

地層処分安全評価における 生物圏評価手法の高度化に関する検討(IV)

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2004年2月

日揮株式会社

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

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

電話：029-282-1122(代表)
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

地層処分安全評価における生物圏評価手法の高度化に関する検討（ ）

（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）

小山田潔 池田孝夫

要 旨

本研究では、昨年度までに実施した地質環境と生物圏とのインターフェース（G B I）の設定手法を利用した具体的な試行および海外動向を考慮した生物圏評価技術に関する検討を実施した。

G B Iの具体化に関する検討では、諸外国におけるG B I設定手法に関する文献調査結果を参考に、わが国の典型的な環境条件（地形、地質、水理など）を複数設定し、G B I設定を具体的に試行した。さらに、この試行検討結果を踏まえて、昨年度作成したG B I設定手法の留意点や課題を整理した。

海外動向を考慮した生物圏評価技術に関する検討では、現在実施されている生物圏評価にかかわる国際共同研究のうち、生物圏モデルに関する BIOCLIM、BIOMOSA および BIOPROTA プロジェクトの調査を実施した。さらに、これらを参考にわが国における生物圏評価に関して今後考慮が必要となる考え方や技術を整理した。

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

機構担当課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部
システム解析グループ

：日揮株式会社

Improvement of Biosphere Assessment Methodology
for Performance Assessment of Geological Disposal Facility (IV)
(Document Prepared by Other Organization, Based on the Trust Contract)

Kiyoshi Oyamada and Takao Ikeda

Abstract

This report presents results on trial study of methodology to identify Geosphere-Biosphere Interface (GBI), which have been considered, and examination in consideration of overseas trend of long-term biosphere assessment.

Regarding trial study of methodology to identify GBI, the important matter and subject of GBI identification methodology, that have been developed in the last year, was considered and arranged based on results of literature survey and using several hypothetical biosphere environmental cases (ex. geographical, geological, hydrological features) in Japan.

Regarding examination and consideration of overseas trend of long-term biosphere assessments, a review of relevant information from three international biosphere programmes (BIOCLIM, BIOMOSA and BIOPROTA, that related with biosphere assessment modelling) was carried out. Furthermore referring the effects of these programmes, approaches and technological issues relating biosphere assessment for Japanese HLW disposal safety programme was researched.

This work was performed by JGC Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.
JNC Liaison: JNC Tokai Works, Waste Management and Fuel Cycle Research Center,
Waste Isolation Research Division, Repository System Analysis Group
: JGC Corporation

目 次

1 . はじめに.....	1
2 . G B I の具体化に関する検討.....	2
2 . 1 諸外国における G B I 設定に関する調査および整理.....	6
2 . 1 . 1 各国の G B I 設定手法に関する整理	7
2 . 1 . 2 各国の表層水理に関する取り扱い.....	76
2 . 1 . 3 調査結果から得られる G B I 設定に有用な情報.....	95
2 . 2 わが国の典型的な環境パターンの設定.....	97
2 . 2 . 1 考慮すべき要件の整理.....	97
2 . 2 . 2 環境パターンの設定	120
2 . 3 予備的 G B I 設定フローによる試行検討	133
2 . 3 . 1 流出域の概要把握.....	134
2 . 3 . 2 G B I 候補の抽出.....	138
2 . 3 . 3 被ばくグループ / 被ばく経路の設定	141
2 . 3 . 4 評価モデルの構築（地表付近の水収支・物質収支の把握）	142
2 . 3 . 5 線量への換算係数の算定.....	142
2 . 3 . 6 決定グループ / G B I の選定	142
2 . 4 G B I 設定手法への反映検討.....	148
2 . 4 . 1 流出域の概要把握.....	148
2 . 4 . 2 G B I 候補の抽出.....	149
2 . 4 . 3 被ばくグループ / 被ばく経路の設定	150
2 . 4 . 4 評価モデルの構築.....	150
2 . 5 検討のまとめ	153
2 . 5 . 1 諸外国における G B I 設定に関する調査および整理.....	153
2 . 5 . 2 わが国の典型的な環境パターンの設定.....	157
2 . 5 . 3 予備的 G B I 設定フローによる試行検討および検討結果の反映	160
3 . 海外動向を考慮した生物圏評価技術に関する検討	162
3 . 1 生物圏評価技術に関する近年の海外動向	162
3 . 2 BIOCLIM プロジェクト	164

3.2.1	BIOCLIM プロジェクトの目的および概要.....	164
3.2.2	実施内容と現況.....	166
3.2.3	BIOCLIM プロジェクトから得られる知見.....	169
3.3	BIOMOSA プロジェクト.....	172
3.3.1	BIOMOSA プロジェクトの目的および概要.....	172
3.3.2	実施内容と現況.....	173
3.3.3	BIOMOSA プロジェクトから得られる知見.....	178
3.4	BIOPROTA プロジェクト.....	182
3.4.1	BIOPROTA プロジェクトの目的および概要.....	182
3.4.2	実施内容と現況.....	183
3.4.3	BIOPROTA プロジェクトから得られる知見.....	188
3.5	検討のまとめ.....	190
4	おわりに.....	193
4.1	G B I の具体化に関する検討.....	193
4.2	海外動向を考慮した生物圏評価技術に関する検討.....	193
5	参考文献.....	194

目 次

表 2.1.1-1	広域スケールおよびサイトスケールの地域特性結果	19
表 2.1.1-2	NRC 10 CFR Part 63 における生物圏評価に関する記述	28
表 2.1.1-3	各国の G B I 設定方法の整理	72
表 2.1.2-1	BIOMASS の ERB 2B の概要	80
表 2.1.2-2	各環境媒体における平均滞留時間	82
表 2.1.2-3	表土での汚染物質の分配係数値	90
表 2.1.3-1	G B I 設定に資する調査結果の整理	95
表 2.2.1-1	都道府県別地形別面積	100
表 2.2.1-2	一般的な地質の状態と地下水の賦存様式の例	104
表 2.2.1-3	地形区分ごとの水理地質特性と地下水などの賦存・流動	107
表 2.2.1-4	地球上の水の量	109
表 2.2.1-5	地下掘削工事にともなう地下水調査範囲の例	115
表 2.2.1-6	わが国の主要な井戸の種類と特徴	116
表 2.2.1-7	わが国の自治体面積	117
表 2.2.1-8	考慮すべき要件の整理結果	119
表 2.2.2-1	設定した仮想サイト環境モデル	122
表 2.2.2-2	環境パターンの設定結果	131
表 2.3.1-1	想定環境パターンごとの G B I 設定の考え方	143
表 3.1-1	生物圏評価にかかわる国際共同研究の一例	163
表 3.2-1	BIOCLIM プロジェクトのメンバー一覧	165
表 3.3-1	BIOMOSA プロジェクトのメンバー一覧	172
表 3.3-2	BIOMOSA プロジェクトの評価条件	174
表 3.3-3	BIOMOSA プロジェクトのサイト固有モデル開発のための選定地域	177
表 3.3-4	BIOMOSA プロジェクトで利用された評価コード	178
表 3.4-1	BIOPROTA プロジェクトの運営委員会メンバ	182
表 3.4-2	BIOPROTA プロジェクトのテーマおよびタスク	184
表 3.4-3	BIOPROTA プロジェクトの内容とわが国における生物圏評価との関連	189
表 3.5-1	生物圏モデルに関する研究プログラムの現状の整理	191

目 次

図 2-1	予備的 G B I 設定フロー	4
図 2-2	本章の作業の流れ	5
図 2.1.1-1	米国南西部の地形と Yucca Mountain の位置	8
図 2.1.1-2	Yucca Mountain サイトの位置	9
図 2.1.1-3	Yucca Mountain サイト周辺の地質図	11
図 2.1.1-4	Yucca Mountain サイト周辺の地質断面図	11
図 2.1.1-5	Yucca Mountain の飽和層における地下水流動系	13
図 2.1.1-6	Yucca Mountain の飽和層における移行に重要な特性およびプロセス	14
図 2.1.1-7	Yucca Mountain の飽和層における地下水移行解析結果	16
図 2.1.1-8	Yucca Mountain サイトにおける地下水流動・移行モデル	18
図 2.1.1-9	広域スケールでの地下水ポテンシャル面	21
図 2.1.1-10	サイトスケールでの地下水ポテンシャル面	22
図 2.1.1-11	Yucca Mountain サイト周辺で掘削された試錐孔位置	23
図 2.1.1-12	飽和層地下水流動・核種移行モデルにより予測された流路	26
図 2.1.1-13	ユッカマウンテンプロジェクトでの G B I 設定の流れ	29
図 2.1.1-14	SR-97 における 3ヶ所の仮想的な結晶質岩系処分場サイト	31
図 2.1.1-15	Äspö サイト周辺の水文状況および地形	33
図 2.1.1-16	Äspö 島の地表水文状況	34
図 2.1.1-17	Finnsjön 地域およびサイト位置	36
図 2.1.1-18	Gideå 地域およびサイト位置	38
図 2.1.1-19	地下水流動モデルおよびデータの関係	39
図 2.1.1-20	Äspö サイトでの地下水流動パターン	40
図 2.1.1-21	Finnsjön サイトでの地下水流動パターン	41
図 2.1.1-22	Gideå サイトでの地下水流動パターン	42
図 2.1.1-23	Äspö 地域のパーティクルトラッキング結果	45
図 2.1.1-24	Finnsjön 地域のパーティクルトラッキング結果	46
図 2.1.1-25	Gideå 地域のパーティクルトラッキング結果	46
図 2.1.1-26	モジュール概念の概要	47

図 2.1.1-27	Sellafield エリアの位置	49
図 2.1.1-28	Sellafield サイトの簡易地質図	51
図 2.1.1-29	Sellafield サイトの簡易地質断面図	52
図 2.1.1-30	Sellafield における地下水流動系の主要特性	53
図 2.1.1-31	Sellafield におけるモニタリングネットワークおよび表層集水域	55
図 2.1.1-32	Sellafield における観測試錐孔 (< 100m) 位置	56
図 2.1.1-33	2次元地下水流動モデルによる処分場からの地下水流路	58
図 2.1.1-34	3次元地下水流動モデルによる地下水流出点	60
図 2.1.1-35	土壌中の核種濃度に影響するプロセス	62
図 2.1.1-36	スイス北部およびその周辺地域	65
図 2.1.1-37	Zürcher Weinland の地質断面図	65
図 2.1.1-38	Muschelkalk 帯水層の浸透域, 流出域および水頭圧分布	67
図 2.1.1-39	Malm 帯水層の浸透域, 流出域および水頭圧	67
図 2.1.1-40	Zürcher Weinland において想定された地下水移行経路の可能性	68
図 2.1.1-41	ライン渓谷の表層環境概念図	70
図 2.1.2-1	SR-97 で利用された概念モデル	77
図 2.1.2-2	SSI による検討ケース 1	79
図 2.1.2-3	SSI による検討ケース 2	80
図 2.1.2-4	検討ケース 1 の線量ピーク比較結果	83
図 2.1.2-5	検討ケース 2 の線量ピーク比較結果	83
図 2.1.2-6	SHETRAN で考慮される主要な表層プロセス	87
図 2.1.2-7	温帯・寒帯気候での集水域の位置	89
図 2.1.2-8	温帯・寒帯気候での集水域の特性	89
図 2.1.2-9	温帯気候での集水域に関する年間の水収支結果	90
図 2.1.2-10	30年後の表土での汚染物質濃度	91
図 2.1.2-11	寒帯気候での 30年後の汚染物質の濃度分布	92
図 2.2.1-1	処分場建設可能な地理条件	98
図 2.2.1-2	わが国の地形分布割合	101
図 2.2.1-3	わが国の地形区分とその特徴	102
図 2.2.1-4	空隙の種類模式図	105

図 2.2.1-5	土地分類基本調査結果（表層地質）の例（凡例は一部の地質）	106
図 2.2.1-6	天然水の循環	110
図 2.2.1-7	わが国の国土利用割合	111
図 2.2.1-8	水循環系に想定されるさまざまな影響の形態例	112
図 2.2.1-9	理論的流動パターンおよび各流動系境界	113
図 2.2.1-10	山岳トンネル掘削に対する調査範囲の例	115
図 2.2.1-11	わが国の主要な井戸の概念図	116
図 2.2.2-1	仮想サイト環境モデル	123
図 2.2.2-2	仮想サイト環境モデル	124
図 2.2.2-3	仮想サイト環境モデル および環境パターンとして設定した領域	125
図 2.2.2-4	仮想サイト環境モデル および環境パターンとして設定した領域	126
図 2.2.2-5	環境パターン の断面図	127
図 2.2.2-6	環境パターン の断面図	128
図 2.2.2-7	環境パターン の断面図	130
図 2.3-1	予備的 G B I 設定フロー	133
図 2.3.1-1	スケール の概念例	136
図 2.3.1-2	オパリナス粘土からの地下水移行経路の可能性	137
図 2.4.1-1	さまざまな段階における生物圏の変遷	149
図 2.4.2-1	現在の安全評価における G B I の考え方	150
図 2.4.4-1	表層環境中の元素フラックスを表すコンパートメントモデル	151
図 2.4.4-2	環境システムで想定される第四紀堆積層	152
図 2.5.1-1	米国ユッカマウンテンプロジェクトでの G B I 設定の流れ	154
図 3.2-1	BIOCLIM-BIOMOSA ジョイント最終セミナーのアジェンダ	168
図 3.2-2	生物圏システム状態間の変遷を表す相互作用マトリクス例	170
図 3.2-3	スペイン中央部における数 100 年間の気候変動による変遷例	171

