

## 地層処分性能評価における生物圏の変遷および 将来の人為的行為の様式化に関する考え方の 国際的な動向整理

International Trends on Stylization of Biosphere Evolution and Future Human Activity  
for Performance Assessment of Geological Disposal

加藤 智子

Tomoko KATO

地層処分研究開発部門  
地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

地層処分性能評価における生物圏の変遷および将来の人為的行為の様式化に関する考え方の  
国際的な動向整理

日本原子力研究開発機構  
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

加藤 智子

(2009年12月15日受理)

地層処分性能評価においては、国際原子力機関（IAEA）の BIOMASS プロジェクト最終報告書におけるレファレンスバイオスフィアの考え方や、国際放射線防護委員会（ICRP）における自然過程および人間侵入に適用される放射線学的基準の考え方に基づき、各国の状況に応じて、安全基準・指針類を策定するとともに、実施主体による性能評価報告書においては、安全基準・指針類における規定内容に従って、生物圏の状態を設定し、評価シナリオを構築している。

時間スケールが超長期に及ぶ地層処分の生物圏評価シナリオにおいて、将来にわたる生物圏（地表環境および人間の生活様式）の変遷を正確に推測し、記述することは困難であるとともに、「処分場の性能を人間が受ける放射線影響という指標で表現する」という生物圏評価の目的においては、合理的ではない。自然事象等による地質環境の長期的変遷に基づく生物圏の状態変化を記述するにあたっては、規制要件や評価の目的に応じて適切に記述するための方法、すなわち、様式化の方法論を整理しておくことが重要となる。

本報告書では、諸外国における安全基準・指針類の規定内容および性能評価報告書における取り扱いを概説するとともに、わが国の地層処分性能評価において、生物圏の変遷および将来の人為的行為を様式化する際に留意すべきポイントを整理した。

International Trends on Stylization of Biosphere Evolution and Future Human Activity for Performance  
Assessment of Geological Disposal

Tomoko KATO

Geological Isolation Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 15, 2009)

Regulatory guidelines are usually established concerning the dose assessment of geological disposal, based on the Reference Biosphere Methodology by IAEA BIOMASS project and radiological criteria applied to scenarios representing natural processes and human intrusion by ICRP. Based on these regulatory guidelines, responsible organizations or research institutes of geological disposal develop dose assessment scenarios for performance assessment of geological disposal.

It is difficult to assume future evolutions of surface environments and human activities accurately and to describe them in a biosphere assessment scenario of geological disposal. Accurate assumption on their evolution is not reasonable, because a biosphere assessment aims to illustrate the radiological impact to human as an index of performance for repository. Consequently, it is important to develop the methodology to describe the biosphere system with long-term evolution of geosphere according to a regulatory guideline or an assessment purpose, that is, the methodology to stylize evolutions of surface environments and human activities.

In this report, the author reviewed regulatory guidelines and scenarios of performance assessment applied to natural processes and human intrusion in foreign countries, and discussed the view-points when evolution of biosphere and future human activity are stylized in performance assessment of geological disposal.

Keywords: Stylization, Biosphere, Future Human Activity, Geological Disposal, Dose Assessment, Natural Process, Human Intrusion

目次

1. はじめに	1
2. 国際機関における線量評価の考え方	3
2.1 国際放射線防護委員会 (ICRP)	3
2.2 国際原子力機関 (IAEA)	4
3. 各国の安全基準・指針類および性能評価報告書における自然過程シナリオの取り扱い	6
3.1 スウェーデン	6
3.2 スイス	7
3.3 ベルギー	8
3.4 米国	10
3.5 フランス	11
4. 各国の安全基準・指針類および性能評価報告書における人間侵入シナリオの取り扱い	12
4.1 スウェーデン	12
4.2 スイス	14
4.3 ベルギー	15
4.4 米国	16
4.5 フランス	17
5. まとめと生物圏の変遷および将来の人為的行為の様式化を考える上でのポイント	19
謝辞	21
参考文献	22

Contents

1. Introduction	1
2. Radiological criteria applied to dose assessment scenarios and the Reference Biosphere Methodology	3
2.1 The international Commission on Radiological Protection (ICRP)	3
2.2 International Atomic Energy Agency (IAEA)	4
3. Regulatory guidelines and scenarios of performance assessment applied to natural processes	6
3.1 Sweden	6
3.2 Switzerland	7
3.3 Belgium	8
3.4 United States	10
3.5 France	11
4. Regulatory guidelines and scenarios of performance assessment applied to human intrusion	12
4.1 Sweden	12
4.2 Switzerland	14
4.3 Belgium	15
4.4 United States	16
4.5 France	17
5. Conclusion	19
Acknowledgment	21
References	22

This is a blank page.

## 1. はじめに

地層処分性能評価における生物圏評価では、人間の生活環境である地表環境における核種移行のプロセスとこれによる被ばくの形態（被ばく経路）についてモデルを構築して人間が受ける放射線影響（例えば、放射線量等）を評価している。時間スケールが超長期に及ぶ地層処分の生物圏評価シナリオにおいて、将来にわたる生物圏（地表環境および人間の生活様式）の変遷を正確に推測し、記述することは困難であるとともに、「処分場の性能を人間が受ける放射線影響という指標で表現する」という生物圏評価の目的においては、合理的ではない。しかしながら、超長期にわたる評価において、自然事象に起因する地表環境および人間の生活様式の状態変化の結果、地表環境の構成要素やそこでの核種移行プロセス、被ばくの形態にどのような影響を与えるかを整理し、評価結果にどの程度の影響を与えるかを例示しておくことは、処分場の性能を示すうえで重要となる。この観点から、地質環境の長期的変遷に基づく生物圏の状態変化（例えば、地形の変化による環境構成要素および核種移行プロセスの変遷や、気温の変化による地表環境での物質移行および人間の生活様式の変化）を、規制要件や評価の目的に応じて適切に記述するための方法、すなわち、様式化の方法論を整理しておくことが重要となる。

超長期にわたる地層処分性能評価における生物圏評価のあり方については、例えば、国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告<sup>1), 2)</sup>では、「決定グループと生物圏は現在利用できるサイトまたは地域の情報に基づくサイト固有のアプローチか、もっと一般的な習慣と条件に基づいた様式化されたアプローチ

（stylised approach）を用いて規定すべきである」と記述されている。また、「様式化アプローチの使用は、時間尺度が長いほどより重要になるであろう」としている（詳細は2.1に記述）。さらに、国際原子力機関（IAEA）の技術報告書<sup>3)</sup>には、放射性廃棄物処分の評価時間と生物圏／決定グループとの関係が示されており、処分後の時間が長くなればなるほど、様式化された生物圏と仮想的決定グループを設定することの重要性が高まるとしている（詳細は2.2に記述）。

様式化された生物圏モデルの構築に関しては、IAEAによる国際共同プロジェクトBIOMASSにおいて、将来予測の不確実性に対処するため、レファレンスバイオスフィアの構築アプローチについて検討された<sup>4)</sup>。BIOMASSでは、レファレンスバイオスフィアを、「処分場に起因する放射性核種が生物圏に流入することによって生じると考えられる放射線影響について、計算する基盤を与えるために必要な仮定の集合」と定義しており、諸外国での生物圏評価においても、この概念が採用されている<sup>5)-8)</sup>。

地表環境の状態に変化をもたらす要因のうち、自然事象に起因するものとしては、気候変動や隆起・侵食／海水準変動などが挙げられる。これらの要因による地表環境の変遷に関しては、地質環境の長期的な変動とリンクして適切な設定をすることも重要である。例えば、気候変動については、規制要件として挙げられている国もあり（フィンランド、フランス、スウェーデン、米国等）、諸外国の性能評価報告書においてその取り扱いを検討している<sup>6)-9)</sup>。

一方、被ばくの形態の長期的な変遷を考慮する場合、気候変動等の自然事象によるプロセスのほかに、人間の行為に起因する事象を考慮する必要性が生じる。ICRP 勧告<sup>1), 2)</sup>では、自然事象に起因するプロセスを「自然過程」と呼ぶのに対し、人間の行為に起因するプロセスを「人為過程（人間侵入）」と呼んでいる。将来の人間の行為に関しては、原子力安全総合専門部会報告書<sup>10)</sup>に以下の記述がある。「処分場の破壊行為などのような意図的活動に基づくものは本来的に安全評価の対象外とすることが国際的に共通した考え方になっている。不注意による人の行為については、通常の利用に係るシナリオ設定の必要がないほどに処分深度を深くするとか、そこに放射性廃棄物が埋設されていることに気づきやすくする為の措置を講じる等、その発生の可能性を極力小さくすることに努める必要がある。また、そのような行為が発生する可能性と、発生した場合の影響の程度について評価し、その評価結果に応じて適切と考えられる対策を講じておくことが重要である。なお、それら人為過程を具体的かつ科学的に正確に予測したり推定したりすることが不可能なため、様式化したシナリオを予め定めておき、その対策の妥当性を確認する方法が提案されている。」したがって、処分場の性能に影響を与える将来の人為的行為を様式化することが求められる。

人為的過程（人間侵入）に関して、不注意による土地の掘削作業が処分場に影響を与える行為として挙げられている。また、「不注意による土地の掘削作業は、その評価の目的が念のために確認することにある点を配慮し、現在の掘削作業等をもとに様式化して想定することが適切である」と言及されている<sup>11)</sup>。時間スケールが超長期に及ぶ地層処分の評価において、将来の人為的行為をどのように様式化し、評価に考慮するかについては、大きな問題の一つである。このため、諸外国における検討事例を参考にしつつ、様式化の方法について検討しておくことで、人間侵入シナリオの構築に有効であると考えられ

る。

そこで、諸外国での規制・指針類での規定内容および性能評価における取り扱いを調査したうえで、生物圏の変遷および将来の人為的行為の様式化を考える上でのポイントを整理することとした。

まず、考慮しなければならない被ばくのシナリオに関する国際的な考え方を整理するために、第2章において、国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告および国際原子力機関（IAEA）の文書における記述を整理した。次に、第3章および第4章において、自然過程および人為過程に対する諸外国（スウェーデン、スイス、ベルギー、米国、フランス）の安全基準・指針類および性能評価報告書での取り扱いを整理した。なお、性能評価報告書等に関しては、シナリオ構築手法および影響解析の結果を具体的に整理するために、以下の観点で調査を行った。

