将来の本施設の一部、または丘傍において性能評価試験が継続される計画になっている。	WIPP では地下処分場の北端が 1980 年代初頭に、地質学者が提案した放射性廃棄物処分場としての地質学特性を研究するためのエリアとして採掘され現在でも地下研究所として利用されている。	目的：処分システムの概念設計と安全評価のための基礎データの採取及び原位置での処分関連技術の実証 スケジュール： サイト評価段階 ・モニタリングシステム設置：1980～1984 ・モニタリング：1981～2011 建設段階 ・地上施設：1982～1987 ・地下アクセス：1983～1990 ・研究実施段階：1989～2011 ・閉鎖・解体段階：2011～2014
モニタリング計測項目及び評価項目	ドイツにおけるモニタリング項目は次の通りである。 ・ 地表の水準測量 ・ 内空変位 ・ 伸縮 ・ 傾斜計測 ・ 沈下 ・ 地圧 ・ 温度 ・ 透水性 ・ AE ・ 湿度 ・ 体積含水率 ・ 塩水塊の位置 ・ 地下水位 ・ ひずみ ・ pH	YMP では、将来の本施設を含めて以下の試験、モニタリング計画がなされている。 モニタリング計画：浸透水モニタリング / 原位置廃棄物パッケージモニタリング / 長期肺林道試験 / 換気モニタリング / 岩体モニタリング / 坑道内モニタリング / 侵入物質モニタリング / 地下水位及び水温モニタリング / 地表面上昇モニタリング / 地中地震活動モニタリング / 地下水質 性能評価試験：再取り出した材料のクーボン試験 / 廃棄物パッケージのダメージ試験 / 再取り出した廃棄物パッケージ試験 / 閉鎖後シミュレーション試験 / 地下試験採取及び回収試験 / 不飽和域の試験 / ニアフィールド環境試験 / 廃棄物試験 / 廃棄物パッケージ試験 / 試験孔閉鎖試験 / 立坑及び管路の閉鎖試験	本調査では地下研究所で実施された試験及び計画項目を整理できるだけの情報が得られなかった。	熱源の影響による緩衝材とキャニスター、緩衝材と岩盤とコンクリートブラグの相互作用試験 切り出し岩石ブロックでの核燃料試験 グラウト試験 トンネルシーリング試験 亀裂が穿通した岩盤中における物質移行試験 亀裂が中程度に発達した岩盤中における物質移行試験 掘削時岩盤安定度測定試験 緩み領域中の物質移行試験 地質、透水性、地下水の化学特性、微生物に関する調査 原位置応力試験 処分システムのモデル試験 原位置拡張試験
性能評価手法	・ 地表の水準測量：デジタル水準器 ・ 内空変位：副尺付きスケール、電位差計、光ファイバセンサ ・ 伸縮：ひずみゲージ ・ 傾斜計測：傾斜計 ・ 沈下：沈下測定器 ・ 地圧：オーバーコアリング法、ひずみゲージ、水圧破壊法 ・ 温度：温度センサ、光ファイバセンサ ・ 透水性：4 点バックプローブ ・ AE：放射状ソフオン測定列 ・ 湿度：湿度プローブ、光ファイバセンサ ・ 体積含水率：Theta-プローブ ・ 塩水塊の位置：地下挿入式レーダ ・ 地下水位：地下水位計 ・ ひずみ：光ファイバセンサ ・ pH：光ファイバセンサ	YMP では、モニタリング項目や機器に関する詳細は現在精査中である。	WIPP では数多くのパラメータが取得されているが、ここでは岩盤力学に関する機器について記す。 ・ 累積変形：音響プローブボーリング孔伸縮計、内空変位累積変形、鉋線内空変位点累積変形、音響プローブ内空変位測定器、ジョイントメータ、振動ボロリング孔伸縮計 ・ 累積ひずみ：埋込ひずみ計、点溶接ひずみ計 ・ 荷重：ロックボルトロードセル ・ 圧力：土圧計 ・ 水圧：ヒエゾメータ	・ ブラク膨潤圧：油圧式圧力計、ブルーピングリング式圧力計 ・ 粘土ブラグ変形：線形ポテンションメータ ・ 粘土ブラグ、岩盤、コンクリート変形：LVTD ・ 粘土ブラグ変形：音波プローブ ・ 粘土ブラグ内水分量：熱電対乾度計、湿度計、TDR ・ 周辺岩盤、コンクリート中の間隙水圧：振動ボロリングヒエゾメータ ・ 周辺岩盤の間隙水圧：バックストリング ・ 各所の温度：熱電対乾度計、サーミスタ乾度計 ・ 岩盤内変形：伸縮計 ・ 岩盤、コンクリート中の亀裂の発生状況：AE システム、MS システム ・ コンクリート中のひずみ：振動ボロリングひずみゲージ、レーザーひずみ計、光ファイバひずみ計 ・ コンクリート中の水分：サイクロメータ ・ コンクリートの変形：電圧変位トランス型変位計