1. はじめに

地層処分研究開発第2次とりまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999；以下「第2次とりまとめ」という。）における生物圏評価では，わが国の一般的な地形・地質条件に対して，国際原子力機関(IAEA)の国際共同研究プログラム BIOMASS（IAEA，1996）での検討を参考に，レファレンスバイオスフィアの方法論を用いた生物圏評価モデルを構築した。今後は，具体的な地質環境が与えられた場合に，サイトに依存する特性を生物圏評価モデルおよびデータ設定にいかに関与させるかについて検討する必要がある。このため，第2次とりまとめ以降は，評価上重要となる検討項目のうち，特に，地質環境と生物圏とのインターフェース（Geosphere-Biosphere Interface；以下「G B I」という。）の設定手法について，具体的な地質条件が与えられた場合のG B Iの設定フローを作成し，必要となるサイト調査項目や調査方法について整理した（三木他，2003）。しかしながら，この手法は概念的かつ予備的なものであり，より具体的な環境条件に対してその適用可能性を確認し，さらに改良していく必要がある。

一方，現在，諸外国の国際機関（IAEA や EC など）において，生物圏評価に関する国際的な研究プログラム（例えば，BIOCLIM など）が実施されている。また，放射線防護指標に関する議論（例えば，FASSET など）も活発に行われている。わが国においても，今後の生物圏評価にこれらの成果を反映させ，性能評価の信頼性を向上させることは重要であると考えられる。

以上のことから，本研究においては，G B I設定に関し，より具体的な手法の確立を目的として，わが国の典型的な仮想環境条件を対象としたG B I設定の試行検討を行い，昨年度作成したG B I設定手法の留意点や課題を整理する。また，生物圏評価に関する国際的な研究プログラムを調査し，その考え方を参考にすることにより，今後，わが国において開発すべき生物圏評価技術について整理する。

2. G B Iの具体化に関する検討

昨年度の検討では、諸外国におけるG B I設定に関する文献調査結果を参考に、わが国におけるG B Iの設定手順について検討し、図2-1に示すG B I設定フロー（以下、「予備的G B I設定フロー」という。）を開発した。その結果、既往の評価事例および現状の地下水流動シミュレーション技術を勘案すれば、地下水流動解析で具体的な放出域を導出するのはかなり困難であり、評価の保守性を維持するためには、地下水流動解析の結果から比較的多数のG B I候補を選定し、そこから評価の前提条件に応じてより確からしいG B Iあるいは保守的なG B Iを選定することが妥当であるとの結論が得られた。また、G B Iを設定するために必要な調査項目および調査方法についても整理した。その結果、調査項目は、サイト環境にかかわらず、共通であるが、それぞれの調査手法や詳細なデータ項目についての詳細は、サイトの特徴によって異なるとの結果が得られた（三木他、2003）。

本章では、昨年度の検討結果を受け、開発した予備的G B I設定フローの各ステップで想定される行為を仮想的な例（環境パターン）を対象に具体的に検討し、検討過程で抽出される課題や問題点を整理し、さらに、必要に応じて改良を行うことを目的とする。本章では、下記の検討を実施する（図2-2参照）。

諸外国におけるG B I設定に関する調査および整理

わが国の典型的な環境パターンの設定

予備的G B I設定フローによる試行検討

G B I設定手法への反映検討

「諸外国におけるG B I設定に関する調査および整理」について、これまで実施した諸外国のG B I検討に関する調査（三木他、2003）では、各国のG B I設定方法が、サイト固有の条件にもとづいていることがわかっている。このため、本件のような一般的な検討の参考に資することを目的として、これまでの調査した各国の環境条件をより明確にし、また必要に応じて新規に関連情報の調査を行いつつ、G B I設定方法を整理する。なお、近年、諸外国では、G B Iを含む表層環境中の水理に関する検討（例えば、英国のSHETRAN コードやスウェーデン放射線防護機関（以下「SSI」という）での検討など）が実施されてきており、これらの新規情報は本検討において有用であると考えられる。

「わが国の典型的な環境パターンの設定」では、本件で対象とする仮想的な処分サイト周辺の環境パターンの設定を行う。具体的には、わが国における統計情報や環境分野の情報を利用して、典型的な環境条件（地理、地形や水収支など）を検討・整理し、それらを反映した複数の環境パターンを設定する。「予備的G B I設定フローによる試行検討」では、設定した環境パターンごとに、これまでの検討成果（三木他，2003）や先述の諸外国の調査成果などを踏まえつつ、G B I設定手法への反映に資することを目的として具体的にG B I設定を試行検討する。「G B I設定手法への反映検討」では、上記までの検討結果を踏まえて、G B I設定手法の高度化を図ることを目的として、問題点・課題などを抽出・整理する。

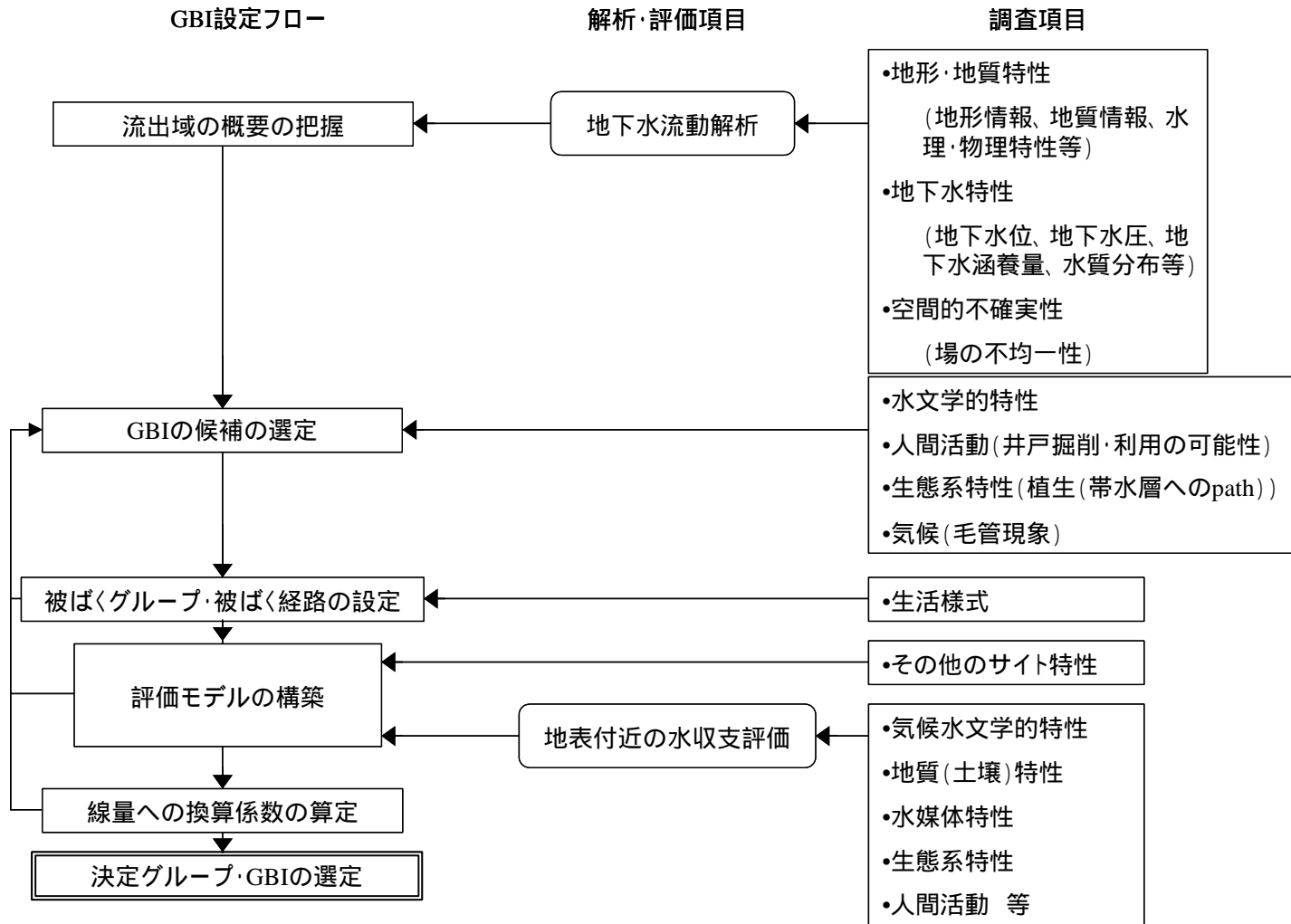


図2-1 予備的G B I設定フロー (三木他, 2003)

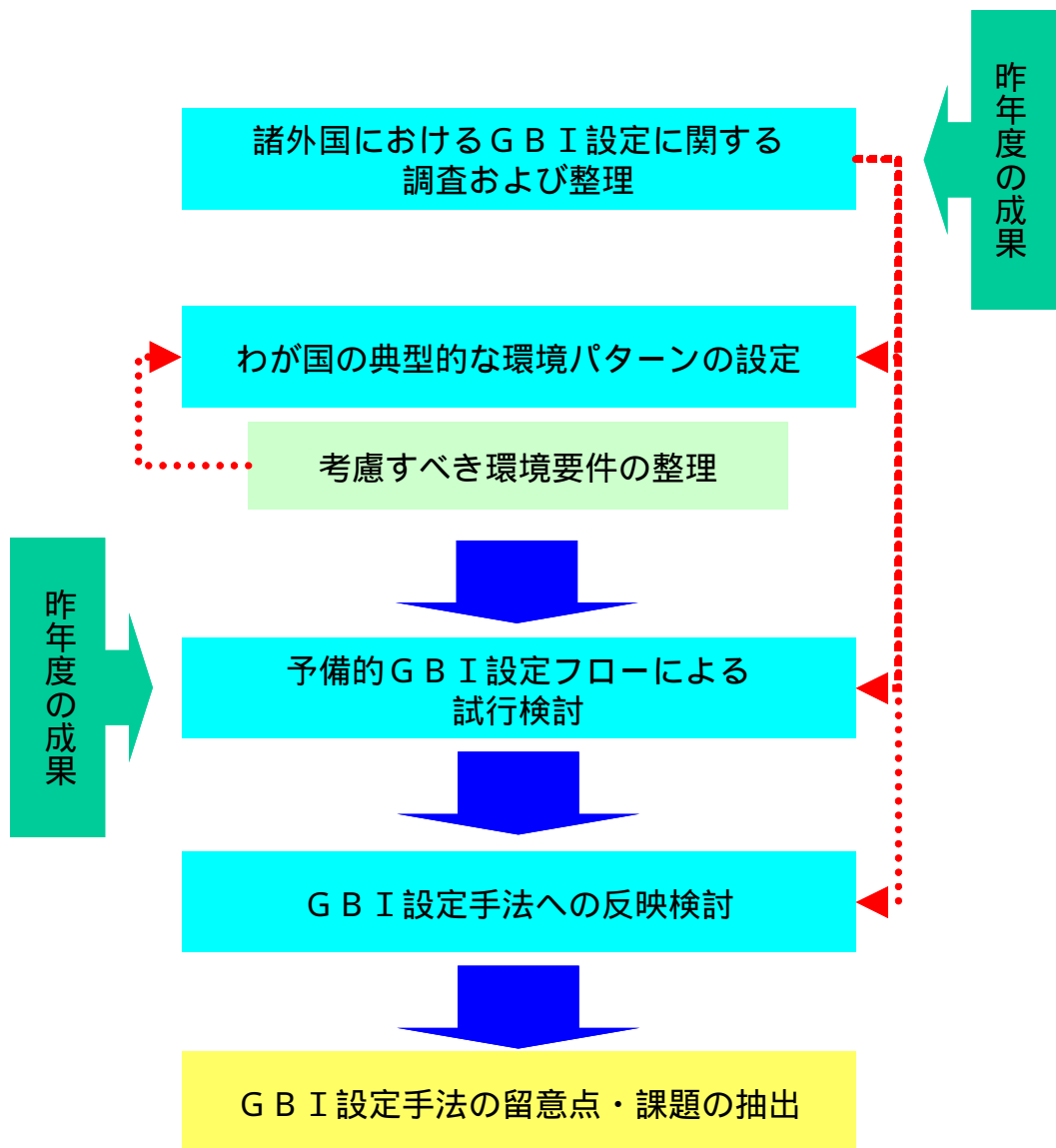


図2-2 本章の作業の流れ

2.1 諸外国におけるG B I設定に関する調査および整理

これまで実施した諸外国のG B I検討に関する調査（三木他，2003）から，各国の設定方法の多くは個々のサイト環境条件にもとづいて行われていることがわかっている。本節では，現在のわが国のような一般的な環境についての検討の参考に資することを目的として，これまでの調査した各国の環境条件をより明確にし，また必要に応じて新規に関連情報の調査を行いつつ，下記の観点に留意しながらG B I設定方法を整理する。