(i) 自然過程（第3章）

- ・ 地表環境の変遷に関する考え方（変遷を考慮するかどうか、考慮する場合にはどのような影響要因を抽出しているか）と変遷を考慮した場合の核種流出域および核種移行プロセスの変化への影響
- ・ 被ばくグループと人間生活の様式化の考え方（上記の地表環境の特徴に基づいて抽出された被ばく経路の例）
- ・ レファレンス状態（現在の地表環境条件）と変遷を考慮した場合との評価結果の比較

(ii) 人為過程（人間侵入）（第4章）

- ・ 処分場に影響を及ぼす可能性のある人為的行為を抽出するための方法論
- ・ 上記方法論に基づく分析によって抽出された代表的ケースの例
- ・ 選定されたケースのシナリオ作成と影響解析

以上の調査結果に基づき、第5章に、わが国の地層処分安全評価において、将来の生物圏および人為的行為の様式化を検討する上でのポイントを整理した。

## 2. 国際機関における線量評価の考え方

### 2. 1 国際放射線防護委員会 (ICRP)

ICRP は、Publication 81「長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告」<sup>1), 2)</sup>では、「濃縮と保持」の戦略を用いる長寿命放射性固体廃棄物の処分に関わる公衆構成員の放射線防護の原則について取り扱っている。その中で、「放射性固体廃棄物処分の主要な目標は、現在の世代が出した廃棄物の放射線学的影響から、現在と将来の世代を防護することである。しかし、完全な永久隔離は達成できそうもなく、廃棄物のインベントリの一部は生物圏へ移り、潜在的に数百年から数千年の将来に被ばくを引き起こしうる。そのような長い時間尺度にわたる個人と集団の線量は推定できるにすぎず、将来に向けての時間が増大するとともに、これらの推定値の信頼性は減少する。それにもかかわらず委員会は、将来における個人と集団が、今日とられた行動から現在の世代が与えられるのと少なくとも同じレベルの防護を供与されるべきである、という基本原則を認める。」と述べている。また、「被ばくは決定グループにおける平均年線量に基づいて評価されるべきである。」としており、「決定グループは、想定された生物圏と独立に決めることはできない。」と定義している。さらに、「生物圏の変化の考察は、自然の力によるものに限るべきである。決定グループと生物圏は現在利用できるサイトまたは地域の情報に基づくサイト固有のアプローチか、もっと一般的な習慣と条件に基づいた様式化されたアプローチを用いて規定すべきである。」としている。決定グループの習慣と特性は、「現在の生活様式を考慮して合理的に保守的でもっともらしい仮定に基づいて選ばれるべき」とされており、これが「様式化されたアプローチ」にあてはまるものである。この考え方については、IAEA においても評価時間と生物圏／決定グループの関係について言及している（詳細については後述）。

また、考察しなければならない被ばくのシナリオとして、自然過程と人間侵入を挙げている。それぞれのシナリオに適用される放射線学的基準の考え方について、以下に整理する。

#### (1) 自然過程を表すシナリオに適用される放射線学的基準

- ・ “自然過程” という用語には、個人の被ばくに至る人間侵入以外のすべての過程が含まれる。
- ・ 通常の被ばく状況における適用について線量拘束値 0.3 mSv/y (年あたり  $10^{-5}$  のオーダーのリスク拘束値に相当) を勧告する。
- ・ 拘束値が満足されるかどうか示すためのアプローチは、(i)線量と確率を組み合わせることによるリスクの統合 (統合アプローチ) か、または、(ii)それぞれの被ばくの状況について線量とそれに対応する生起確率を別個に表現する (線量／確率分解アプローチ) かのいずれかでありうる。

#### (2) 人間侵入に適用される放射線学的基準

- ・ 「人間侵入の発生を全く除外することはできないので、意思決定者は、一つまたはそれ以上の典型的なもっともらしい様式化された侵入シナリオの結果を、潜在的な侵入に対する埋設場の抵抗力を評価するために考察すべきである。」としている。
- ・ 「将来の人の行動の種類または確率を予測することは科学的な根拠が存在しないので、線量拘束値またはリスク拘束値と比較すべき定量的な性能評価の中に、そのような事象の確率を含めることは適切でない。」としている。
- ・ 人間侵入に適用される放射線学的規準としては、「おおよそ 10mSv の現存年線量が、それ以下では介入は正当化できそうもない一般的な参考レベルとして使え」、一方、「年あたり約 100mSv の現存年線量は、それを超えるとほとんどいつも介入は正当化されると考えるべき一般的な参考レベル」として示されている。
- ・ 「人間侵入に関連した被ばくの防護は、そのような事象の可能性を減らす努力によって最もよく達成される」として、設置深度や施設の頑健性、制度的管理の使用により、合理的な措置を実行すべきであるとしている。

## 2. 2 国際原子力機関 (IAEA)

### (1) 放射性廃棄物処分における評価時間と生物圏／決定グループとの関係

超長期の評価において、時間の経過とともに不確実性が增大する地表環境および人間の生活様式をどのように取り扱うかは重要な課題である。この点に関連して、TECDOC-1077<sup>3)</sup>において、処分後の期間と生物圏／決定グループとの関係が以下のように整理されている。

- ・ 処分後 0～100 年：現状の生物圏と施設からの通常放出の評価において考慮されるような実在のグループ
- ・ 処分後 10<sup>2</sup>～10<sup>4</sup>年：地域特有の生物圏もしくは様式化された生物圏と処分場が建設される地域特有の集団もしくは仮想的決定グループ
- ・ 処分後 10<sup>4</sup>～10<sup>6</sup>年：様式化された生物圏と仮想的決定グループ
- ・ 処分後 10<sup>6</sup>年以降：この時間枠においては、処分場性能の幅広い指標としての線量やリスクの計算は関連性がほとんどない。

時間の経過とともに増大する地表環境や人間生活の様式の変化、人間そのものの存在の不確実性に対処するために、レファレンスバイオスフィアの考え方等に基づく様式化された生物圏および仮想的決定グループを採用することが推奨されている。

### (2) レファレンスバイオスフィアの概念

IAEA の国際共同研究プロジェクト BIOMASS では、地表環境や人間の生活様式、活動の将来予測の不確実性に対処するため、様式化された生物圏モデルの構築手法としてのレファレンスバイオスフィア<sup>2-1</sup>の構築アプローチが検討された<sup>4)</sup>。レファレンスバイオスフィアの構築において重要な点は、人間生活の環境や様式に関する仮定を安全評価の目的に沿って整合性を取りながら合理的に設定し、処分システムから人間に到達する放射性物質の量や濃度を放射線量またはリスクに換算するための道具 (measuring instrument) として生物圏をとらえるということである。国内外の地層処分性能評価においても、本概念および構築アプローチを採用し、個人が受ける年間の放射線量やリスクを算出している事例が多くみられる。

生物圏モデルを構築するにあたっては、評価の前提条件 (Assessment context) として、評価の目的や評価指標、評価期間、将来の人間生活の環境や様式に関する仮定、生物圏の状態の変化を設定することが重要となる。特に、将来の人間生活の環境や様式に関する仮定や生物圏の状態の変化については、地表環境や被ばく経路の変遷をどのようにモデル化するか鍵となることから、規制要件や評価の目的と照らし合わせて、十分に検討する必要がある。

評価の前提条件に基づく生物圏の状態設定に関しては、以下の3つのステップで行われるべきことが示されている。

ステップ1：評価の前提条件を確認し、法令等に生物圏システムに関する規定がある場合には、あらかじめ指示された生物圏の状態を記述する。そうでない場合には、現在の生物圏の状態を参照し、生物圏システムの主要要素を同定・正当化する。

ステップ2：ステップ1で記述した生物圏の状態について、評価期間内での変遷を考慮するかどうかを検討する。考慮する場合には、変遷を生じさせるメカニズムを同定・正当化したうえで、生物圏システムに対する潜在的な影響を同定する。考慮しない場合には、現在の生物圏の状態を参照し、定常的な生物圏システムを記述する。

ステップ3：ステップ2において、システムの変遷を考慮した場合に限り、初期状態からの変化をどのように取り込むかを明確にする。システムの変遷を離散的に取り扱う場合には、該当する生物圏システムを複数選択し、それらを記述する。一方、連続的に取り扱う場合には、該当する生物圏システムの経時変化を記述する。

<sup>2-1</sup> 処分場に起因する放射性核種が生物圏に流入することによって生じると考えられる放射線影響について、計算する基盤を与えるために必要な仮定の集合<sup>4)</sup>

与えられた地表環境をモデル化するにあたっては、国際生物圏 FEP リストや相互作用マトリクスが用いられる。FEP リストには、生物圏評価において考慮すべき特質や事象、プロセスが網羅的に列挙されている。評価の前提条件に基づく FEP リストのスクリーニングにより、重要 FEP が抽出される。相互マトリクスには、生物圏評価において考慮すべき生物圏の構成要素（土壌や帯水層、河川・湖沼、海洋、人間等）が対角要素として、構成要素間の相互作用（固相・液相の移行、被ばくの形態）が非対角要素として記載されており、FEP のスクリーニングにより抽出されたプロセス（生物圏モデルにおいて核種移行プロセスや被ばく経路となるもの）を記載することにより、生物圏モデルを構築するにあたっての設計図として用いることができる。

### (3) 人間侵入シナリオ

TECDOC-1077<sup>3)</sup>では、人間侵入シナリオにおける被ばくの形態について、以下の2つが定義されている。

- ・ 侵入者自身の被ばく
- ・ 侵入により処分場から放出された放射性核種による侵入者以外の被ばく

地層処分においては、ボーリングコア観察の作業者が高い放射線量による確定的影響を受け、決定グループとなると記述されている。

### 3. 各国の安全基準・指針類および性能評価報告書における自然過程シナリオの取り扱い

#### 3. 1 スウェーデン

##### (1)安全基準・指針類における規定内容

スウェーデン放射線防護機関（SSI）の「使用済燃料及び原子力廃棄物の管理に係わる人間健康および環境の保護に関する規則の適用に関するガイドライン（以下、SSIFS 2005:5）」<sup>12)</sup>では、生物圏条件及び被ばく経路について下記の記述がある。