表 F-1 各国の URL で実施されている計測内容の概要 (4/4)

	日本	日本	日本
名称	釜石原位置試験場	東農研科学センター	超深地層研究所計画 (瑞良)
概要	目的: 地層処分研究開発の基礎研究である地層科学研究の一環として、「我が国の地質環境を理解し、地下深部の実測データを取得すること」 現状: 昭和63年度より10年間 (終了)	目的: 地下深部の地質環境を解明するための地層科学研究。東農研釜石の坑道を利用した地質岩の地質環境耐性調査 現状: 昭和61年度より 岩盤の性質や坑道掘削による岩盤の性質の変化とその範囲及び 岩盤中の地下水やウランなどの物質の動きや性質を明らかにするため、坑道やボーリング孔などを掘削しての調査・試験や、地下水や岩石の試料を採取しての分析・試験を施中	現状: 瑞良市のJNC用地内に地上施設と地下約1000m級の研究坑道を掘削しながら、花崗岩を対象にした地層科学研究(約20年間)を実施予定。現在、4本目の1,000mボーリング(MIU-4)を掘削中。
モニタリングに関連する主な試験及び計測項目	JNCにより釜石原位置試験場で実施された主な試験は次の通り。 地質環境調査: 亀裂分布調査 / 年代測定 / 古地磁気測定 岩盤力学(掘削影響含む): 原位置力学試験 / 初期応力測定(原位置) / 初期応力測定(室内) / 物理探査 / AE計測 / 振動伝播計測 / 変位・変形計測 地下水流動: 単孔式透水試験 / 動燃法IFT試験 / ゆるみ透水試験 / 孔間透水試験 / 床盤注水試験 / 圧力干渉試験 / 地下水流動解析 地球化学: 地表からの垂直試験孔における採水・分析 / 坑道内の試験孔における採水調査技術 物質移行・遅延: 原位置シリン注入試験 / 原位置コールドトレーサ試験 地震: 地震観測装置 / 地下水水理観測装置 グラウト: グラウト注入試験 / 効果確認 緩衝材充填: 試験孔の掘削 / 緩衝材の充填 実規模試験: 粘土充填・熱負荷試験 (緩衝材再含水生成挙動: THM)	JNCにより東農研科学センターにて実施された調査・試験は次の通り。 岩盤水理 ・ 表層水理調査 (立坑掘削影響試験) ・ 1000m対応水理試験装置 (立坑掘削影響試験) 地球化学 ・ 地下水地球化学測定 a. 浅層試験孔調査 (100~200m) b. 深層試験孔調査 (200~1000m) 岩盤耐性 ・ 北延 NATM 坑道における掘削影響試験 ・ 立坑掘削影響試験 地震フロンティア研究 ・ 地震発生に関する研究 ・ 地震発生と地下水挙動に関する研究	超深地層研究所 (瑞良) における研究予定 (一部実施済) は次の通りである。 第1段階: 地表からの調査予測研究段階 (平成9年~現在: 5~6年間) ・ 深地層の岩盤力学耐性 ・ 深地層の地下水特性 ・ 水理試験 第2段階: 坑道掘削を伴う研究段階 (7~8年間) ・ 坑道掘削時の地質構造 ・ 坑道掘削時の地下水特性 第3段階: 研究坑道 (地下1000m) を利用した研究段階 (12~13年間) ・ 地下深部の岩盤力学耐性 ・ 地下深部の地下水特性 ・ 地下深部での現象把握
主な機器や手法	主な計測法は次の通りである。 岩盤力学(掘削影響含む): 等変位型孔内電荷試験 / 応力解放法 (孔径変化法、円錐孔底ひずみ法) / 水圧破壊法 / AE法、DRA法、DSCA法 / PS 検層、レーダ 反射法、弾性波屈折法、超音波/リレス測定 / AE計測 / ジョイント変位計 地下水流動: 間隙水圧、透水係数等 地球化学: MPシステム / MOSDAX、HGP-10システムによる採水 / REDOX 調査 物質移行・遅延: オーバーコアリング 地震: レーザ干渉式岩盤歪み計 / 水晶管伸縮方式歪み計 グラウト: 透水試験 / トモグラフィ調査 実規模試験 (THM): 熱電対 / 間隙水圧計、亀裂変位計、歪み計、ポアホール型歪み計、ゲージ、軸変位計 / 熱流計 / 間隙水圧計、土圧計、歪み計 / 湿度計、水分計 (サイクロメータ)	1000m対応地下水地球化学耐性調査機器による調査項目を示す。ただし、地下水計測はモニタリングのような長期観測計測ではない。 1000m対応地球化学耐性調査による地下水特性 ・ pH ・ Eh ・ 電気伝導度 ・ 硫化物イオン濃度 ・ 水温 ・ 間隙水圧 ・ バック圧力 ・ 採水容器内圧力 ・ 採水量	超深地層研究所 (瑞良) での情報は次の通り。 約1000mのボーリング調査 (地質構造や地下水流、地下水特性) ・ 1本目、2本目、3本目: 掘削と地下水流等の調査 ・ 4本目: 掘削開始 ・ 設置した観測機器での観測を実施中 浅地層での調査 (地下水流) ・ 調査機器の整備及び調査を継続中 データ管理システムの整備と管理 ・ データ管理の継続中 調査技術の開発 ・ 深さ約1000mのボーリングを用いた調査に必要な機器の製作と適用検討中