各国の環境条件（地形・地質・水文など）

地下水流出域の概要把握（流出域・考え方・解決方法・調査手法など）

G B I候補の選定（選定G B I・考え方・解決方法・調査手法など）

なお，調査対象は下記のとおりとした。このうち，～については，昨年度に引き続き調査を行った。また，～については，新規に調査を実施した。

ユッカマウンテンプロジェクト関連文書（米国）

性能評価書（SR-97）およびその関連文書（スウェーデン）

性能評価書（Nirex-97）（英国）

オパリナス粘土プロジェクト報告書（スイス）

また，近年，諸外国では，これまでの保守的な設定がなされていた地質環境と生物圏との間の表層水理に関して，より具体的な知見を評価に取り入れることが試みられている。このため，本項では以下の関連資料の調査を行った。

SSI レポート（スウェーデン）

SHETRAN（英国）

2.1.1 各国のGBI設定手法に関する整理

(1) ユッカマウンテンプロジェクト関連文書(米国)

昨年度の米国のGBI設定に関する調査では、実施主体である米国エネルギー省(連邦政府機関)が1998年に公表した「ユッカマウンテンの実現可能性評価」(DOE, 1998)を参考に調査を実施した。その結果、ユッカマウンテンプロジェクトの安全評価における生物圏評価では、当該地域の地下水流動状況および周辺地域の社会特性から、処分場から南方20kmの地点にあるAmargosa Valley共同体にある井戸を、生物圏評価におけるGBIとしていることがわかった。本項では、これらの調査結果を踏まえつつ、米国エネルギー省が2002年に公表した「ユッカマウンテン科学技術レポート(S&ER)」(DOE, 2002)を中心とし、さらにサイト環境や地下水流動状況の把握に関する文書の調査を新規に行った。

() 環境条件

Yucca Mountainは、米国西部のBasin and Range地域のGreat Basinとよばれる地域内に位置している。Great Basinは、ネバダ州のほぼ全域とユタ州、アイダホ州、オレゴン州、カリフォルニア州の各州の一部に広がる盆地である(図2.1.1-1)。

Yucca Mountainサイトは、ネバダ州南部にあるNye Countyに位置し、ラスベガスの北西約160kmにある(図2.1.1-2参照)。Yucca Mountainは、北部にあるTimber Mountainから南部にあるAmargosa Desertまでおよそ40kmにおよぶ尾根から成る。尾根の標高は、海拔およそ1,800m~900mで、処分場サイトは1,400~1,500mの部分に位置する。



図2.1.1-1 米国南西部の地形とYucca Mountainの位置 (DOE, 2002)

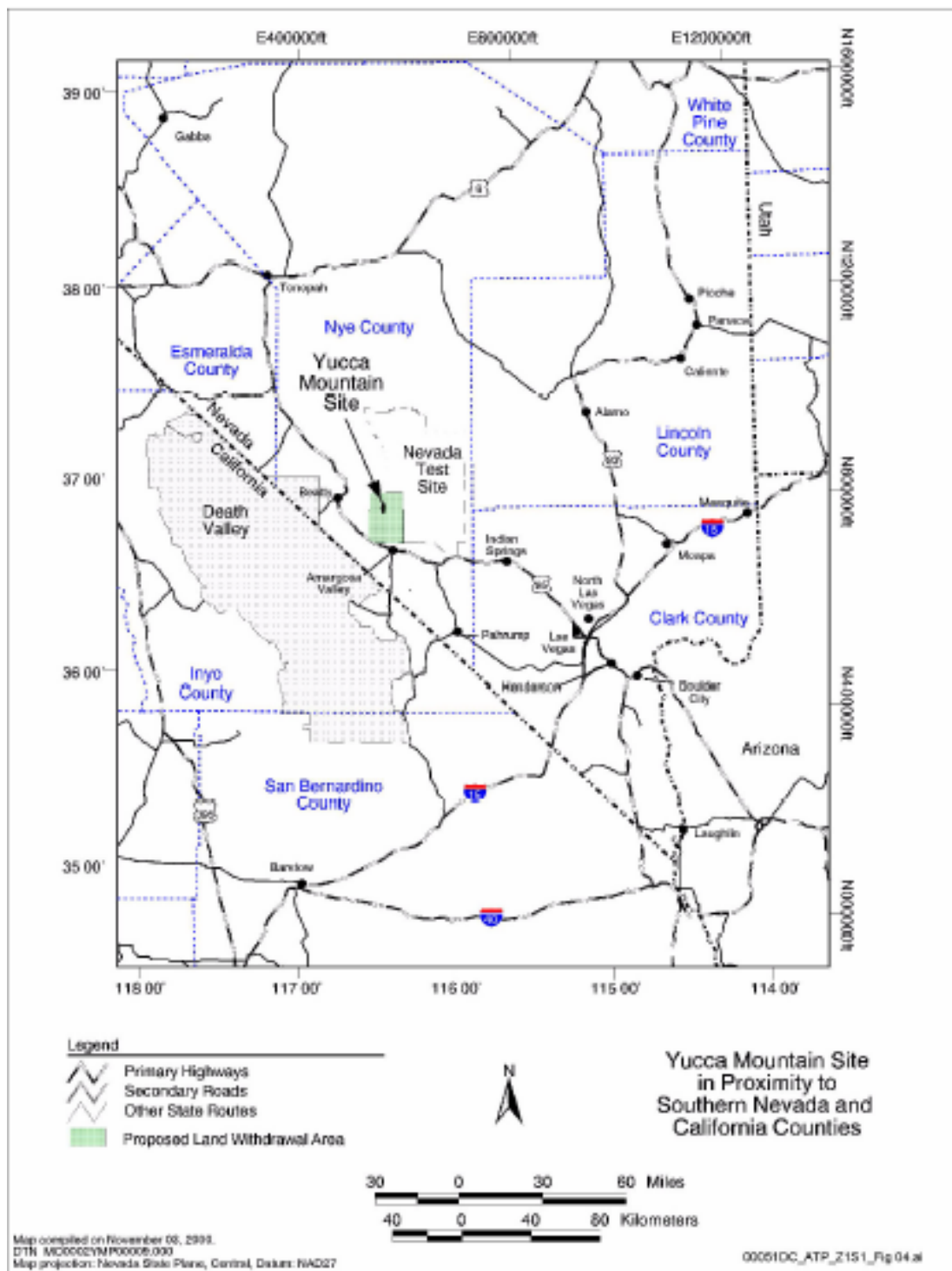


図2.1.1-2 Yucca Mountainサイトの位置 (DOE, 2002)

Yucca Mountain に露頭している岩石や堆積鉱床は、山地に分布する地質学的に古いもの（先カンブリア時代，もしくは 570,000,000 年以上前）から，低地に広がる新しいもの（完新世，約 10,000 年未満）まで，その年代に幅がある。Yucca Mountain サイトにある先カンブリア時代（570,000,000 年以上前）および古生代（570,000,000～240,000,000 年以上前）の岩石は，非透水性の堆積岩もしくは変成岩である。Yucca Mountain サイトの火山岩の下にある先カンブリアおよび古生代ユニット*は，後述の炭酸塩ユニットを除き，すべて半帯水層であり，破碎帯部分での水の流れが強い。一方，いくつかの古生代炭酸塩ユニットは，ネバダ州南部を通過する重要な帯水層となっている。Yucca Mountain 付近において，最も有意な地下水の流出は，処分場候補地の約 50km 南南東の Ash Meadow エリア全域におよぶ炭酸塩岩中で起こる。この流れの起源となる帯水層は，Yucca Mountain にある凝灰岩ユニット中の帯水層の下に位置する。

図 2.1.1-3 に Yucca Mountain サイト周辺の地質図を示す。さらに図 2.1.1-3 に記された赤線 A-A'での地質断面図を図 2.1.1-4 に示す。試錐孔での水位測定により，地下水面は地下およそ 500～800m にある。処分場はおそらく地下水面より上部の不飽和層に設置される。Yucca Mountain は，およそ 14～11.6 百万年前に火山の噴火により形成された火山岩層で構成される。この火山岩は，熔結凝灰岩と非熔結凝灰岩といった 2 種類の灰流凝灰岩（ash-flow tuff）が大部分を占める。処分場位置より上部層の大半は，Paintbrush Group の火山岩で構成される。Paintbrush Group は，地表と処分場位置との間にあり，3 種類の火山性凝灰岩層（地表の Tiva Canyon 熔結凝灰岩，処分場位置の Topopah Spring 熔結凝灰岩，非熔結凝灰岩の中間層）で構成されている。

* 地質学的な分類。地域の地層は，先カンブリア時代の地層，古生代の地層，中生代の地層，新生代中新世の地層，処分施設の対象となる地層からなる。

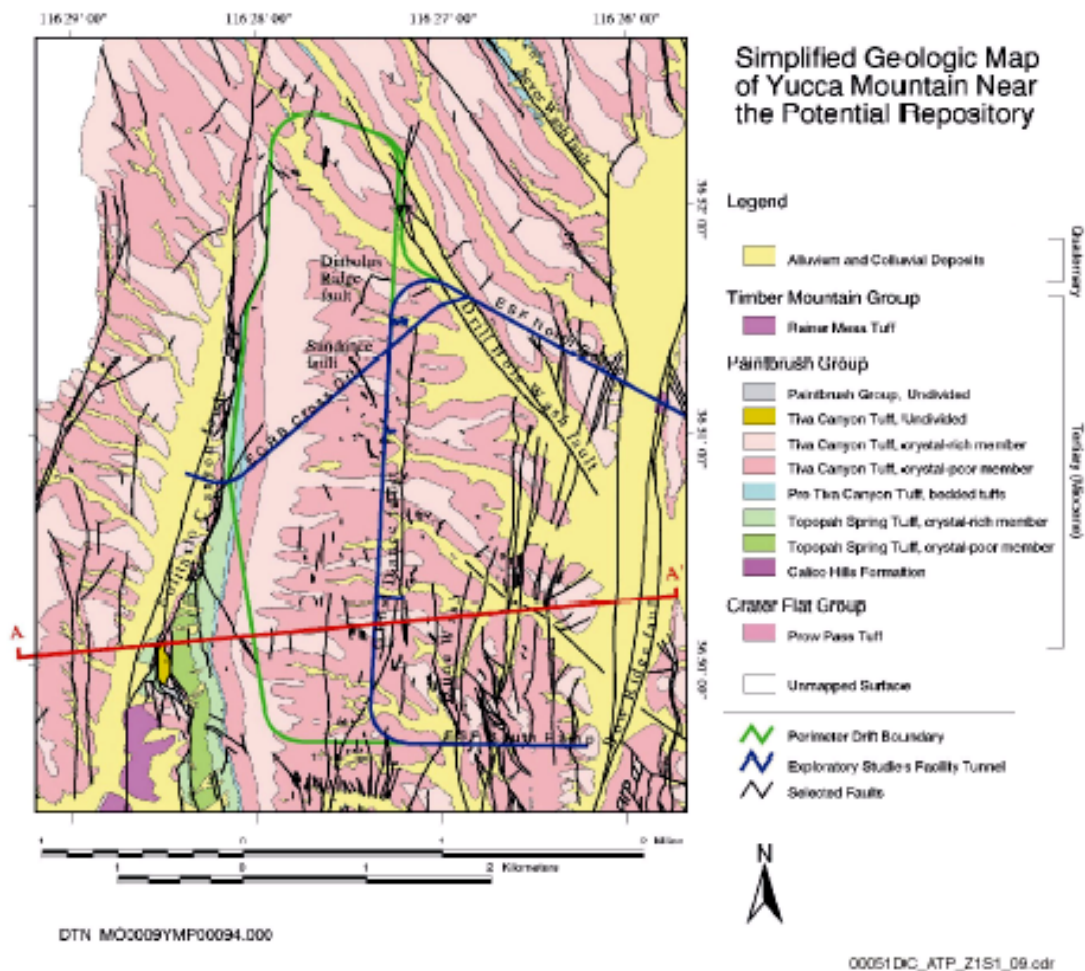


図2.1.1-3 Yucca Mountainサイト周辺の地質図 (DOE, 2002)