「人間及び環境に生じる影響の計算に用いられる将来の生物圏条件の選択は、想定された気候の状態に適合した形で実施されなければならない。しかし、それが明らかに不合理なものでない限り、処分場及びその環境における現時点での生物圏条件が評価されるべきである。その例として、農地、森林、湿地（沼地）、湖、海またはその他の該当する生態系などが挙げられる。さらに、土地の隆起（または沈降）及びその他の予想可能な変化も考慮される必要がある。

リスク解析には、限定された数の被ばく経路が含まれる可能性があるが、これらの経路の選択は、現時点でのスウェーデンの環境及びそこに存在する可能性のある天然資源を対象とした人間の利用方法の多様性に関する分析に基づいたものでなければならない。さらに様々な個人が、いくつもの生態系の範囲内において、またこれらの生態系の間で、複合的な被ばく経路の影響を受ける可能性についても考慮しなければならない。」

##### (2)性能評価報告書における取り扱い

原子力発電会社が共同出資して設立した処分実施主体である、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）が作成した SR-Can プロジェクト報告書<sup>9)</sup>（以下、SR-Can 報告書）では、Forsmark, Laxemar とともに、氷期-間氷期サイクルに伴う気候の変遷を考慮し、期間ごとに生物圏の変遷とそれに伴う人間活動の変化を想定している。たとえば、閉鎖後の最初の 1,000 年間におけるサイトの生物圏は、両サイトともに現在の状況とかなり類似するものと仮定されると記述されている。また、1,000 年後以降は、気候変動に伴う地形の変化や水収支量の変化により、永久凍土、氷河状態になることを考慮して、生物圏が大きく変化することを想定している。このような変遷の考え方を受けて、生物圏のモデル化におけるサイトの地表環境および人間の生活様式の詳細が SR-Can 報告書をサポートする報告書<sup>13), 14)</sup>に記述されている。また、これらの記述を受けて、地形モデル（Landscape model）を構築する手順が以下のように定められている。

- (1) 土地利用図上において、可能性のある放出点（Discharge Points (DP)）の可視化
- (2) 地図上で DP のクラスターを特定の生態系に割り当て、生物圏構成要素（Biosphere Object）の領域の特定
- (3) 現在および将来の排水パターンに基づく生物圏構成要素の結びつけによる地形モデルの構築
- (4) それぞれの生物圏構成要素の時間的変遷の記述
- (5) それぞれのタイムステップにおける構成要素特有のパラメータを用いたデータベースの作成

サイトの地表環境および人間の生活様式の詳細記述に関しては、例えば、Forsmark における 1,000 年後から当初温暖期終了時までの生物圏の変遷としては、海岸線の変位が継続すると仮定して、局所的な生物圏に影響が及び、最終的には、サイトが海岸ではなく内陸に位置するような状況が発生すると仮定している。また、海岸線までの距離が長くなるにつれて、漁業区域が縮小すると仮定される。新たに生じた土地は、当初は、農耕に適さないとされるが、時間が経過するにつれて、林業、野生動物の狩猟、家畜の飼育、きのこ・ベリー類の採集に適した土地になると仮定される。Laxemar における 1,000 年後から当初温暖期終了時までの生物圏の変遷としては、紀元 4,000 年には、Äspö の北と南の湾が、海や大きな湖から隔離され、海岸でなくなり、処分場周辺で陸地の地形が支配的になると仮定される。処分場の近くの区域のほとんどは、農業用地となると仮定される。永久凍土の期間においては、蒸発量が限られていることから、降水量が減少すると仮定される。また、土壌が泥炭質となり、植物生産性が低くなると仮定される。氷河状態においては、ほとんどの領域が氷に覆われ、汚染された地下水と人間が接触する機会はないであろうとされている。なお、集団が海岸に沿う氷の周縁に近く長期間居住し、魚を常

食とすることが考えられるが、水の交換（ターンオーバー）が頻繁であり、核種が長期に蓄積するとは考えにくいとされている。

さらに、温室効果ガスによる温暖化に起因する気候の変化または変動を考慮した場合には、水文循環、海水準、バルト海の塩分濃度等、生物圏における重要なパラメータに影響を与えることが予想される。しかしながら、温度上昇が植生に及ぼす影響は小さいと予想されている。

一方、人間の生活様式に関しては、上記の気候変動による生物圏の変遷に伴う人間活動の変化を考慮しつつ、いずれのシナリオにおいても、110 kgC/年に相当する食物を摂取すること、人間は汚染された土地で生産された食物をすべて摂取（すなわち、地域の資源を合理的に最大限使用し、最も汚染された地形を利用）することを想定している。

気候状態の変化が地形線量係数（Landscape dose factor；以下、LDF）<sup>3.1-1)</sup>に与える影響について例示した結果、最も実効線量が高くなるのは永久凍土状態下であった（支配核種は Ra-226）。温暖化気候の LDF は、温暖気候における LDF よりも少し低い結果となった（支配核種は、Ra-226 と I-129）。

### 3. 2 スイス

#### (1)安全基準・指針類における規定内容

原子力施設安全本部（HSK）の「放射性廃棄物処分に関する防護の目標（以下、HSK-R-21）」<sup>15)</sup>では、「遠い将来に関する線量計算は、定義された人間集団の放射線被ばくの実効的な予測とみなすべきではない。それらは、実際、放射性核種の生物圏中への潜在放出の影響を評価するための指標として見なされることがほとんどである。」「こうした計算を行うために、レファレンス生物圏及び現在の現実的な生活習慣を有した、潜在的な影響を受ける可能性のある人間集団を仮定すべきである。」と記述している。

連邦原子力安全検査局（ENSI）<sup>3.2-1)</sup>の「地層処分場の設計原則とセーフティケースに関する要件（2009年4月2日付、以下、ENSI-G03）」<sup>16)</sup>では、遠い将来における地表の状況に関する予測は、現時点で想定される仮定に基づいて行うものとして、以下のことを行うべきとしている。

- ・ 気候変動が地層処分場の長期安全性に与える影響の調査
- ・ 電離放射線が人間に与える影響については、今日の知見に基づいて判断
- ・ 人間の行動によって地層処分場の安全性に影響を受けるシナリオについては、現在の社会で妥当と想定される視点を採用

#### (2)性能評価報告書における取り扱い

放射性廃棄物の発生者である原子力発電所を所有・運転する電力会社などが共同で設立した、放射性廃棄物管理共同組合（Nagra）が作成した Opalinus Clay プロジェクト報告書<sup>5)</sup>（以下、Opalinus Clay 報告書）では、長期安全評価における生物圏の役割とその取扱いについて、国際的に議論されたアプローチを採用し、生物圏の評価をバリアシステムの評価と分離すること、生物圏に関するさまざまな信頼できる実例を示して生物圏に関わる不確実性を探求することを言及している。あくまで、生物圏は、バリアシステムからの核種放出を放射線量に換算するための「ものさし」を提供する場であることが強調されている。

将来の人間生活の取扱いについては、「現在の評価では、処分場の存在の結果および現在の生活習慣や食習慣を仮定した場合に、最大の線量を受ける可能性のある個人あるいは集団を代表するものとして選定された仮想的な決定グループの平均的構成員に対する線量が算出される。線量の計算値は、将来の実際の線量の見積もりよりもむしろ、防護のレベルを表す指標とみなされる（ICRP Publication 81<sup>1), 2)</sup>を参照。）」と記述されている。

<sup>3.1-1)</sup> SR-Can 報告書では、人間が受ける放射線量を評価するために、地形モデル（Landscape model）を用いている。地形モデルでは、地表環境を複数の地形対象（landscape object；例えば、森、湖、海等）がつながったものとして表現し、水文地質学的解析の結果に基づき、核種放出域を同定している（複数の地形対象が核種放出域となる可能性がある）。この地形モデルに基づき算出した線量係数（処分場からの核種放出率を人間が受ける放射線量に変換する係数）を地形線量係数（Landscape dose factor）という。

<sup>3.2-1)</sup> 連邦エネルギー庁（BFE）の一部であった原子力施設安全本部（HSK）が2009年に連邦原子力安全検査局（ENSI）として独立した。

これらのことから、地表環境および人間の生活様式については、保守的な仮定に基づき、現在の地形や水理、気候条件を考慮して、現在の知見に基づく設定をすることとしている。また、代替的な地形および気候条件を考慮したいくつかのケースにおいて、生物圏における核種移行の感度についても例証されており、地表環境の特徴や変遷に対するさまざまな様式化の可能性を用いることにより、生物圏に関する不確実性の影響を例示している。

具体的には、処分場からの核種が、オパリナス・クレイの上方及び下方の帯水層内の深部地下水の移流によって地表環境に到達することを想定し、深部地下水の排出先として考えられる場所として以下を挙げている。

- ・ Malm 帯水層中での横方向移行の場合には、ライン滝下部のライン溪谷
- ・ Wedelsandstein 中での横方向移行の場合には、さらに下流のライン溪谷
- ・ Sandsteinkeuper 中での横方向移行の場合には、Klettgau 帯水層
- ・ Muschelkalk 帯水層中での横方向移行の場合には、アーレ川とライン川の合流点近傍領域

その他、気候、土壌の性質および自然環境（植生）、人間の居住場所と職業、土地利用、水資源とその利用についても、現在の知見に基づく設定をしている。例えば、食生活は野菜、穀物、果物、ミルク及び乳製品、肉類、卵、魚類及び水で構成される。人間の飲料水は第四紀帯水層中の井戸から、あるいは、代替ケースでは、Malm 層からの深部地下水が流出する谷の斜面の泉からあるいは Malm 帯水層中に掘られた深井戸から汲み上げられる。現在の農業習慣と異なり、将来についてはローカルな食料生産が仮定される。決定グループの構成員は、考察対象とされる生物圏地域の中でその全生涯を送ると仮定されることから、摂取、吸入及び外部被ばくによる線量は、現実的に予測される線量よりも高くなることが考えられる。地表環境の地形および水理条件は気候変動によってコントロールされる。気候の影響を受ける関連プロセスとして、降水、蒸発散、氷食及び河食、地下水流れ、毛管上昇そして汚染物質の希釈がある。地表環境における気候およびそれに伴う局所的な地形／水理条件として考えられるケースを、気候レジーム（氷期／間氷期の繰り返し、もしくは、10 万年周期での Milankovitch サイクル）、気候状態（間氷期、周氷河気候、氷期）、狭域地形ユニット（浸食河川、網状河川、蛇行河川、湖沼内河川三角州、湖沼、湿地帯）の組み合わせで表現し、狭域地形ユニットの出現可能性や地下水面から地表までの代表的な距離等を設定している。なお、狭域地形ユニットの一部（網状河川、蛇行河川、湖沼内河川三角州）については、水理条件に関して類似の特性を示すことから、ある単一のモデル区域 (sedimentation area) として表現することができるとしている。