添付資料 - G 地層処分モニタリングシステム検討委員会

(主査以外は 50 音順、敬称略)

主査	田中 知	東京大学大学院 工学系研究科 システム量子力学専攻	教授
委員	石黒 勝彦	核燃料サイクル開発機構	東海事業所
委員	大江 俊昭	東海大学工学部 応用理学科 エネルギー工学専攻	
委員	河西 基	財団法人 電力中央研究所	我孫子研究所
委員	北山 一美	原子力発電環境整備機構	技術部長
委員	黒田 茂樹***	関西電力株式会社	原子力事業本部
委員	佐々木 泰	日本原燃株式会社	埋設事業部 開発設計部
委員	田沼 進**	関西電力株式会社	原子力事業本部
委員	徳永 朋祥	東京大学大学院 工学系研究科 地球システム工学専攻	助教授
委員	長崎 晋也**	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境学専攻	助教授
委員	三谷 泰浩*	九州大学大学院 工学研究院	助教授

無印：平成 12～15 年度委員

* ：平成 12～13 年度委員

** ：平成 12～14 年度委員

*** ：平成 15 年度委員

【問合せ先】

〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目8番10号(第15森ビル4階)

財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター(原環センター)

電話 03-3504-1081 ファックス 03-3504-1297

Radioactive Waste Management Funding and Research Center (RWMC)

No.15. Mori Bldg, 2-8-10, Tranomon, Minato-kum Tokyo, 105-0001, Japan