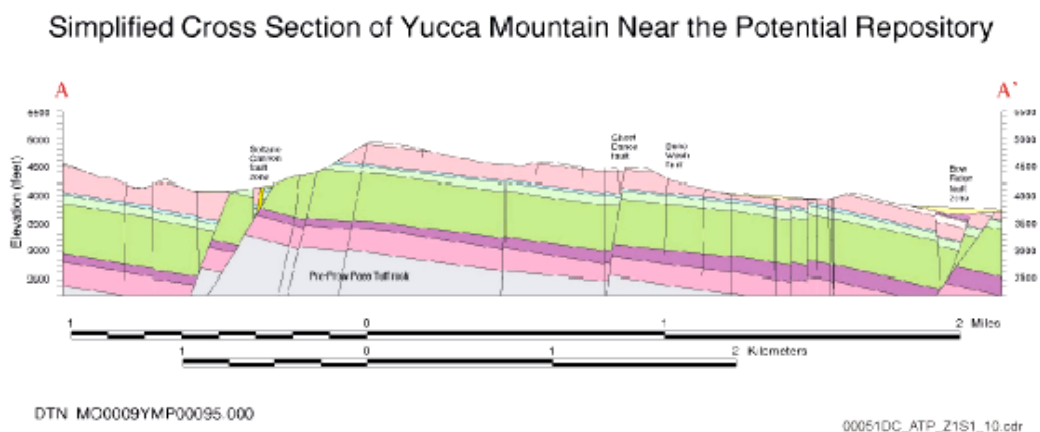


図2.1.1-4 Yucca Mountainサイト周辺の地質断面図 (DOE, 2002)

() 地下水流出域の概要把握

Yucca Mountain の飽和層での地下水流動と移行プロセスに関するモデル開発の目的は、処分場位置より下部の地下水面にある核種流出点から生物圏への流入点までの移行を評価することである。

図 2.1.1-5 に飽和層における 3 次元地下水流動モデルの概要を示す。図中の赤色部分がサイトを示している。青色線で囲んだ部分は、地下水流動モデル境界（サイトスケール）である。また、緑色の矢印は、地下水流動モデルによる地下水流動方向を示している。さらに黄色部分は、地形的に低地であり、地下水の流入域である。

Yucca Mountain の地下水は、Death Valley 地下水流動系であり、Alkali Flat-Furnace Creek 堆積盆地 (subbasin) に含まれる。Death Valley 地下水流動系内への涵養は、降雪および降雨量が比較的多い高地で生じる。Alkali Flat-Furnace Creek 堆積盆地への水の流入は、堆積盆地の北側境界沿いでの地下水流入、堆積盆地の高標高地域での降水による涵養、Fortymile Canyon および Fortymile Wash の表層流出による涵養が含まれる。Yucca Mountain の北部および北東部における降水による涵養は、Timber Mountain, Pahute Mesa, Rainier Mesa, Shoshone Mountain においても発生すると考えられている。

図 2.1.1-6 は、3 次元地下水流動解析で考慮される、飽和層での移行に重要な特性およびプロセス概念を示している。図 2.1.1-6 のように、3 次元地下水流動解析では、Yucca Mountain の亀裂媒体あるいは多硬質媒体での移行プロセスを考慮しており、さらに、合理的な最大被ばく地点として、Amargosa Valley での井戸水飲用を仮定している。

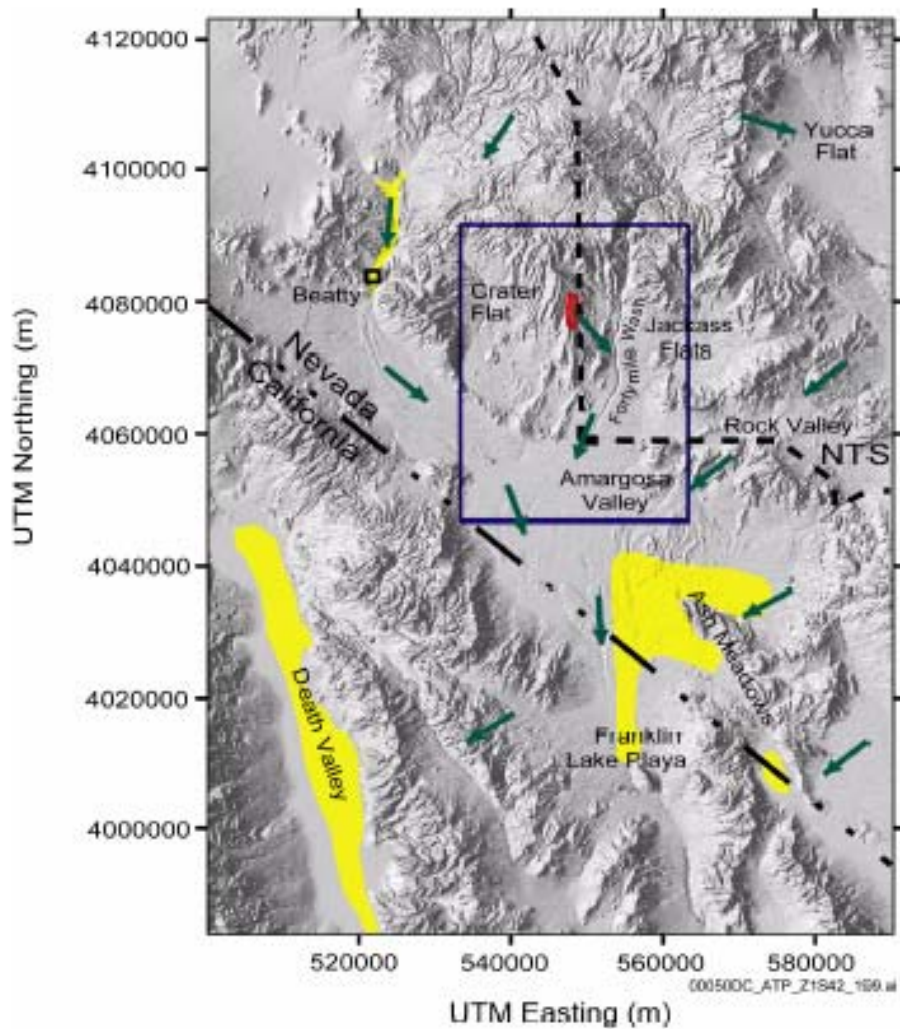


図2.1.1-5 Yucca Mountainの飽和層における地下水流動系 (DOE, 2002)

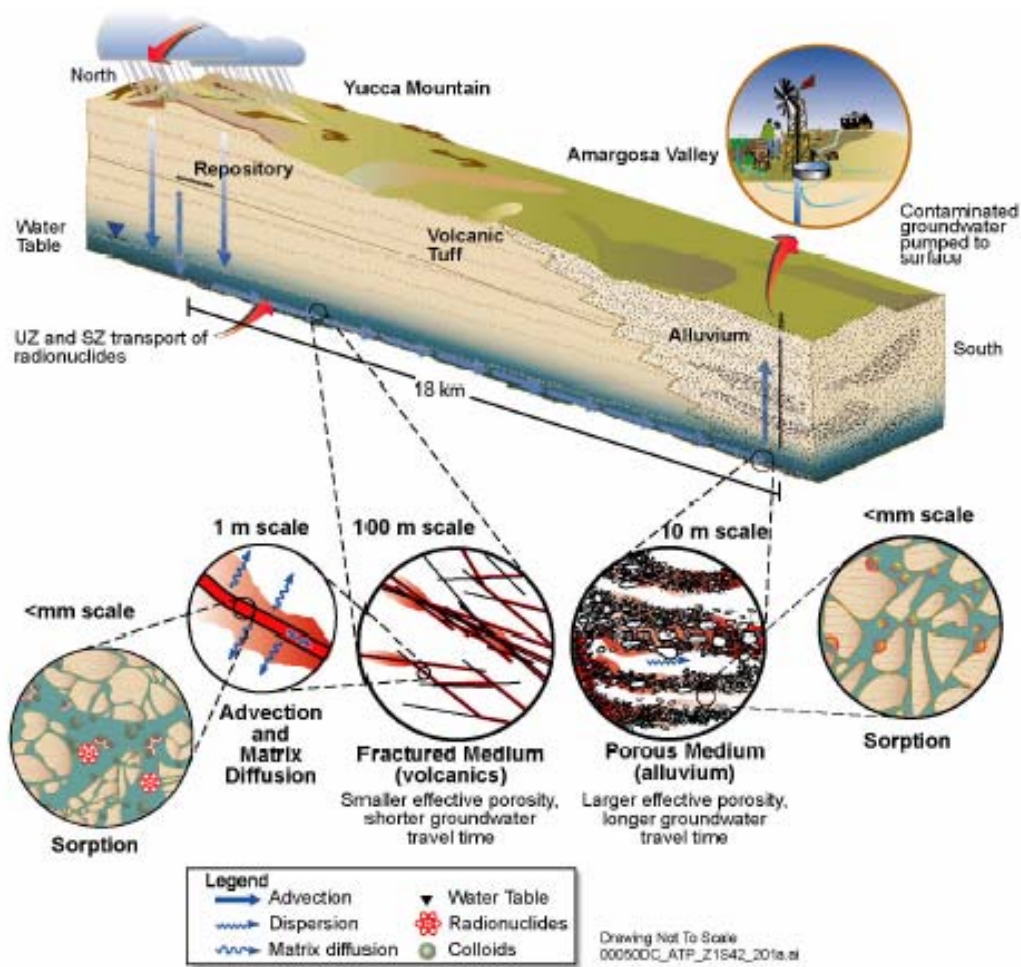


図2.1.1-6 Yucca Mountainの飽和層における移行に重要な特性およびプロセス
(DOE, 2002)

図 2.1.1-7 に、サイトスケールでの凝灰岩および沖積層での流路の一部と処分場からの地下水移行経路を示す。図 2.1.1-7 では、凝灰岩中での流路を赤、沖積層中での流路を青で示している。なお、凝灰岩と沖積層との接合点は不明確であることから、評価計算上は確率論的に扱われている。

Yucca Mountain の飽和層でのプロセスモデル開発のためのデータ収集作業は、1980 年代初頭に実施された集中的な地表調査に始まり、現在では地下坑道試験、飽和層での試験（C-wells Complex）、沖積層での試験（SZ Alluvium Testing Complex）を中心としたものへと進展している。また、モデルに関しても、初期のサイトに関する概念的なものから、サイトスケールでの飽和層での地下水流動・移行モデルへと進展している。