予測される地表環境の変化として、氷期／間氷期の繰り返しは後百万年間持続すると予測されている。現在のような穏やかな温度の間氷期は寒期によって中断され、局所的に永久凍土が形成され、スイス北部の一部は氷で覆われる可能性があるとして想定している。また、将来の人間生活に関する仮定としては、氷期における周氷河地域では、自然及び半自然の生態系が広まることから、食料の生産率は間氷期の場合よりもかなり低下するであろうと想定される。そのため、同じ数の人間に対する食料を生産するために、かなり広い地域が必要となり、食物中の平均放射能濃度は低くなることが想定される。

以上の記述を踏まえて、地形および気候の変化を考慮した生物圏モデルを構築した。地形については、レファレンス地形と代替地形（堆積領域、湿地帯、谷の斜面の湧水への排出）を想定している。また、気候の変化については、現在の温暖気候と代替気候（現在の気候よりも乾燥／温暖、現在の気候よりも湿潤／温暖、周氷河気候）を想定している。なお、気候の変遷に関しては、線量を例示し、レファレンス状態と比較するための離散的な取り扱いをしている。

放射線量の変動に関しては、以下の結果が得られている。代替地形における線量は、レファレンス地形のものと比較して、同程度か低い値が得られた。気候の変化に関しては、代替気候のひとつ（現在の気候よりも乾燥／温暖）が最も線量が高く、それ以外は、現在の温暖気候と同程度か低い値が得られた。

### 3. 3 ベルギー

#### (1)安全基準・指針類における規定内容

規制機関であるフランス原子力安全機関 (ASN) とベルギー連邦原子力管理庁 (FANC) ならびに関連研究機関等が協力して、放射性廃棄物の地層処分に関わる安全性アプローチについての文書を 2004

年に公表した<sup>17)</sup>。これは、フランスとベルギーの協力体制の一環として実施された共同作業から生まれたものであり、特定の規制および／またはレファレンス文書に取って代わるものではないが、ベルギーにおける放射性廃棄物処分の規制に関わる基本的な考え方を読み取る資料として有効である。

被ばく評価シナリオを構築するにあたっては、IAEA BIOMASS プロジェクトで提唱されたアプローチに基づき、レファレンスバイオスフィアおよび合理的に保守的な仮定に基づく決定グループを定義することが最適であるとしている。

## (2)性能評価報告書における取り扱い

ベルギーにおける高レベル放射性廃棄物処分の実施主体である、ベルギー放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関（ONDRAF/NIRAS）が作成した安全評価・実現可能性第2次中間報告書 SAFIR2<sup>18)</sup>（以下、SAFIR2）では、生物圏に関して、下記の記述がある（11.3.10章）。

生物圏のモデル化の目的は、被ばくグループに対して、処分場から生物圏への放射性核種放出による放射線影響を評価することである。安全評価において、処分場に起因する将来の影響を過小評価しないために、サイトの変遷や人間の被ばくに関して以下のような記述がされている。

- ・ 0年～500年：処分場の存在はまだ認知されているため、好ましくない人間侵入は起こらないと仮定できる。
- ・ 500年～2万年：人間侵入の可能性を除外することはできない。水理はまだ現在と同様だが、人為的行為によって引き起こされる気候変動が地下水流動に影響する可能性がある。ニアフィールドでは、いくつかの構成要素が劣化し、地下水が廃棄体中の放射性核種と接触する可能性がある。天然バリアに著しい変化は生じない。
- ・ 2万年～10万年：この時間枠内では、Milankovitchの軌道理論にしたがって約24,000年後に中程度の、約56,000年後には厳しい氷期が到来すると予測される。氷期は水理にかなり影響し、核種移行のシミュレーションに不確実性が生じる。天然バリアの変化は比較的小さい。
- ・ 10万年～100万年：氷期と間氷期が続き、地殻変動によって地形が完全に変化する。しかしながら、天然バリアは依然として重要な閉じ込め機能を維持するものと期待することができる。
- ・ 100万年以降：この時間スケールでは、テクトニクスや、変性作用、続成作用及び地形学的プロセスによって、天然バリアの特性は大きく変化するであろう。この時間スケールに対して行われる評価の目的は、廃棄物処分の極めて長期的な結果として、著しい放射線影響が予測されないことを定性的に判断することである。

約2万年までは、帯水層や生物圏へのフラックスの定量計算を正当化することができ、この期間内で生じる生物圏での不確実性は、レファレンスバイオスフィアの使用により補償されると記述されている。

線量評価シナリオとしては、通常変遷シナリオ（normal evolution scenarios）と代替変遷シナリオ（alternative or altered evolution scenarios）が考慮されている。通常変遷シナリオには、生物圏の状態変化を考慮する場合と、考慮しない場合が想定されている。また、放射性核種が帯水層中を移行した後に流入する生物圏内の媒体として、生物圏受容体（レセプタ）が定義されており、例として、井戸、表層水（河川あるいは湖沼）、土壌などがある。こうした生物圏レセプタから、あらゆる種類の自然プロセスおよび人間活動によって放射性核種が生物圏中に分散し、特定の媒体中に蓄積される。そうした汚染媒体の存在によって、あるいは汚染媒体を利用することによって、人間が被ばくする。被ばく経路としては、汚染した食物あるいは水の摂取、汚染した空気の吸入、汚染した土壌、水あるいは堆積物からの外部被ばくが考慮される。一方、代替変遷シナリオでは、それが起こるかどうかは不確実であるが、もし起こった場合にはかなりの被ばくをもたらさうような擾乱事象（例えば、破壊的な変化）を取り扱っている（詳細は4.3に記述）。

生物圏の変化として、被ばくグループの慣習や活動の変化は重要であり、これは数十年あるいは数百年以内にも起こり得るものである。関連する変化としては、例えば、農業技術の変化や人間の生活習慣及び食習慣の変化がある。しかしながら、こうした変化のほとんどは予測が難しく、定量化はさらに困難である。したがって、通常変遷シナリオの一部では、現在の環境条件が変わらないまま継続するという仮定が用いられている。

通常変遷シナリオの解析では、氷期及び温暖化の結果生じ得るいくつかの気候タイプに関する検討も

あわせて行われている。生物圏の変化を伴う通常変遷シナリオとしては、気候変動が考慮されており、500年から2万年の間は、温室効果の影響で、温暖気候（地中海タイプ）、2万年から10万年の間は、寒冷気候（冷帯タイプ）および極寒気候（周氷河タイプ）を想定している。10万年以降は、非常に大きな変化（氷期と間氷期の連続、地殻運動）が起こり、上述した生物圏モデルは適用できなくなるであろうと述べられている。

気候変動は、生物圏のレセプタとその特性、生物圏のコンパートメント間の移行パラメータ、被ばくグループの居住地と被ばく経路に対して影響を及ぼす可能性があり、特に、水収支（降水量、蒸発散量、灌漑、浸透率）に大きく影響することが述べられている。しかしながら、気候変動による変遷を考慮できるだけの十分な知見が得られていないため、気候変動に関する研究をさらに行う必要があるとしている。したがって、生物圏の変化を伴う通常変遷シナリオに関しては、放射線量の算出結果が示されていない。

### 3. 4 米国

#### (1)安全基準・指針類における規定内容

地層処分に適用される 10 CFR Part 63「ネバダ州ユッカマウンテンの地層処分場における高レベル放射性廃棄物の処分」<sup>19)</sup>においては、要求されるレファレンスバイオスフィアの特徴について、レファレンスバイオスフィアを記述する特徴、事象、プロセス（FEP）はユッカマウンテンサイト周辺地域の現時点での知見と一致したものであること（305(a)）、社会、生物圏（気候変動を除く）、人間生物学あるいは人間の知識や技術の増減についての変化を予測しないこと（305(b)）を考慮すべきとしている。

また、合理的に最大の被ばくを受ける個人（reasonably maximally exposed individual）については、ネバダ州アマゴサバレー地域に現在住む人々を代表する食習慣や生活様式を有すること（312(b)）、平均的な放射性核種濃度の井戸水を摂取すること（312(c)）、現在の成人と一致する代謝学および生理学的事項を有する成人であること（312(d)）が想定されている。（括弧内の数字とアルファベットは、それぞれ記述箇所を示す。）

#### (2)性能評価報告書における取り扱い

Yucca Mountain 処分場の許認可申請用報告書<sup>8)</sup>（以下、YMP-LA）では、10 CFR Part 63において要求される規制要件（生物圏の状態と被ばくを受ける個人の状態）に従い、ユッカマウンテンサイト周辺地域の現時点での状態が継続することを想定し、合理的に最大の被ばくを受ける個人（reasonably maximally exposed individual）が受ける放射線影響を算出するため、通常シナリオクラスにおいては、地下水の揚水を経由した飽和領域を通る生物圏への核種放出と、それに伴う合理的に最大の被ばくを受ける個人の在住場所における人々の吸入、経口摂取及び水の摂取を考慮している。また、火成活動シナリオにおいては、火山噴火による灰の分散による空気を通じた生物圏への核種放出と、それに伴う人間による火山灰の吸入を考慮している。

具体的には、地下水被ばくシナリオでは、放射性核種を含む地下水が井戸によって揚水されることによって、生物圏に放出され、合理的に最大の被ばくを受ける個人（reasonably maximally exposed individual）が、家庭用もしくは農業用に井戸水を利用することにより、地下水、地下水によって灌漑された土壌および作物等の6つの環境媒体中における放射性核種によって被ばくすることを想定している。地下水被ばくシナリオにおける核種移行経路としては、環境媒体間の物質移行を考慮して、灌漑、浸透等の液相による移行、侵食、再浮遊等の固相による移行、農作物における核種移行（経根吸収やウェザリング等）、家畜および魚への移行等を想定している。地下水被ばくシナリオにおける被ばく経路としては、環境媒体からの経口摂取（水、土壌、食物）、吸入摂取（浮遊粒子、ガス（<sup>222</sup>Rn とその娘核種、<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>）、蒸発冷却器からのエアロゾル）、外部被ばく（土壌）を想定している。