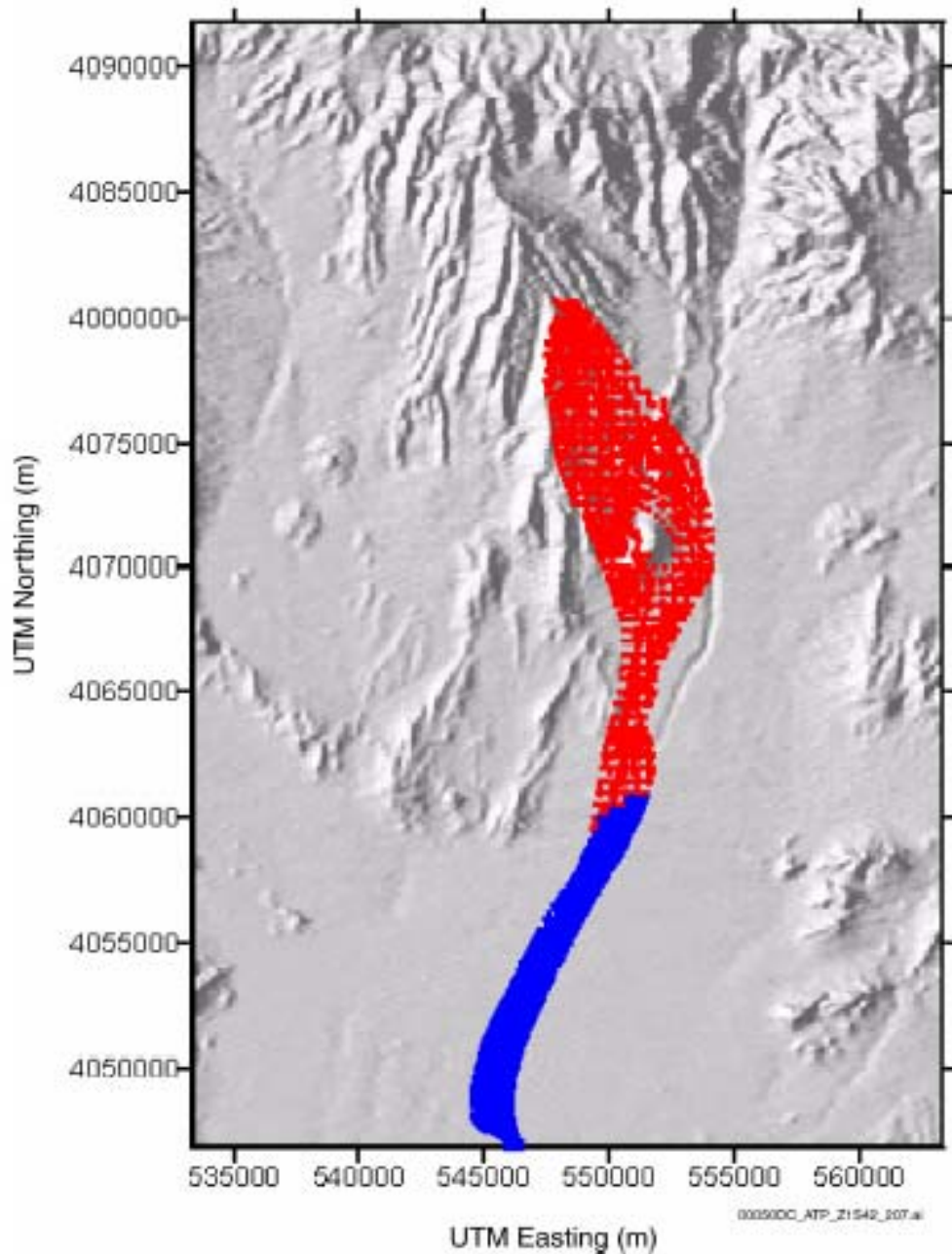


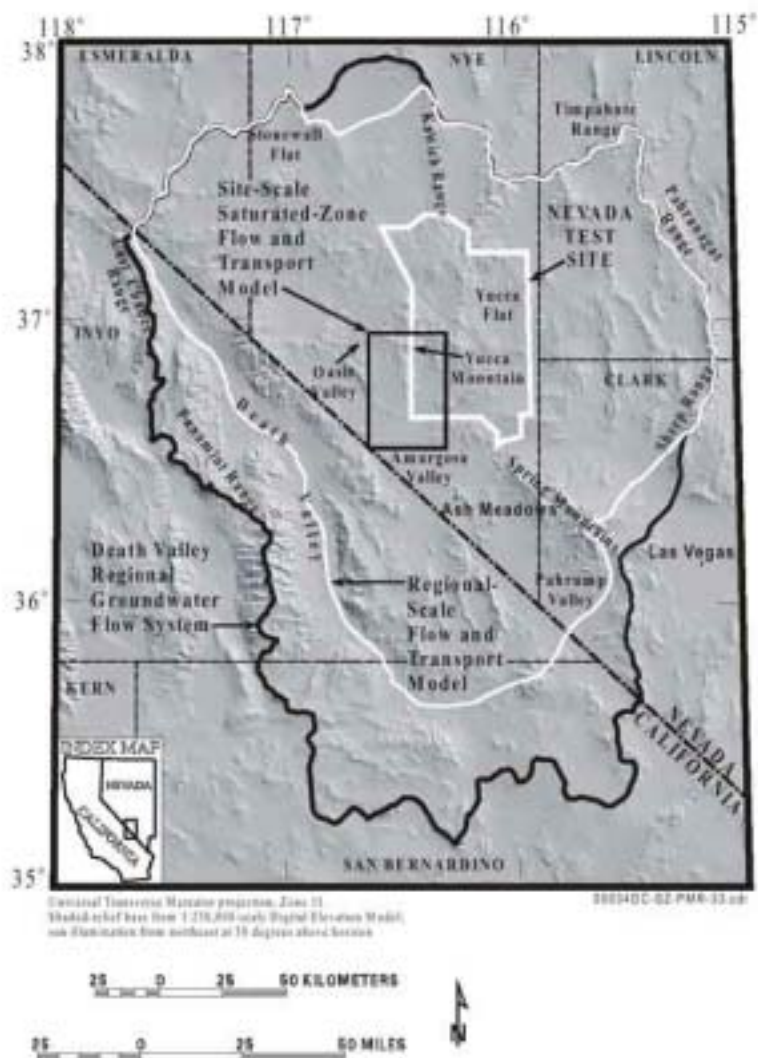
図2.1.1-7 Yucca Mountainの飽和層における地下水移行解析結果 (DOE, 2002)
(赤: 凝灰岩中での流路 / 青: 沖積層中での流路)

さらに DOE は、処分場からの核種移行について地下水媒体が支配的であると考
え、Yucca Mountain サイト近傍での地下水流動および核種移行を特徴づけ、モデ
ル化するための検討を行っている。以下では、モデル化のために設定したサイト
スケールとその特性、あるいは地下水流動把握のために取得されている物理化学
特性についてその概要を示す。

(a) スケールモデル

飽和層における地下水流動のモデル化は、サイトスケールと広域スケールの 2
種類について実施されている。図 2.1.1-8 に Yucca Mountain の地下水流動モデル
に関する広域スケールとサイトスケールを示す。図 2.1.1-8 において、広域スケ
ール(図中太線で囲まれた部分) は、およそ 50,000km² のエリアで、Death Valley
地下水流動系と Yucca Mountain サイト全体を含んでいる。また、サイトスケール
(図中細線四角で囲まれた部分) は、サイト境界南西部の Yucca Mountain を含む、
1,350km² のエリアで、処分場と NRC の提案規則 10 CFR 63 (10 CFR
63.115(b)(1) [64 FR 8640]) で提案されている処分場候補地から 20km 南方の地点
を含んでいる。

さらに、設定したそれぞれのスケールでの環境特性の把握を行っている。表
2.1.1-1 に DOE (2002) による、各スケールにおける、自然地理、気候、土壌・
植生、地質環境、地下水流動に関する特性を示す。なお、サイトスケールでの特
性については、広域スケールに基本的に準じるため、相違点のみを示している。
地下水流動については、水理データ(水位、井戸試験、涵養) や地下水化学デー
タ(特徴的なパターン、トレーサ試験結果、酸化還元電位) にもとづくものであ
る。



Source: Adapted from D'Agnese et al. (1997)

Figure 2-1. Boundaries of the Death Valley Regional Groundwater Flow System, the Regional-Scale Flow and Transport Model, the Nevada Test Site, and the Site-Scale Saturated Zone Flow and Transport Model

図2.1.1-8 Yucca Mountainサイトにおける地下水流動・移行モデル
 (広域スケールおよびサイトスケール) (CRWMS M&O, 2000a)

表2.1.1-1 広域スケールおよびサイトスケールの地域特性結果
(CRWMS M&O , 2000a)

	広域スケール	サイトスケール
自然地理	<ul style="list-style-type: none"> 標高は86～3,600m。 対象エリアの25%は高地，残りは山間盆地。 Great Basin南部にDeath Valleyがある。 山間盆地は，沖積層と局所的に層間火山性堆積物で覆われる。 	<ul style="list-style-type: none"> 標高は，モデルエリアの南側境界でおよそ710m，北東部分で2,200m。
気候	<ul style="list-style-type: none"> 地域北部の特徴は，暖かい乾燥した夏と寒い乾燥した冬からなる。 地域南部の特徴は，暑い乾燥した夏と暖かい乾燥した冬からなる。 年間降雨量は高地で多く，低地で少ない。 現在の気候は間氷期の特色を示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 温度および降水量の極限值は，広域スケールでの値未満である。
土壌・植生	<ul style="list-style-type: none"> 一般的な山地・丘陵地の土壌は，浅く，粗い粒子の土であり，水分はほとんどない。 降雨が涵養となるほど十分深く浸透する前に，植生が降雨水の多くを吸い出してしまう。 	
地質環境	<ul style="list-style-type: none"> 地質学的に10種類のユニット*に分類可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質学的に18種類のユニット**に分類可能。 一部の広域スケールユニットはサイトスケールエリアには存在しない。
地下水流動	<ul style="list-style-type: none"> 海洋への排出のない閉じた系であり，蒸発または蒸発散によってのみその領域から水は排出される。 涵養は，比較的降雪量および降雨量の多い標高の高い地域で起こる。 地下水は，第四紀・第三紀・古生代の帯水層を通して，流出域へと流れしていく。 動水勾配によって地下水流路は決まる。(図2.1.1-9参照) 	<ul style="list-style-type: none"> モデルエリアの地下水流動は南方へ向かっている(図2.1.1-10参照)。 モデルエリアの多くでは，緩やかな動水勾配を示したが，北部地域では大きな差異が見受けられる。 涵養は，降水と低頻度の流水の浸透に限られる。降雨による浸透は高地に限定される。 自然流出(湧水，浅地下水の蒸発)は起こらない。 井戸の揚水により，かなりの流出が起こる。

* 先カンブリア時代火成岩・変成岩，古生代 - 先カンブリア時代碎屑岩，古生代炭酸塩岩，中生代堆積岩・metavolcanic rock，第三紀 - ジュラ紀後半花崗岩，第三紀火山岩・火山碎屑岩，第三紀火山岩，第四紀 - 第三紀火山岩，第四紀 - 第三紀谷の埋積物，第四紀ブラヤ堆積物

** 谷埋積物帯水層，谷埋積物加圧層，石灰岩帯水層，溶岩流帯水層，上部火山性帯水層，上部火山性加圧層，下部火山性帯水層(Prow Pass Tuff)，下部火山性帯水層(Bull Frog Tuff)，下部火山性帯水層(Tram Tuff)，下部火山性加圧層，旧火山性帯水層，旧火山性加圧層，未分化谷埋積物，上部炭酸塩帯水層，上部碎屑性加圧層，下部炭酸塩帯水層および下部炭酸塩帯水層衝上断層，下部碎屑性加圧層，花崗岩加圧層(DOE, 2000)

(b) 水理データ

Yucca Mountain の水理データについては、地下水位、井戸の水理試験から得られた帯水層特性、および浸透・涵養に関する情報が取得されている。図 2.1.1-9 に広域スケールでの地下水ポテンシャル面（海拔高度）を示す。これは、地下水位、永久湿地・沼境界、標高、広域での湧水位置、涵養・流出域の分布および水理地質データセットを用いて作成されている。また、図 2.1.1-10 にサイトスケールの地下水ポテンシャル面を示す。これは、新たな掘削井戸からの情報を含めた水位データや近年の地質図情報を用いている。

サイト岩盤の透水係数および有効間隙率は、地下水および汚染物質の移行計算に必要な最も重要な物理特性である。Yucca Mountain では、サイト特性調査の一部として、Yucca Mountain サイト内およびその周辺の 37 本の試錐孔において、飽和層に関する 150 件以上の水理試験が実施されている。図 2.1.1-11 に掘削された試錐孔位置を示す。これらの試錐孔を利用した試験の多くは 1980 年代初頭に実施されており、多くの透水量係数もしくは透水係数が取得されている。また、少数ではあるが貯留係数や比産水率（specific yield）*も取得されている。

Yucca Mountain 周辺の地下水起源としては、上向き勾配の火山性帯水層（volcanic aquifer）および加圧層（confining unit）からの浸透、Fortymile Wash からの局所的な涵養、Yucca Mountain 地表に浸透する降雨（特に、北部にある高地）、下層の炭酸塩帯水層から上方への水の流れが挙げられる。Yucca Mountain における鉛直勾配の測定の結果、上向きに地下水が流れる可能性が示唆されている。このため、現在の気候状態では、降水による局所的な浸透が Yucca Mountain エリアで発生しても、地下水面に達する浸透量は重要視されない可能性がある。ただし、Yucca Mountain 北部では、浸透量は大きい。

* 不圧帯水層の貯留係数にほぼ等しい値。単位あたりの地下水位低下に対応して帯水層貯留から単位面積あたりに排出される水量(%)。

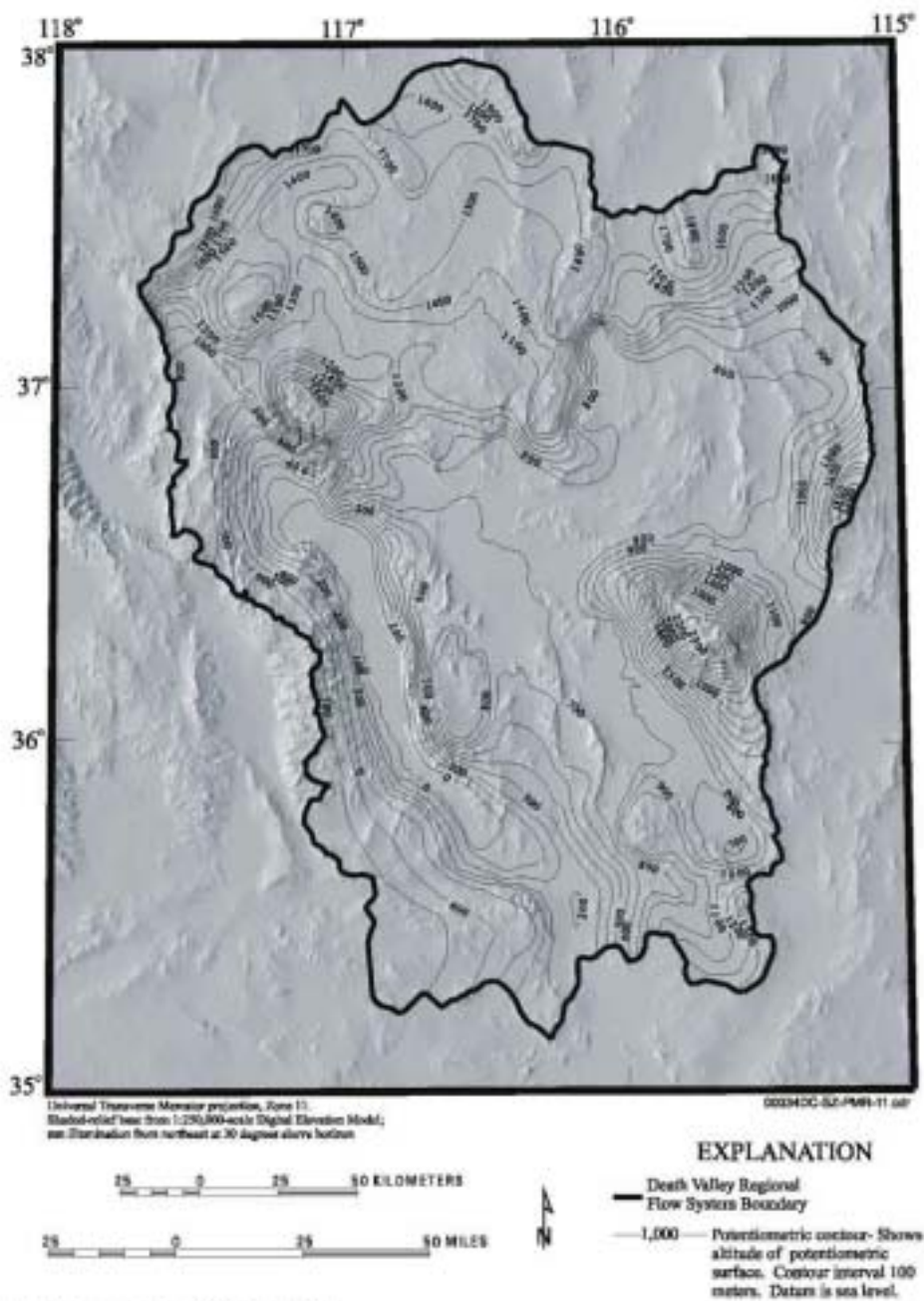


Figure 3-2. Regional-Scale Potentiometric Surface Map

図2.1.1-9 広域スケールでの地下水ポテンシャル面 (CRWMS M&O, 2000a)