また、火山灰被ばくシナリオでは、地下水被ばくシナリオと同様の生物圏およびレセプタの特性を考慮しているものの、放射性核種のソースは、処分場に含まれる放射性核種が付着し、噴火により生物圏にもたらされた火山灰である。火山灰被ばくシナリオにおける核種移行経路としては、火山灰の沈着による土壌への蓄積と、それにより汚染させた土壌から作物への移行等を想定している。火山灰被ばくシナリオにおける被ばく経路に関しては、環境媒体からの経口摂取（農作物、畜産物）、吸入摂取（浮遊

粒子およびガス ( $^{222}\text{Rn}$  とその娘核種)、外部被ばく (土壌) を想定している。

なお、人間活動による気候変動は、規制に示された指針により除外されている<sup>8)</sup>。また、気候変動による不飽和領域の流動、人工バリア中熱-水環境、人工バリア中化学環境、坑道スケールでの浸漏、人工バリア中の流動および移行、不飽和領域移行、さらには飽和領域流動および移行に関する影響を考慮することが記述されているが、生物圏において人間が受ける放射線量を算出する場合には、現在の気候が継続することを仮定するとしている。

### 3. 5 フランス

#### (1)安全基準・指針類における規定内容<sup>3.5-1)</sup>

原子力安全機関 (ASN) の「放射性廃棄物の地層処分場に関する安全指針」<sup>20)</sup>では、生物圏の変遷に関して以下の記述がある。「非常に長い期間について生物圏の局所的な変遷を予測することは可能であるとは思われない。これに反して、予測可能な地域的な主要気候事象を考慮して生物圏をより大規模に捉えることができると考えられる様々な状態を代表する生物圏タイプという概念を用いることによって、考慮することができるであろう。また、放射線影響の計算においては、最大の被ばくを受ける可能性のある個人を代表するいくつかの仮説的基準グループを考慮する。これらの個人は、少なくとも部分的には自給自足生活をしていると仮定する。」

#### (2)性能評価報告書における取り扱い

産業省、研究省、環境省の監督のもとに商工業的性格を有する公社として設置され、地層処分の研究開発 (地下研究所を含む) を主に実施している放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) が、2005 年にとりまとめた地層処分場の計画を含めた最終報告書 DOSSIER2005<sup>6),7)</sup> (以下、DOSSIER2005) では、生物圏のモデル化に関して、下記の記述がある。

堆積岩サイトにおける評価<sup>6)</sup>では、通常シナリオにおける生物圏のモデル化にあたっては、IAEA BIOMASS プロジェクトが提唱したレファレンスバイオスフィアの構築アプローチ<sup>4)</sup>を採用している。Meuse/Haute-Marne では、今後 100 万年程度で、温暖/冷帯/ツンドラ気候に適する農業活動を想定して、被ばくグループを想定しており、決定グループには、温暖気候における村在住の農作業従事者 (自宅の井戸を利用して農作物の生育および家畜の飼育を行い、その井戸水を飲むことを想定) が定義されている。また、気候変動を考慮する場合 (冷帯/ツンドラ気候) には、世界中に現存する気候状態をアナログとして利用している (具体的には、ツンドラ気候については、アメリカ北部やヨーロッパ北部、シベリア、冷帯気候については、北緯 50~60 度あたりに広がる地域)。評価の結果、氷河気候に暮らす決定グループの方がレファレンス条件として採用された決定グループより被ばく量が少ないことが確認されたため、「温暖」気候タイプの生物圏を選択している。一方、花崗岩サイトにおける評価<sup>7)</sup>では、BIOCLIM プロジェクトで定義された気象に関わるシナリオ (約 10 万年のサイクルで、氷河期と間氷期が交互に反復されると想定) を引用しつつも、ジェネリックなサイトを想定する段階での評価は困難であるとして無視している (生物圏評価および線量計算未実施)。

<sup>3.5-1)</sup> 原典 (ASN, 2008) がフランス語で書かれているため、原子力安全委員会第二種廃棄物物理設分科会資料<sup>21)</sup>を参照した。

## 4. 各国の安全基準・指針類および性能評価報告書における人間侵入シナリオの取り扱い

### 4. 1 スウェーデン

#### (1)安全基準・指針類における規定内容

SSIFS 2005:5<sup>12)</sup>では、将来の人為的行為として、ボーリングによる直接的侵入、及び安全評価における安全機能に間接的影響を及ぼす各種活動例を導入することを勧告している。また、現在の習慣と技術的行為に基づく将来の人的活動シナリオの作成も推奨している。その影響に関しては、SSI では、処分場損傷による放出線量のみを算定する必要があると考えている。なお、処分場への侵入者に対する直接的な影響の考慮は不要であるとされている。

#### (2)性能評価報告書における取り扱い

SR-Can 報告書<sup>9)</sup>では、人間侵入に関して下記の記述がある。

##### (a)処分場に影響を及ぼす可能性のある人為的行為を抽出するための方法論

技術的・社会的要因分析、代表的ケースの選定、選定されたケースのシナリオ作成と影響解析の手順で将来の人為的行為の様式化を行った。

SR-Can 報告書に記述されているシナリオ選定法によれば、将来の人間活動（(FHA, Future Human Actions)）に関連のあるシナリオは、密封処分場に関連のあるシナリオと、非密封または不完全密封処分場に関連のあるシナリオという 2 種類に大別されている。時間的制約があるため、SR-Can プロジェクトでは前者のシナリオのみを扱うとされている。

SR-Can の安全評価における将来の人間活動を取り扱った報告書<sup>22)</sup>（以下、FHA 報告書）では、処分場に対する人間活動の影響及びその結果は、技術的要因と社会的要因が結合した結果であると記述している。FHA 報告書では、処分場に影響を及ぼす可能性のある人間活動のできるかぎり包括的な将来像を提供するために、次のような手法が採用されてきた。

##### A.技術的分析：

処分場の安全機能に影響を及ぼす可能性のある人間活動を特定し、そうした行為を技術的視点から説明かつ正当化する。

##### B.社会的要因の分析：

処分場の放射線安全性に影響を及ぼす将来の人間活動に対する実現可能な社会的関係を描いたフレームワークシナリオを特定する。

##### C.代表的ケースの選定：

技術的分析結果と社会的要因の分析結果を統合化し、将来の人間活動を解明するケースを 1 件または数件選定する。

##### D.選定されたケースのシナリオ作成と影響解析：

最初の 3 段階は FHA 報告書で報告されており、主として SR-Can 報告書での評価に先立って行われた SR-97 報告書での評価<sup>23)</sup>と合わせて実施される作業に基づくものである。

**ステップ A (技術的分析)** では、SR-97 の枠組みにおいて実施されたワークショップの結果に基づき、処分場に影響を及ぼすおそれのある人間活動のリストが作成された。このリストにおいて、人間活動は、熱的影響 (T)、水理的影響 (H)、力学的影響 (M)、化学的影響 (C) の観点から分類した。

なお、本ワークショップは、FHA に関するシナリオ選定を支援すること、性能評価において FHA を取り扱うための戦略を立てることに寄与することを目的として開催された。ワークショップの参加者には、SKB において、性能評価研究に関わる専門家のみならず、大学等における社会経済学や言語学の専門家、人と科学技術の学際的研究に関わる専門家等が含まれ、人文的および社会経済学的問題を取り扱

うことができるメンバーが選出された。FHA を取り扱うための適切な戦略によって、安全評価に含まれるべき、人間活動に基づく一連のシナリオの選定、正当化、記述に対する系統的で包括的なアプローチを提供しなければならないとされており、推測を避け、できる限り、文書化された歴史的視点もしくは社会学的な知見に基づき、シナリオを作成することが望ましいと述べられている。ワークショップにおける議論と結論から、FHA の分析結果を技術的および社会的要素に分類し、安全評価に含まれるべき代表的なケースの選定と組み合わせることができるような結果をもたらすことが説明されている。

**ステップ B (社会的要因の分析)** では、処分場の安全性を損なう不注意による人間活動発生の可能性とその影響の評価にとって重要な人文的問題や社会経済学的問題が分析された。処分場の放射線安全性に影響を与える将来の人間活動のもっともらしい社会的関係を示すフレームワークシナリオも作成された。

**ステップ C (代表的ケースの選定)** では、ステップ A で挙げた行為を分析し、地上や、地下数十メートルの地表近くで実施される行為は、人工バリアや燃料の隔離に直接影響を与えない行為や、廃棄物の隔離に影響を及ぼす可能性がない行為を分類した。一方、影響を与える行為として、隔離を破りうる行為、深地処分場のすぐ上か、ごく近くで実施し、岩盤内でのボーリングを伴う行為<sup>4.1-1)</sup>を分類した。以上の分類および現行の人間活動を考慮して、「ボーリングによるキャニスタの貫通」、「処分場近くの地下施設<sup>4.1-2)</sup>」、「フォルスマルクサイト近くの鉱山」という 3 ケースを代表的ケースとして選定した。

**ステップ D (選定されたケースのシナリオ作成と影響解析)** では、「ボーリングによるキャニスタの貫通」、「処分場近くの地下施設」、「フォルスマルクサイト近くの鉱山」について解析ケースを設定し、人間に対する影響を評価した。なお、解析に用いたデータは、既存の報告書等を参照して設定した。廃棄物の性質（インベントリや燃料転換率等）については、SR-Can における前提条件に基づき設定されており、被ばく線量算出のための人間活動に関わるパラメータ（呼吸量や実効線量係数、ダスト濃度等）については、ICRP または IAEA で推奨されたデータが採用されている。また、水理パラメータ（ここでは処分孔を通過する地下水流量）については現在のサイトスペシフィックなデータが用いられている。さらに、ボーリング活動に関わるパラメータ（汚染領域や掘削孔・コアの形状等）については、専門家の判断により設定されている。

#### (b) 上記方法論に基づく分析によって抽出された代表的ケースの例

代表的ケースとして以下の 3 つが選定された。

- ・ ボーリングによるキャニスタの貫通（処分場の開放、核種移行遅延効果の消失、井戸の利用）
- ・ 処分場近くの地下施設
- ・ フォルスマルクサイト近くの鉱山