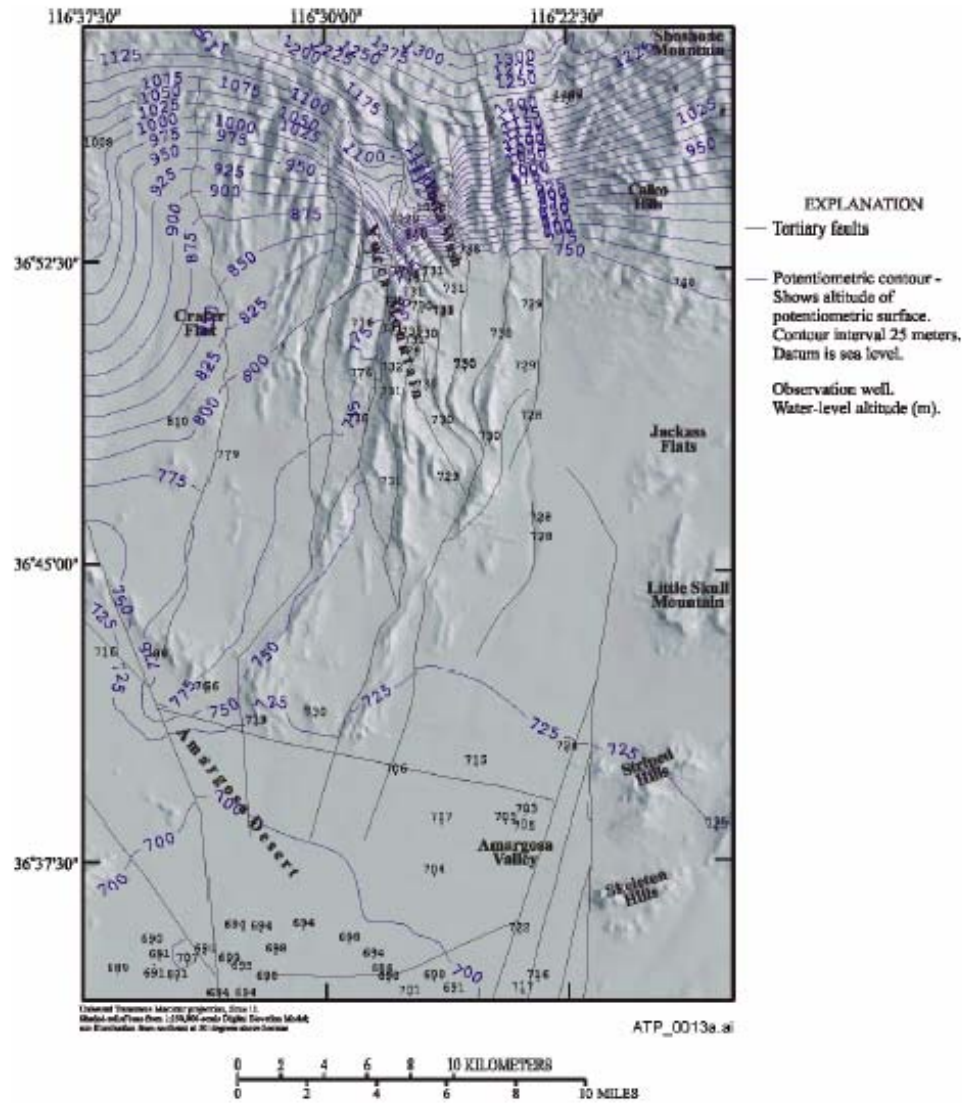
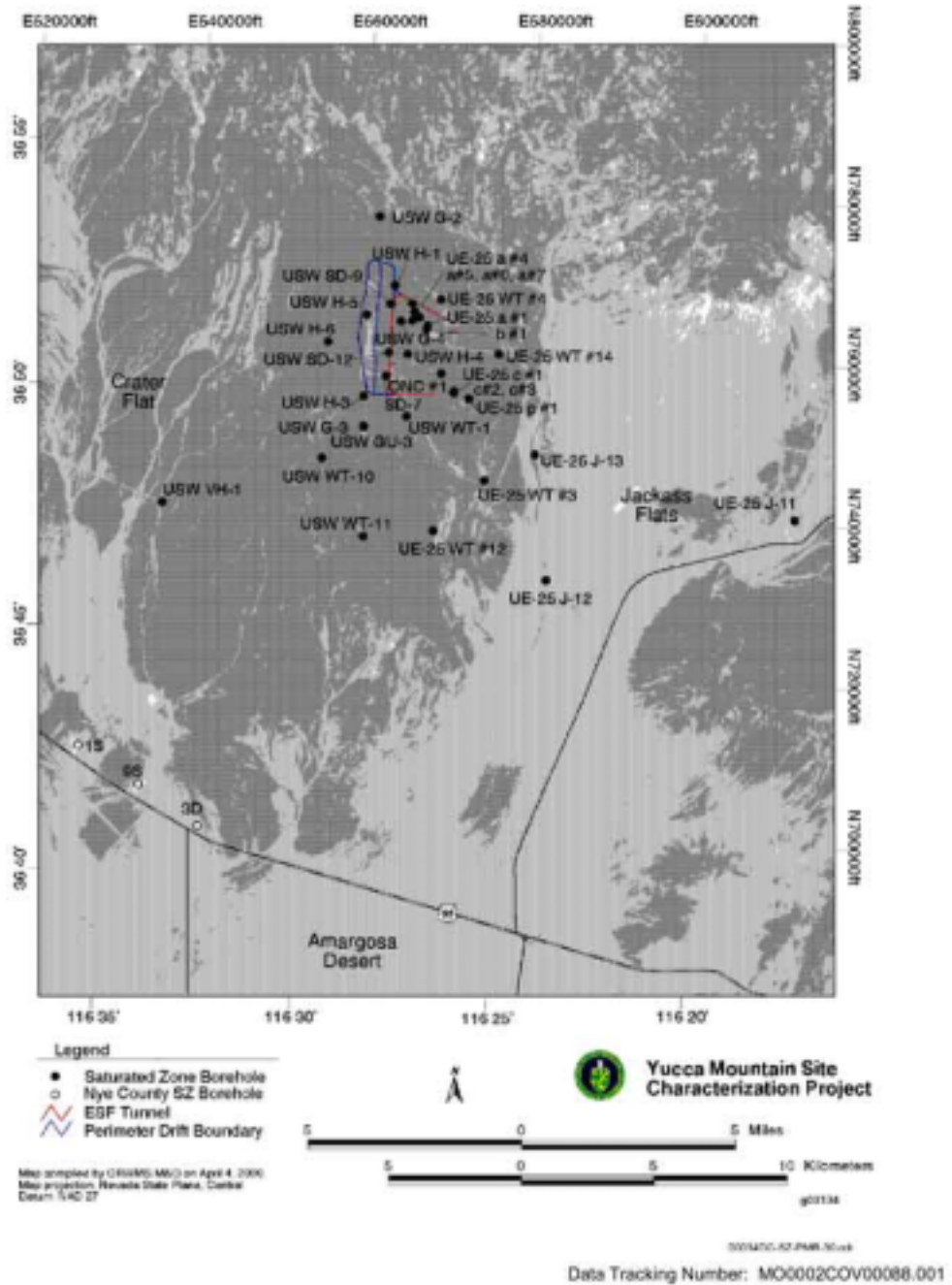


図2.1.1-10 サイトスケールでの地下水ポテンシャル面 (DOE, 2002)



NOTE: This map shows some of the boreholes near Yucca Mountain in which hydraulic tests were conducted.

Figure 3-7. Boreholes Near Yucca Mountain

図2.1.1-11 Yucca Mountainサイト周辺で掘削された試錐孔位置
(CRWMS M&O, 2000a)

(c) 地下水化学データ

Yucca Mountain の地下水化学データについては、その分布、トレーサ試験による結果、酸化還元電位 (Eh) に関する情報が取得されている。

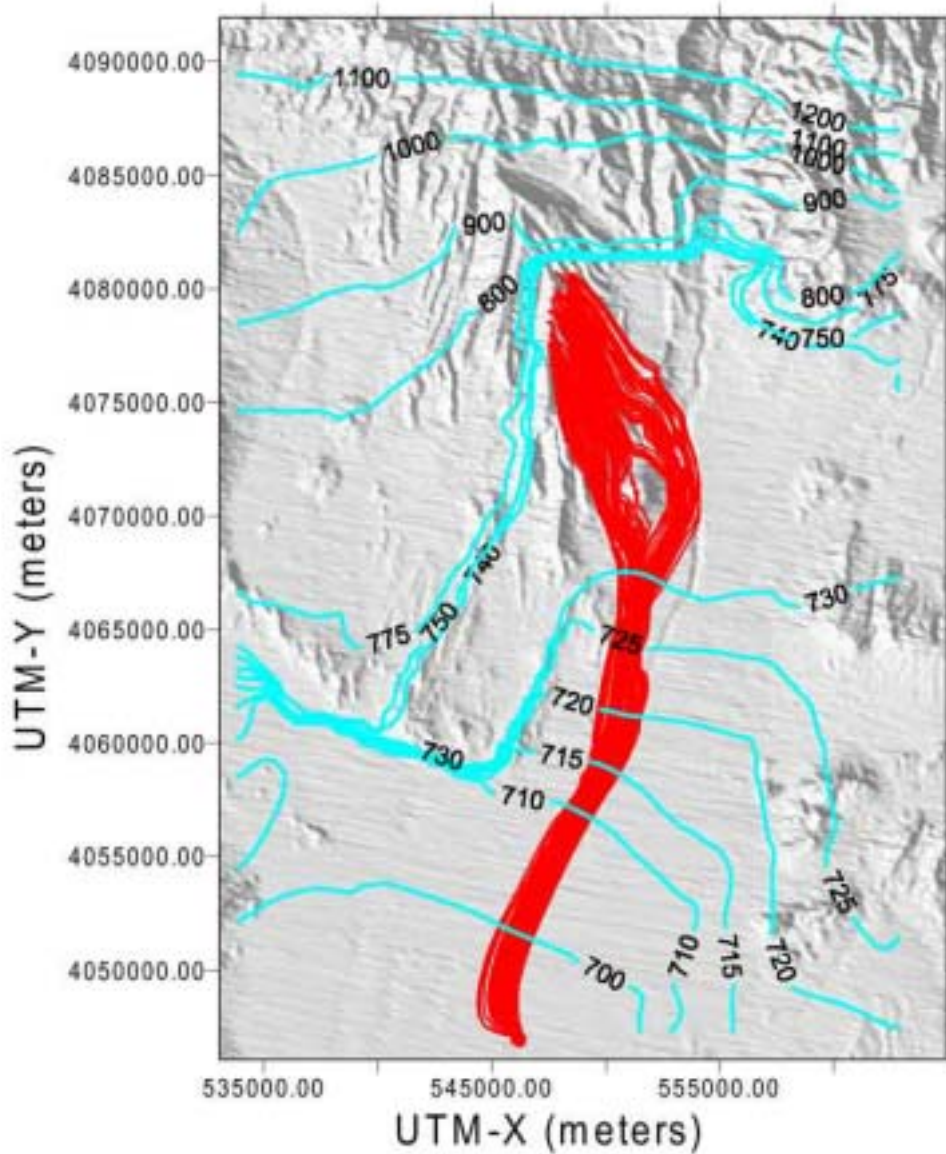
Death Valley における広域地下水流動系での水化学および同位体水理手法により、涵養および広域地下水流動に関する情報が取得されている。広域スケールでの地下水化学特性の把握から、基本的な 2 種類の水 (高シリカ含有の低濃度の重炭酸ナトリウム水と低シリカ含有の高濃度の重炭酸カルシウムマグネシウム) が存在することが知られている。同位体化学データは、H-2 と O-18 含有水、H-3 と C-14 含有水、C-13 含有水の解析から得られる。なお、地下水化学と同位体データから得られた結果は、前項の Yucca Mountain 近傍での地下水流動に関する水理学的知見と一致するものであった。

核種の移行率は、地下水流動系の酸化還元電位 (Eh) の影響を受ける可能性がある。地下水の酸化還元状態を特定することを目的とした測定が、Yucca Mountain の試錐孔および NCEWDP (Nye County Early Warning Drilling Program) 試錐孔から得られた地下水で実施された。その結果、核種移行に対する低 Eh バリアは、Yucca Mountain の深部火山性層、処分場位置より下部の火山岩地下水近傍、処分場から南方にある Amargosa Valley の沖積層に存在する可能性があることがわかった。

(d) 地下水流出域の把握

DOE では、このような知見を基に、サイトスケールでの飽和帯地下水流動・核種移行モデルを構築し、核種の流出域の把握を行っている。サイトスケールモデル内では、飽和帯からの自然流出 (すなわち、湧水や蒸発散) はないと判断されたため、地表への自然流出は解析シミュレーション内では表現されない。なお、断層あるいは断層帯は、地下水流動に対する支配的な流路もしくはバリアとなる可能性があり、地下水流動パターンに大きな影響を及ぼす可能性がある。このため、飽和帯における地下水流動・核種移行モデルでは特別な扱いが必要とされる。

図 2.1.1-12 にサイトスケールでの飽和層での地下水流動および核種移行モデルからパーティクルトラッキング法により予測された流路を示す。図 2.1.1-12 のように、処分場からの地下水は南方 - 南西方向に 20km 離れたサイト境界へと移行していく。



Source: Adapted from CRWMS M&O (2000n, Figure 8)

Figure 3-21. Flow Paths Predicted by Site-Scale Saturated Zone Flow and Transport Model

図2.1.1-12 飽和層地下水流動・核種移行モデルにより予測された流路
(サイトスケール) (CRWMS M&O, 2000a)

() G B I 候補の選定

生物圏は処分場の全体的な性能評価で考慮する各コンポーネントモデル中の最後のコンポーネントであり，上流側とは，ノミナルケースである汚染地下水利用シナリオでは飽和帯地下水流動・移行モデル，および地表への火山灰の拡散を考慮した直接火山放出シナリオでは火山分散モデルと連結している。ここでは，ノミナルケースである汚染地下水利用シナリオについて記す。

上述のように，Yucca Mountain サイトについて，サイトスケールモデル内では，飽和層から自然流出（すなわち，湧水や蒸発散）することはなく，地表への自然流出は解析シミュレーション内では表現されない。このため，G B I の設定に関しては，提案規則 10 CFR Part 63 に規定されているように，「Yucca Mountain サイトに関する生物圏評価では，処分場サイトからの地下水流動方向で最も近くのコミュニティである Amargosa Valley 内で，給水のために地下水を揚水することで生じること」としている。Amargosa Valley は，地下水中核種放出に対して下流方向にある（一般に，仮想的な農業集団が存在するようなレファレンス生物圏は，処分場候補地から，水文学的に下流方向に位置するものである。），処分場候補地に最も近いエリアであり，地下水面の深さは，農作業により接近可能である。すべての核種は井戸からの揚水によるものとし，この集団が使用する地下水中に均一に分布しているものとする。表 2.1.1-2 に NRC による提案規則 10 CFR Part 63 のうち，生物圏に関する記述部分（10 CFR Part 63.115）を示す。

表2.1.1-2 NRC 10 CFR Part 63における生物圏評価に関する記述

<p>§ 63.115 レファレンス生物圏および決定グループの必要な特性</p> <p>(a) レファレンス生物圏</p> <p>(1) レファレンス生物圏を説明する特徴，事象，プロセスが，ユッカマウンテンサイトの周辺地域の条件に関する現在の知見に一致する。</p> <p>(2) 生物圏における核種移行経路が，乾燥または半乾燥条件に一致する。</p> <p>(3) 気候変化が，ユッカマウンテンサイトの周辺地域の自然気候変動に関する地質学記録に一致する。</p> <p>(4) 地質環境の変化が自然プロセスの現在の知見に一致する。</p> <p>(b) 決定グループ</p> <p>(1) 決定グループは，地下施設から約 20 キロ南の農業共同体に居住する（ネバダ州ラスロップウェルズ国道 95 号と州道 373 号の交差点がおおよそその位置）。</p> <p>(2) 農業共同体の挙動と特性は，ユッカマウンテンサイトを取り囲んでいる地域の現在の条件に一致する。土地利用，ライフスタイル，食事，人間の生理学，または新陳代謝を含むが，それに限定されない決定グループの挙動および特性の時間経過による変化は，考慮されない。</p> <p>(3) 決定グループは，約 100 人の個人から成る農業共同体に居住し，最大の予想年間線量をもたらす挙動または特性を表す。</p> <p>(4) 決定グループの平均的なメンバの挙動と特性は，決定グループの変動性範囲の平均値にもとづく。平均値は，数人の個人の極端な習慣にもとづいて過度に偏らない。</p> <p>(5) 決定グループの平均的なメンバは成人である。新陳代謝および生理学上の検討事項は成人に関する現在の知見に一致する。</p>

() G B I 設定に関するまとめ

Yucca Mountain では，地質環境特性の把握により，天然の地下水湧水域がない。このため，G B I 設定にあたっては，汚染地下水との接近は，将来の農業集団が給水のために揚水することで生じるとしており，その決定グループは，処分場候補地から 20km 南方の地点にある Amargosa Valley に位置する農業共同体に居住する人間としている。なお，この処分場候補地からの距離に関しては他の地域との相対的な居住者の数によるものである。

本調査の結果，ユッカマウンテンプロジェクトでの G B I 設定手法は，図 2.1.1-13 のとおりであると考えられる。Yucca Mountain サイトについては，上述のような点で，わが国の典型的な環境とは異なっており，G B I 設定手法の視点からは参考とすべき情報は少ないものの，G B I 設定に至る種々の調査手法や項目については参考となると考えられる。

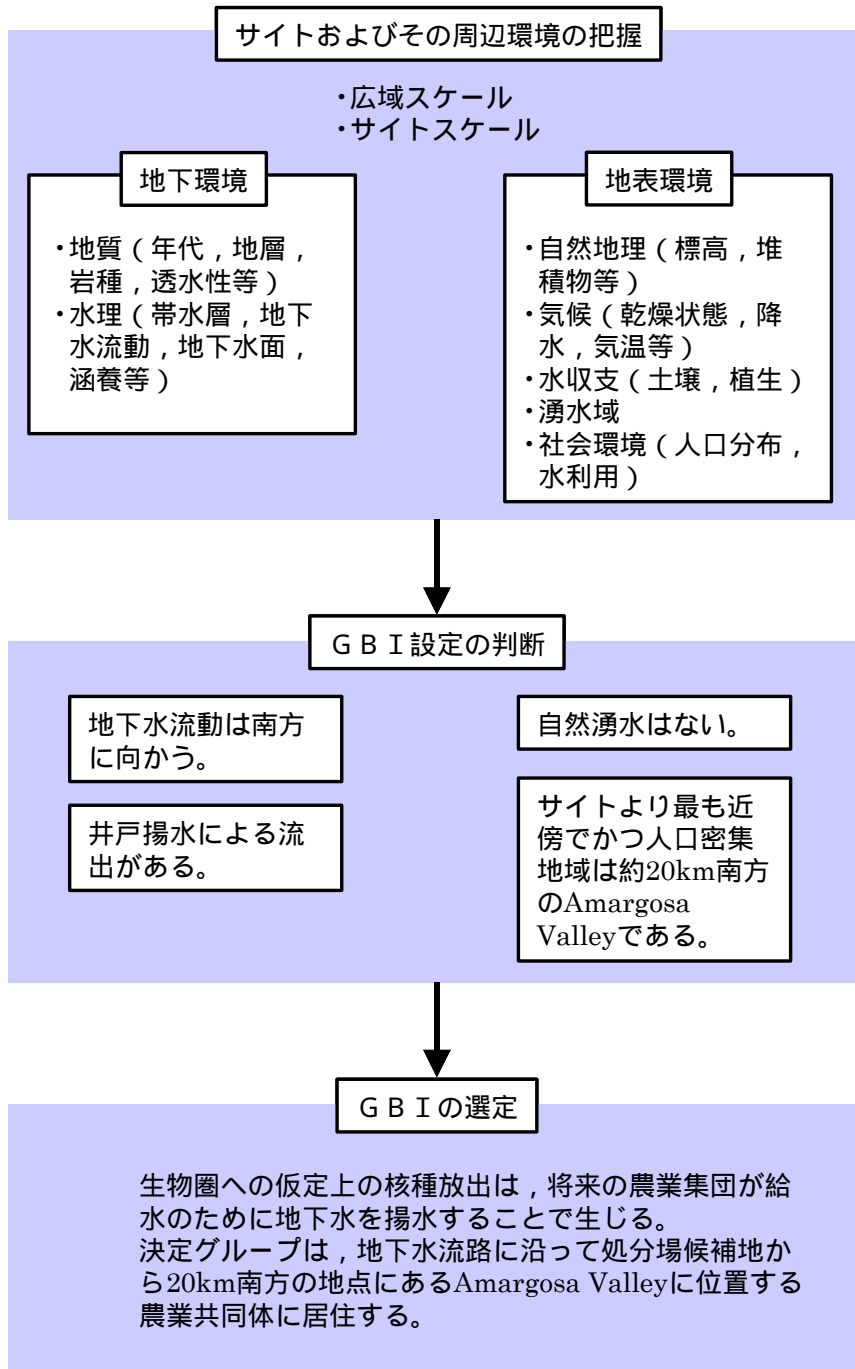


図2.1.1-13 ユッカマウンテンプロジェクトでのG B I 設定の流れ

(2) 性能評価書 (SR-97) およびその関連文書 (スウェーデン)

昨年度のスウェーデンの G B I 設定に関する調査では、主に実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (以下「SKB」という。) が 1999 年に公表した「使用済燃料のための地層処分 SR-97：閉鎖後安全性 (SKB, 1999)」(以下、「SR-97」という) を参考に調査を実施した。本項では、これらの調査結果を踏まえつつ、さらにサイト環境の把握などに関する文書の調査を新規に行い、G B I 設定に関する周辺情報を調査する。また、近年、SSI を中心に表層水理環境を考慮した生物圏評価に関する検討が実施されてきている。これらの調査結果については、2 . 1 . 2 項に記述する。

() 環境条件

SR-97 では、スウェーデンの 3 ヶ所の仮想的な処分場サイト (Aberg, Beberg, Ceberg) について生物圏評価を行っている。各サイトデータについては、Aberg は Småland Äspö (南部) , Beberg は Uppland Finnsjön (中央部) , Ceberg は Ångermanland Gideå (北部) での取得データを利用している。図 2.1.1-14 に各仮想サイトの位置を示す。図 2.1.1-14 に示すとおり、これらの仮想サイトはいずれも比較的沿岸に近く、Aberg は沖合の島、Beberg は沿岸から 10km、Ceberg は沿岸から 5km に位置する。また、3 サイトとも代表的なスウェーデンの結晶質基盤岩である。以下に、各仮想サイトについての環境条件 (地形、地質、地表水文など) を記す。