#### (c) 選定されたケースのシナリオ作成と影響解析

上記の 3 ケースについて、人間に対する影響を評価した。なお、解析に用いたデータは、既存の報告書等を参照して設定した。廃棄物の性質（インベントリや燃料転換率等）については、SR-Can における前提条件に基づき設定されており、被ばく線量算出のための人間活動に関わるパラメータ（呼吸量や実効線量係数、ダスト濃度等）については、ICRP または IAEA で推奨されたデータが採用されている。また、水理パラメータ（ここでは処分孔を通過する地下水流量）については現在のサイトスペシフィックなデータが用いられている。さらに、ボーリング活動に関わるパラメータ（汚染領域や掘削孔・コア

4.1-1) 岩盤内でのボーリングを伴う行為のひとつとして挙げられている、「露天掘りの鉱山と採石場」では、ボーリングや深所での岩盤作業を伴うこともあるとしている。

4.1-2) SR-Can プロジェクト報告書には、「現在の技術と経済に基づけば、数百年以上という、もう少し長期の展望では、知識、技術、社会がどのように発展するのか、また、地下施設がどこに、どのようにして、なぜ建設されるのかを予測するのは困難である。現在の行為に基づく、地下約 50 m までの深度の地下施設が建設される可能性はきわめて高く、両候補サイトでは現に建設されている（フォルスマルクの SFR 施設とオスカーシャムの Clab 施設）。遠い将来には、フォルスマルク調査区域から南西地域で鉱石資源探査が実施されるかもしれない。」という記述がある。

の形状等)については、専門家の判断により設定されている。

なお、「ボーリングによるキャニスタの貫通」における線量評価結果に関しては、Forsmark での線量評価結果は、評価期間全体 (100~1,000,000 年)において、線量基準 (年間リスク  $10^{-6}$ 、実効線量に換算すると約  $1.4 \times 10^{-5}$  Sv/y; 自然過程シナリオに適用されている基準値)をほぼ下回った。一方、Laxemar での結果は、約 20,000 年以降に侵入事象が起きたとすれば、線量基準を下回る結果となった。また、地上に残された切りくずから受ける線量 (摂取, 吸入, 外部被ばく) の総量は、評価期間全体 (100~1,000,000 年) にわたって、自然バックグラウンドを超えているうえに、400 年頃までは 1Sv を超える結果となった。なお、SSI のガイダンスに基づき、人間侵入シナリオに関しては、評価期間全体にわたるリスク総和の算出から除外されている。

「処分場近くの地下施設」および「フォルスマルクサイト近くの鉱山」に関しては、シナリオ分析の結果、それらの行為が行われたとしても、設計要件が満たされる、もしくは、処分場の安全機能に影響を及ぼさないと結論付けられた。

## 4. 2 スイス

### (1)安全基準・指針類における規定内容

ENSI-G03<sup>16)</sup>において、「人間の行動によって地層処分場の安全性に影響を受けるシナリオについては、現在の社会で妥当と想定される視点を採用すべきである」との記述があるものの、処分場への人間の意図的な侵入については、シナリオとして考慮する必要がないことを示している。

シナリオ開発については、現在の一般的な人間の行為に基づき様式化することとしている。

### (2)性能評価報告書における取り扱い

Opalinus Clay 報告書<sup>5)</sup>では、人間侵入に関して、下記の記述がある。

#### (a)処分場に影響を及ぼす可能性のある人為的行為を抽出するための方法論

安全評価において言及すべき事象や不確実性にしたがって、評価すべきシナリオを列挙している。この中で、人間侵入に関わるシナリオは Alternative Scenario 2 として取り扱われている。代表的なケースについては、(b)で述べる。

#### (b)上記方法論に基づく分析によって抽出された代表的ケースの例

人為的行為の影響による核種放出シナリオとして、掘削孔の貫通、Malm 帯水層からの深部地下水の揚水、放棄された処分場が考慮されている。

#### (c)選定されたケースのシナリオ作成と影響解析

「掘削孔の貫通」シナリオでは、将来の試掘活動の過程で、掘削孔が処分場を貫通すると仮定され、掘削作業員の被ばくのほかに、ある期間、処分場から (あるいは、最も極端なケースでは、使用済燃料のキャニスタから) 生物圏に至る直接的な経路ができることによって長期の安全性に影響を受ける可能性があるとして想定している。具体的な貫通経路として、以下の3つを想定し、「掘削孔の貫通」シナリオとして線量評価している (「掘削作業員の被ばく」については、線量計算未実施)。

- ・ 掘削孔が使用済燃料 (SF) / 高レベル放射性廃棄物 (HLW) 定置坑道の2体のキャニスタの間を貫通
- ・ 掘削孔が1体の使用済燃料 (SF) キャニスタを貫通する (直撃)
- ・ 掘削孔が中レベル放射性廃棄物 (ILW) -1 定置坑道を貫通する (直撃)

SF および HLW に関しては、ニアフィールド/地圏の境界の流量以外は、レファレンス状態のニアフィールドが仮定されている。ILW に関しては、拡散バリアの喪失を想定している。「掘削孔の貫通」

シナリオにおける人間が受ける線量は、レファレンスケースと比較して同等（SF）か、1桁強大きくなる（HLW, ILW）が、パラメータの不確実性を考慮したとしても、いずれの場合も線量拘束値（0.1 mSv/y）を超えることはなかった。

「Malm 帯水層からの深部地下水の揚水」シナリオでは、生物圏への核種放出が第四紀帯水層ではなく、飲料水の汲み上げに用いられる Malm 帯水層内の深井戸に起こることを想定している。Malm 帯水層内に放出された核種が井戸から揚水される割合に関しては大きな不確実性があるため、その割合を 10～100%と仮定して、不確実性を考慮した検討を行っている。Malm 帯水層から揚水された飲料水の摂取によって人間が受ける線量は、レファレンスケースの線量よりも約 5 桁低くなった。

「放棄された処分場」シナリオでは、アクセス坑道の適切な埋め戻し／密封を行うことなく、観測期間中に処分場が放棄される（開放部分の保守は行われぬ）ことを仮定した点がレファレンスケースと異なる。主施設もしくはパイロット施設内に定置された廃棄物パッケージと坑道放棄部分の間の、適切に埋め戻し／密封されたセグメントが水の流れおよび核種移行に対する有効なバリアを提供し、大部分の放射性核種はアクセス坑道システムの放棄された部分に達する前に崩壊する。放射性崩壊することなく、放棄された坑道セグメントに達する放射性核種は、瞬時に Wedelsandstein 累層に放出されると保守的に仮定される。Wedelsandstein 累層に達した放射性核種は生物圏（レファレンスケースと同様の想定）に瞬時に移行する。「放棄された処分場」シナリオにおいて人間が受ける線量は、レファレンスケースの線量とほぼ同じであり、密封された坑道セグメントのバリアの有効性が大きいことにより、処分場の性能が保たれていることを示している。

#### 4. 3 ベルギー

##### (1)安全基準・指針類における規定内容

FANC et al.のドキュメント<sup>17)</sup>には以下の記述がある。

人間侵入に関するシナリオについて、唯一考慮する必要があるのは、処分場の存在の記録喪失による偶発的な侵入に関連したものである。これらのシナリオの取り込みは、こうした侵入に至る傾向のあるすべての将来の人為的行為を把握することができず、仮定することさえできないため、ある種の任意性を反映する。解析の対象となるこのようなシナリオについては、技術レベルが現在のものと同じであるという仮説を採用する。地域状況を考慮に入れた想定シナリオとしては、井戸掘削、コア採取を伴う採掘、処分場付近の鉱山作業あるいは処分場施設への人間の直接物理的侵入があり、以下の2種類の影響がある。

- 1) 廃棄物の近くにいる侵入者への即刻の影響
- 2) 閉じ込めバリアの一部が迂回し、決定グループの個人に対する実効線量に影響をもたらす状況における主に水の移動に伴う遅延影響

1)では、構築シナリオは、「設計の限界を超える」シナリオ<sup>3.3-1)</sup>に類似している。つまり、被ばく線量は非常に高く、処分場の設計を変更しても低下させることは困難であろう。これらの高い被ばく線量による影響は、選択した「濃縮と保持」戦略と密接な関係があり、侵入者の被ばく線量と規制度との比較は妥当ではない。天然資源の豊富でないサイトを選択するか、もしくは標識を用いてこうした侵入の発生可能性を最小限に抑えることが、受け入れ基準のひとつである。処分施設の深さも、侵入の可能性を低下させる上で極めて重要である。

2)では、記述された状況は、十中八九、処分場の限定的な擾乱を導く変質進展シナリオと似ている。放射能の放出は、処分場の一部に影響を及ぼすだけのはずであり、放射線影響は、変質進展シナリオの一般的な枠組の中で評価される。進入シナリオに関連する移行に伴う影響を低減するために、できる限り設計を最適化する必要がある。

<sup>3.3-1)</sup> 発生や影響を阻止することができそうにないと思われる非常に起こりそうにない事象の結果であるシナリオとして、人間侵入シナリオと同様、レファレンス進化シナリオまたは変質進展シナリオに位置づけられている。

## (2)性能評価報告書における取り扱い

SAFIR2<sup>18)</sup>では、人間侵入に関して、下記の記述がある。

## (a)処分場に影響を及ぼす可能性のある人為的行為を抽出するための方法論

FEP のスクリーニングにより、開発に伴う掘削、温室効果、処分場のシーリングの不足、断層活動、厳しい氷河期、人工バリアの破損、ガス移行、探査に伴う掘削が変動シナリオとしてあげられている。

## (b)上記方法論に基づく分析によって抽出された代表的ケースの例

開発掘削シナリオは、汲み上げ井戸が Boom Clay 下方で処分場直近の Lower-Rupelian 帯水層中に掘削され、汲み上げられた水が灌漑用水及び飲料水として利用されると仮定している。この水の品質は処理しなければ人間による摂取には適さないこと、またこの帯水層の透水係数は非常に小さくて大量の水を汲み上げるのが困難なことから、このシナリオは基本シナリオに含められていない。(その上方の Neogene 帯水層への井戸の掘削は基本シナリオで考慮されている。)

採掘シナリオは、処分場サイトで探査用の試錐孔が処分施設を貫通することを仮定している。このシナリオには主な改良型が2種類ある。ひとつは、放射性廃棄物の破片を含んだコアが採取され、地上の施設において、廃棄物の放射能に気付かない人間によって分析されるというものである。もうひとつは、処分施設を貫通した試錐孔が埋め戻されず、そこに地下水が充満して放射性廃棄物と接触し、放射性核種が浸出して帯水層を汚染するというものである。

## (c)選定されたケースのシナリオ作成と影響解析

開発掘削シナリオに関しては、Lower-Rupelian 帯水層の透水係数が小さいこと、及び、この層の地下水の化学組成は処理しなければ人間による摂取には適さないものであることから、その発生確率は小さい。仮に、基本シナリオにおいて Neogene 帯水層について考えたように、この水が未処理のまま飲料水及び農業目的に使われたとすれば、レファレンスグループの個人に対する線量は年間数 mSv となり得る。これは、この帯水層中の地下水の動きが遅く、また層の厚さがそれほど厚くない (30m) ため、放射性核種の希釈及び分散に限られることによる。したがって、放射性核種濃度は Neogene 帯水層の場合の最大 1000 倍になり得る。通常シナリオと同じ被ばく経路が想定されるのであれば、人間が受ける最大線量は数 mSv/y となる。

採掘シナリオの2つめの改良型(処分施設を貫通して掘削された試錐孔が埋め戻されないと仮定。侵入によってバリアが擾乱を受けた場合の処分システムの頑健性を評価するもの)の影響は、Boom Clay の塑性による収束によって試錐孔が徐々に閉じられるであろうことから、極めて限定的なものとなるであろう。問題は、処分場をより深部に建設することによって発生確率が大幅に低減し得るかかどうかである。

なお、本報告書が発刊された時点(2001年)では、以前に検討したシナリオを最新の知見に基づき見直したうえで、影響解析を行うと記述されている。

## 4. 4 米国

## (1)安全基準・指針類における規定内容

10 CFR Part 63<sup>19)</sup>において、人間侵入は、シナリオの発生確率が評価できないとの立場を取っており、様式化されたシナリオが以下のように仮定されている(63.322)。

- ・ 地下水探査のためのボーリング孔の掘削の結果として1回の人間侵入が起こる。
- ・ 侵入者は、劣化した廃棄物パッケージを直接貫通し、ユッカマウンテン処分場の下にある帯水層の最上部に至るようにボーリング孔を掘削する。
- ・ 掘削者は、現在ユッカマウンテン周辺地域で地下水の探査ボーリングのために行われている一般的な技術ややり方を使用する。
- ・ ボーリング孔の注意深い密封は行われず、代わりに自然の劣化プロセスによってボーリング孔が次第に変質していく。

- ・ ボーリング孔内には粒子状の廃棄物材料は入らない。
- ・ 被ばくシナリオの中には、水によって飽和帯に運ばれた放射性核種のみが含まれるものとする(例えば、廃棄体パッケージの中に水が浸入し、放射性核種を放出させ、ボーリング孔を通じて飽和帯まで放射性核種を移行させる)。
- ・ 発生の確率がきわめて低い自然のプロセス及び事象によって引き起こされる放出は考慮されない。

放射線学的基準に関しては、処分後 10,000 年までは 0.15mSv/y、10,000 年以降、地質学的に安定な期間の範囲内では 1.0mSv/y としている (63.321)。

## (2)性能評価報告書における取り扱い

YMP-LA<sup>8)</sup>では、10 CFR Part 63<sup>19)</sup>を受けて、全体システム性能評価 (Total System Performance Assessment) において、「不注意による人間侵入」を FEP (地層処分場の安全性に影響を与える特質 (Features), 事象 (Events), プロセス (Processes)) のひとつとして、処分場を貫通する掘削 (科学探査, 鉱物探査, 地熱探査) が行われ、その行為により、ドリップシールと廃棄体パッケージの意図しない破壊が行われることを記述している。その結果、地下水が廃棄体パッケージに浸入し、飽和層、不飽和層における移行に影響を与え、放射性核種が人間環境に到達することを想定している。なお、侵入者の被ばく評価は行わないこととし、あくまでも、掘削行為による処分場から生物圏への核種移行経路の短絡 (例えば、試錐孔の貫通による廃棄体パッケージからの放射性核種の浸出) などの様式化されたシナリオに基づく人間への影響を対象とすると記述されている。評価結果の例として、閉鎖後 20,000 年の時点で掘削行為が起きた場合の 1,000,000 年までの合理的に最大の被ばくを受ける個人 (reasonably maximally exposed individual) が受ける放射線量の経時変化を示している。行為が発生した当初 (閉鎖後 20,000 年の時) では、線量の合計値が  $10^{-4}$  mSv/y を超えるが、その後、 $10^{-6}$  mSv/y 程度で推移するという結果が示されている。この結果は、10 CFR Part 63 で提案された人間侵入シナリオに対する防護基準をクリアしている。

## 4. 5 フランス

### (1)安全基準・指針類における規定内容<sup>4.5-1)</sup>

原子力安全機関 (ASN) の「放射性廃棄物の地層処分場に関する安全指針」<sup>20)</sup>では、以下の人為的行為に関する事象が挙げられている。

- ・ 直接または間接的な人間侵入 (ボーリング, 鉱山の採掘, 空洞・地表・地下の建築物)
- ・ パッケージの欠陥 (劣化条件に関する不測の事態, 仕様を十分に満たさないこと, 不適切な仕様, 製造欠陥)
- ・ 密封材の欠陥
- ・ 検知されていなかった地質環境の異常または欠陥

また、人間侵入が発生するまでの最短期間として 500 年という数字を挙げており (記録保存の永続性を考慮)、500 年以降の技術レベルが現在のものと同じであると仮定して、処分場を通過する探査ボーリング孔 (放置されたもの, 密封不良のものを含む) および深部帯水層における飲料水または農業用水の採取用ボーリング孔を掘削することを設定すべきであるとしている。

### (2)性能評価報告書における取り扱い

DOSSIER2005<sup>6)</sup>では、人間侵入に関して、下記の記述がある。

#### (a)処分場に影響を及ぼす可能性のある人為的行為を抽出するための方法論

<sup>4.5-1)</sup> 原典<sup>20)</sup>がフランス語で書かれているため、原子力安全委員会第二種廃棄物埋設分科会資料<sup>24)</sup>を参照した。

不確実性が引き起こす可能性のある事象のひとつとして、「外的リスク」を挙げており、その例として、処分場に関する記録が失われた後で人間が侵入するリスク（人為的なリスク）が挙げられている。これらは「標準外の状況」として設定されており、考古学目的の発掘や天然資源（石油、天然ガス、地熱など）の探査を目的とした土質工学調査、地層調査のための試錐孔の掘削が例として挙げられている。

(b)上記方法論に基づく分析によって抽出された代表的ケースの例

標準外の経時的変化シナリオとして、「試錐孔の掘削」を選択し、その定量化の結果に基づいて、処分場が受ける可能性のある様々な外力や機能不全に対する処分場の抵抗力を評価している。

(c)選定されたケースのシナリオ作成と影響解析

以下の2つの状況が想定されている。

- ・ 試錐孔の掘削の際に、コア、岩屑または廃棄物断片が地上に引き上げられた状況。作業員への影響は外部被ばくによるもたらされる。制度的監視期間が終わって500年後に侵入が生じると想定され、被ばく時間は10分間に設定されている。10分間の被ばくにより掘削作業員が受ける線量は最大で7mSv。
- ・ 一つまたは複数の試錐孔の放置によって生じる状況。母岩の部分的または全面的な短絡が生じる。廃棄物内に最初に含まれていた放射性核種のうち、パッケージから試錐孔を経由して生物圏へと移行してきた部分が人間（仮想的決定グループに属する人物と類似）への被ばく（水の飲用）に関係する。試錐孔の放置によって、水の循環を妨げる機能および放射性核種の移動を遅延および減衰させる機能に影響が出ると想定し、核種移行に与える影響を分析している。パッケージのタイプ別に線量の算出結果を整理したところ、線量は最大で0.012mSv/y（廃棄物種類：B1, B5 non-organic, 最大値出現時間：770年後）であった。なお、この値は、安全基本規則 RFS III.2.f<sup>25)</sup>における参照基準（最初の1万年間で0.25 mSv/y）に適合するものであるとの記述がある。

## 5. まとめと生物圏の変遷および将来の人為的行為の様式化を考える上でのポイント

本章では、まとめとして、前章までの事項を整理したうえで、生物圏の変遷および将来の人為的行為の様式化を考える上でのポイントについて述べる。

今回調査の対象とした5カ国（スウェーデン、スイス、ベルギー、米国、フランス）においては、いずれも国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告および国際原子力機関（IAEA）の文書における記述に基づき、自然過程および人為過程に対する諸外国の安全基準・指針類における規定内容を定めていること、また、その規定内容に基づき、生物圏の状態（将来的な変遷を考慮する場合にはそれを含む）および将来の人為的行為を設定していることが明らかとなった。

以下に、生物圏の状態設定と人為的行為に関して、諸外国の規制内容や性能評価報告書での取り扱いを概略的に述べるとともに、わが国における地層処分性能評価において、これらを様式化する際に留意すべきポイントを整理する。

### (1) 生物圏（地表環境および人間の生活様式）の状態設定と将来的な変遷

諸外国の性能評価においては、実際の地質環境に関する知見に基づく地表環境および被ばくグループ／人間の生活様式の設定を行うという事例が見られた。将来的な変遷については、時間的な変化が大きくなる期間については、現在の地表環境および人間の生活様式が将来にわたっても継続するとして、必ずしも将来的な変遷を考慮することが規制要件に含まれていない場合もある。しかしながら、将来変動を考慮した場合の評価結果の変動幅を把握するという意味合いで、地質環境の変遷等に伴い変遷する部分（地形の変化による環境構成要素および核種移行プロセスの変遷や、気候変動による地表環境での水収支、人間の生活様式の変化）については、現在の知見に基づく範囲で変遷を考慮する事例も見られた。

第2章および第3章に記述した国際的な動向に基づき、生物圏の状態変化を記述する際に留意すべきポイントを整理すると以下のとおりである。これらの考え方は、わが国の評価において、生物圏の状態変化を記述する際に非常に参考となるものである。

- 実際のサイトでの環境条件が大きく変動しない期間（処分後数百年程度まで）は、現在の環境条件と人間の生活様式が継続することを仮定したとしても大きな不整合は生じないと考えられるため、サイトの特徴を考慮した地表環境条件および想定された地表環境の特徴を反映した人間の生活様式を記述することでモデル構築が可能となる。
- 時間的な変化が大きくなる期間（処分後数百年以降数万年程度）は、サイトの特徴を反映した生物圏の状態に対して想定可能な範囲での変遷（特に、地質環境の変遷との整合）を考慮して、地表環境の変遷や人間の生活様式の変化を合理的に記述することでモデル構築が可能となる。
- 処分後数万年以降は、サイトの特徴を考慮した生物圏の変遷に対する予測が困難になることが考えられるため、合理的に保守的でもっともらしい仮定に基づく地表環境および人間の生活様式の記述を行い、評価の前提条件に応じて柔軟に対応できる準備をしておく。なお、被ばくグループの設定に関しては、現在の人間による摂取熱量が将来にわたっても継続するといった仮定（SR-Can報告書）や現在の成人と一致する代謝学および生理学的事項を有する成人を想定するという規定（YMP-LA）等に見られるように、食生活の習慣に関しては、現在の人間の生活様式が継続すると仮定することも、合理的に保守的な仮定のための選択肢の一つとして考えられる。
- 地質環境の変遷が想定できない期間（おおむね100万年以降）については、人間が受ける放射線影響（放射線量やリスク）以外の指標（例えば、放射性核種の濃度やフラックス）による補完的な評価を視野に入れる。
- 評価期間全体にわたっては、時間的な変化が少ないと考えられる、あるいは生物圏評価結果への影響の大きな地表環境の要因や要素については、それらについてのサイト環境条件での特徴を考慮する可能性およびその方法を検討しておく。

評価の時間軸を考慮して生物圏の状態設定を仮定する場合には、現在の状態が将来にわたっても継続するか、もしくは将来的な変遷（地質環境の変遷に伴う地表環境の変化および地表環境の変化に伴う人間の生活様式の変化）を考慮するかを、評価の前提条件の一部（サイト条件および将来の人間社会に関する仮定）として記述する必要がある。また、将来的な変遷を連続的に取り扱うか、離散的に取り扱う

かについても言及しておくことが望ましい。

なお、将来的な変遷を考慮する場合には、どのような要因（例えば、気温、地形）により評価モデル上の取り扱いがどのように変化するか（例えば、植生の変化による摂取物の変化、生産活動の変化による職業形態の変化）を整理しておく一方で、具体的な変化の状態が記述できない場合には、評価結果が厳しくなるであろう変化の方向を想定し、現在の状態に基づく評価と比較して、どれくらい結果が変動するかについてあらかじめ議論しておく必要がある。

## (2) 人為的行為

第2章および第3章に記述した国際的な動向に基づき、諸外国の性能評価における人間侵入等の人為的行為を整理すると、「行為によるバリア機能の劣化」と、「行為者本人もしくは行為により地表環境にもたらされた核種による行為者以外の被ばく」の2つのシナリオに大別できる。なお、諸外国のいずれの評価においても、ICRP Pub.81<sup>1)</sup>での勧告内容に従い、人間の故意による処分場への侵入による被ばくは、考慮の対象外とできるとしている。

「行為によるバリア機能の劣化」シナリオとして、具体的には以下の行為が挙げられる。

- ・ ボーリングによる処分場の貫通によるバリア機能の低下もしくは経路の短絡（スウェーデン、スイス、ベルギー、米国、フランス）
- ・ 処分場近くの地下施設建設（スウェーデン）
- ・ サイト近くの鉱山の開発（スウェーデン）
- ・ 処分場の放置によるアクセス坑道の開放（スイス）

一方、「行為者本人もしくは行為により地表環境にもたらされた核種による行為者以外の被ばく」シナリオとして、具体的には以下の被ばく経路が挙げられる。

- ・ ボーリングによる処分場の貫通による作業員の被ばく（ボーリングにより地上に残された切りくずの摂取・吸入、切りくずからの外部被ばく、コア観察による外部被ばく、ダスト吸入）（スウェーデン、スイス、ベルギー、フランス）
- ・ 井戸の汲み上げによる汚染地下水の利用（ベルギー、米国）<sup>5-1)</sup>

上記のシナリオについては、いずれも深地層の処分施設において発生しうると考えられる人為的行為を列挙している。なお、深地層の処分施設においては、比較的浅い深度における構築物（例えば、地下鉄、地下街等）を考慮する必要はないが、隆起・侵食等による処分深度の長期的な変化を考慮する場合には、その限りではない。したがって、地質環境の長期的な変遷に関する考え方とあわせて、性能評価における人為的行為をどのように設定するかについて議論する必要がある。また、一般的な人為的行為を抽出するために、SKBが行ったような、技術的側面のみからではなく、社会的要因の分析（人文的問題や社会経済学的問題の分析）（4.1 参照）は有効であると考えられる。

さらに、人為的行為として、上記に挙げたような、ボーリング掘削、地下施設建設、資源開発を考慮し、それらの行為によって、処分場からの地表環境への核種移行量がどのように変化し、結果として、人間が受ける放射線量がどれくらい変動するかを議論しておくことが重要である。一般的に、人為的行為に基づく人間侵入によって受ける放射線量は、自然過程シナリオにおける線量と比較して、非常に高いと想定される。しかしながら、2.1 においても述べたように、設置深度や施設の頑健性、制度的管理の使用により、合理的な措置を行うことで人間侵入に関連した被ばくの事象の可能性を減らすことができる<sup>1)</sup>点を考慮する必要があるとともに、線量評価を行うにあたっては、人間侵入の発生可能性についても別途議論すべきである。

上記の行為によって人間が受ける被ばくに対する放射線学的基準について、地下水シナリオの代替シナリオとして捉えることができるようなケース（例えば、ボーリングによる核種移行経路の短絡や井戸の汲み上げによる汚染地下水の利用）に関しては、自然過程シナリオに適用される放射線学的基準が適用されている。一方、地表に廃棄物を含む媒体（ボーリングコア等）が搬出されたことによる行為者の

<sup>5-1)</sup> スウェーデン、スイス、フランスでは、「井戸の汲み上げによる汚染地下水の利用」に関しては、「行為によるバリア機能の劣化」シナリオの一部として評価されている。

被ばく（摂取，吸入，外部被ばく）に対しては，レファレンスケースの放射線量もしくは自然放射線との対比で影響を示している。線量拘束値またはリスク拘束値と比較すべき定量的な性能評価の中に，将来の人の行動の種類または確率を含めることが適切でないような事象（ボーリングによる処分場の貫通による作業員の被ばく等）に関しては，ICRP が勧告する人間侵入に対する放射線学的基準（介入に対する一般的参考レベル：10～100mSv）を適用することを考慮すべきである。

## 謝辞

本報告書を作成するにあたり，地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット 宮原要ユニット長，虎田真一郎研究主幹，柴田雅博サブリーダー，稲垣学チームリーダー，若杉圭一郎チームリーダーから，貴重な助言をいただきました。これらの方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) ICRP (2000): Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste: Annals of the ICRP Volume 28/4, ICRP Publication 81, Elsevier.
- 2) 日本アイソトープ協会 (2000) : 長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告, ICRP Publication 81.
- 3) IAEA (1999): "Critical Groups and Biospheres in the Context of Radioactive Waste. Disposal, Fourth report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal", IAEA-TECDOC-1077.
- 4) IAEA (2003): "Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal, Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSESSment (BIOMASS) Programme, Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS), IAEA-BIOMASS-6, 2003.
- 5) Nagra (2002): Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Technical Report 02-05. NTB 02-05.
- 6) ANDRA (2005): Dossier 2005, Argile SYNTHESIS, Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation, Meuse/Haute-Marne site, December 2005.
- 7) ANDRA (2005): Dossier 2005 Granite: Synthesis - Assets of granite formations for deep geological disposal, June 2005.
- 8) U.S. DOE (2009): Yucca Mountain Repository License Application: Safety Analysis Report, DOE/RW-0573, Rev. 1, Feb. 19, 2009.
- 9) SKB (2006): Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar - a first evaluation. Main report of the SR-Can project, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-06-09.
- 10) 原子力安全委員会 原子力安全総合専門部会 (2004) : 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について, 平成 16 年 3 月 10 日.
- 11) 原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 (2006) : 低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方 (中間報告) (案), 原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 低レベル放射性廃棄物埋設分科会資料 埋分第 7 - 1 号, 平成 18 年 10 月 23 日.
- 12) SSI (2005): The Swedish Radiation Protection Authority's guidelines on the application of the regulations (SSI FS 1998:1) concerning protection of human health and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear waste, SSIFS 2005:05.
- 13) SKB (2006): The biosphere at Forsmark, Data, assumptions and models used in the SR-Can assessment, SKB R-06-82.
- 14) SKB (2006): The biosphere at Laxemar, Data, assumptions and models used in the SR-Can assessment, SKB R-06-83.
- 15) HSK/KSA (1993): "Protection Objectives for the Disposal of Radioactive Waste" (HKS-R-21/e).
- 16) ENSI (2009): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, ENSI-G03.
- 17) FANC et al. (2004): Geological Disposal of Radioactive Waste: Elements of a Safety Approach.
- 18) ONDRAF/NIRAS (2001): SAFIR 2 - Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, December 2001.
- 19) U.S. NRC (2009): Disposal of High-level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, 10 CFR Part 63, Mar. 13, 2009.
- 20) ASN (2008): Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde [原子力安全機関 (ASN) : 放射性廃棄物の地層処分場に関する安全指針 (2008.2.12)] .
- 21) 原子力環境整備促進・資金管理センター (2009) : 国際原子力機関, 諸外国における生物圏の検討の概要, 原子力安全委員会 第二種廃棄物埋設分科会配付資料, 二分第 16-2-1 号, 平成 21 年 3 月

30 日.

- 22) SKB (2006): Handling of future human actions in the safety assessment SR-Can, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-06-24.
- 23) SKB (1999): Deep repository for spent nuclear fuel, SR 97 – Post-closure safety, Main report, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-99-06.
- 24) 原子力安全委員会事務局, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2009) : 国際機関及び諸外国での人為事象 (人間侵入) に関する規定内容, 原子力安全委員会 第二種廃棄物埋設分科会配付資料, 二分第 18-2 号添付資料, 平成 21 年 6 月 9 日.
- 25) DSIN (1991): Règle Fondamentale de Sûreté III.2.f.

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射線種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m <sup>2</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1L=1l=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
ファ	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガラ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