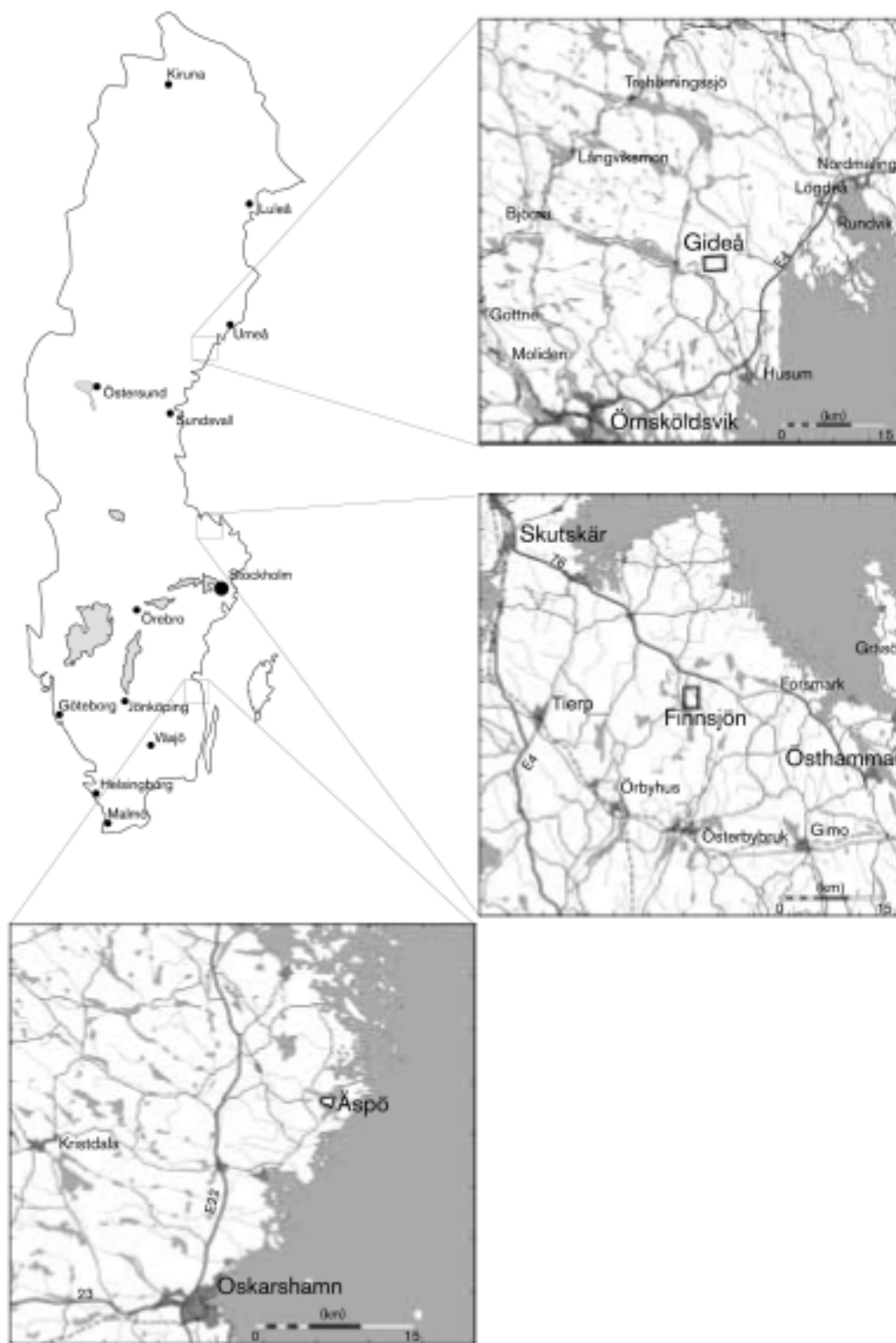


図2.1.1-14 SR-97における3ヶ所の仮想的な結晶質岩系処分場サイト (SKB, 1999)

(a) Äspö 地域 (Aberg)

Äspö 地域は、最大海拔 60m 程度の緩慢な地形である。Äspö 地域の地表環境は主に森林であり、低地部は泥炭地や湿地となっている。表層の地質は、低地部では泥炭および細粒堆積物で覆われており、丘陵部は主に露出した岩と未固結の氷河堆積物で構成される。表土は一般に薄い (0 ~ 5 m) 未固結の氷河堆積物であり、低地部では、粘土、砂、砂利の河川堆積物が未固結の氷河堆積物をさらに覆っている。なお、仮想サイトはスウェーデン南部の Småland 北部にある Äspö 島に位置する。

Äspö 地域の地質は、大まかに 4 種類の結晶質岩 (Ävrö 花崗岩 (Småland 花崗岩) , Äspö 閃緑岩, 緑色岩, 細粒花崗岩) からなる。Äspö 仮想サイトの基盤岩は、鉱物学的に不均質であり、破碎帯や亀裂が比較的多い。透水性は、破碎帯および岩盤とも比較的高い。処分場深度の地下水は塩水であり、その塩分濃度は周辺海域のそれより高いことから、化石水であると考えられている。現在も進行中である隆起にともなう沿岸位置の変化のため、塩分を含んでいない地下水により塩水地下水がゆっくりと洗い流される。

Äspö 地域はバルト海沿岸に位置し、群島および外洋が景観を特徴付けている。開放水域面および島間にある湾が全領域の大部分となっている。地上植生は森林が主であり、モデル領域のほぼ 40% を占めている。平均降水量は比較的小さい。岩盤は主に花崗岩からなり、土壌層は薄く、露出部が頻繁に存在している。草木は松林が支配的である。

図 2.1.1-15 に Äspö 地域のモデルエリアおよび地表水文特性を示す。図 2.1.1-15 のように、Äspö 地域の地表水文は、河川、湖沼、泥炭地で構成されている。

図 2.1.1-16 に仮想サイトである Äspö 島の海拔および地表水文状況を示す。図 2.1.1-16 より、Äspö 島の最大標高は海拔 14m 程度であり、低地には泥炭地が点在している。このため、多くの地表水は、泥炭地あるいは堆積物を經由して海洋へと比較的ゆっくり排出される。

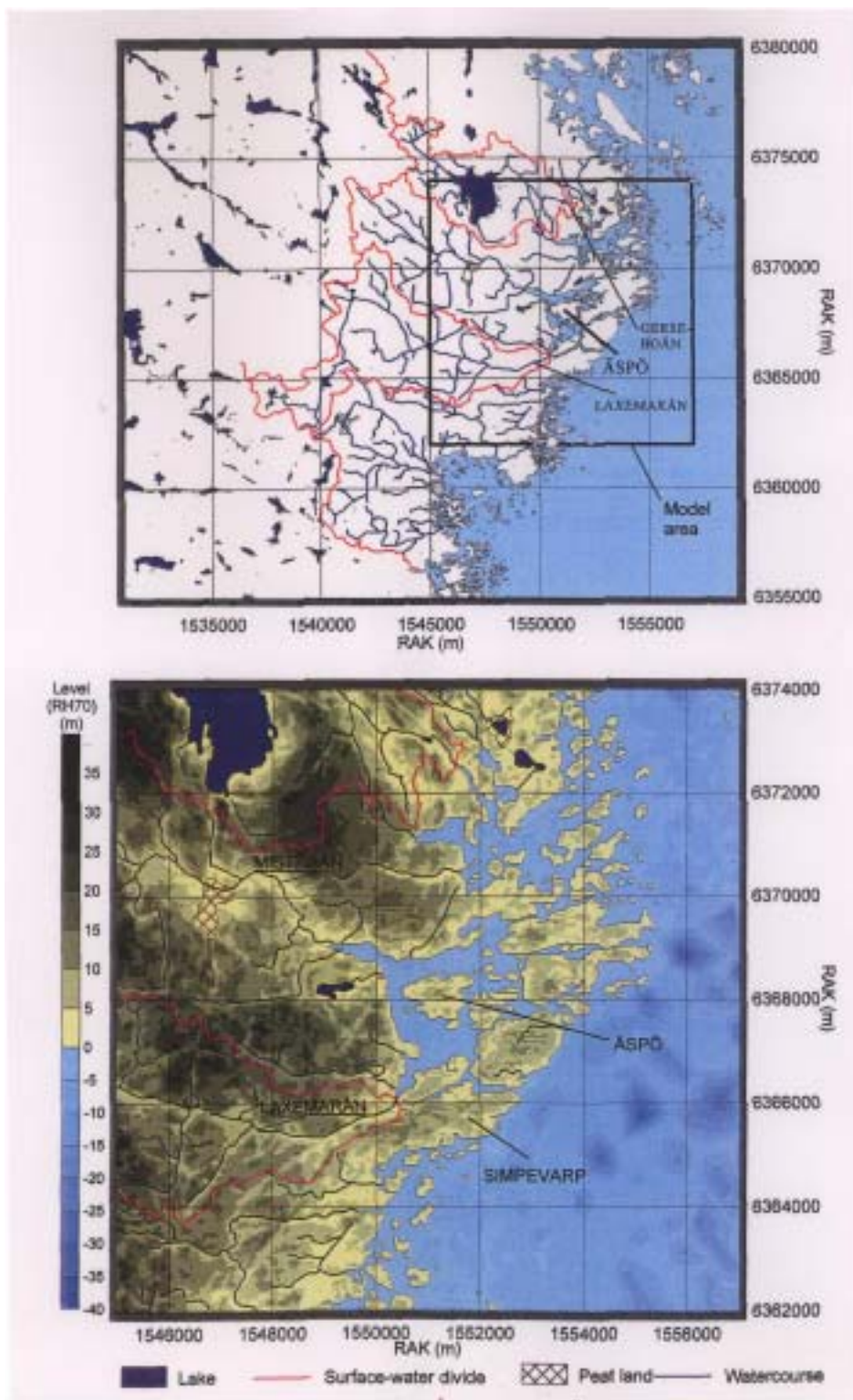


図2.1.1-15 Äspöサイト周辺の水文状況および地形 (Douglas et al. , 1997)

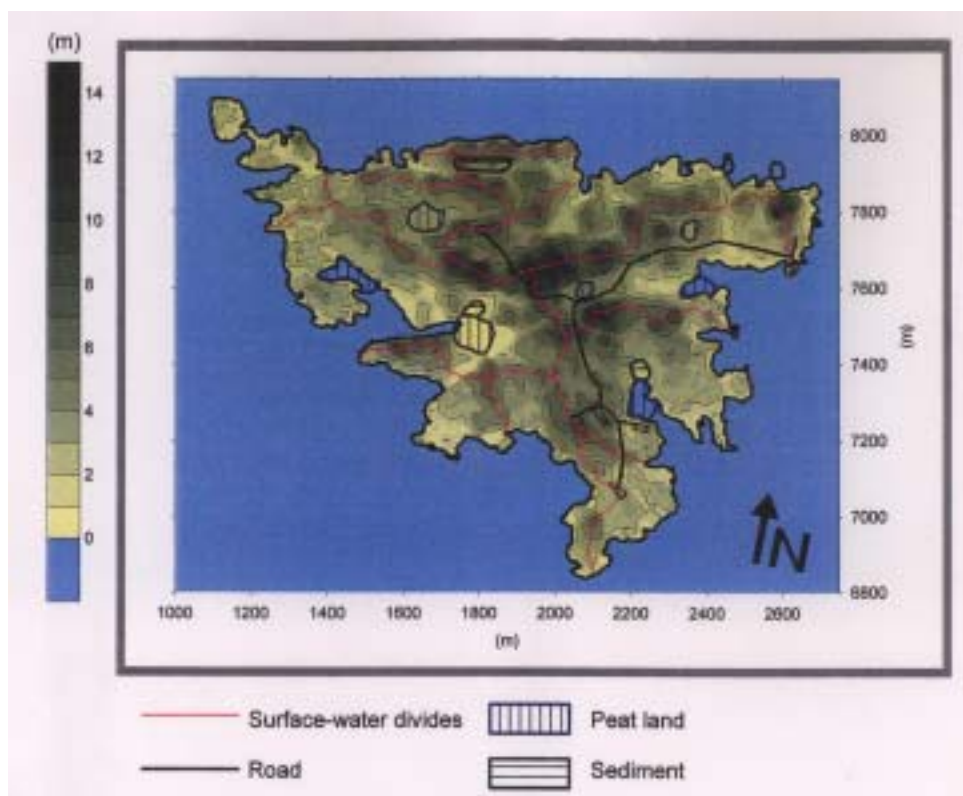


図2.1.1-16 Äspö島の地表水文状況 (Douglas et al. , 1997)

(b) Finnsjön 地域 (Beberg)

Finnsjön 地域は、ほとんど起伏のない平坦な地形であり、結晶質岩が地表に露頭し、湖沼、湿地あるいは沼地が分布している。全領域の多くを森林地が占めており、次いで農耕地、泥炭地となる。領域全体の約 10% が湖に相当する。土地が平坦なため、湿地帯が多い。平均降水量は比較的少ない。モレーン（氷河が運搬した土砂が堆積した地形）、泥炭地、および露出岩が優勢。植生は主として森林からなり、松の木が支配的である。Finnsjön 地域に流れる河川は、東方向のバルト海へと流出する。Finnsjön 地域の平均標高は、海拔 30m であり、その変動範囲は ± 30m である。

Finnsjön 地域の主な基盤岩は、深度 700m にある灰色花崗閃緑岩である。この花崗閃緑岩は、北西方向に急傾斜した縞状構造をもつ。仮想サイトは、中程度の破碎帯と亀裂をともなう鉱物学的に均質な領域である。透水性は、破碎帯および岩盤とも比較的高い。Finnsjön 地域の地質状況を特徴付けているのは、北部にある平坦な破碎帯である。ここでは、特に透水性が高く、地表への自然流量が高い。一方、流量と地下水組成の測定結果より、深部では、地下水流量は非常に少ないことが示されている。地下水は塩水であり、一部吸蔵塩水*である。沿岸位置では隆起が継続しており、長期的には塩分を含んでいない地下水により塩水地下水が交換されていく。

Finnsjön 仮想サイトは、平坦な露頭面、湿地、小さな湖沼が点在する比較的低地の Uppland County の北部沿岸のおよそ 15km 東に位置する（図 2.1.1-17）。Finnsjön 地域北部では、Dalälven 川、Tämnarån 川、Forsmarksån 川および Olandsån 川に、南部では、Öresundaån を経由して Mälaren 湖、Fyrisån 川へと流出する。地形が平坦であるので、地下水面は比較的均一であり、南西から北東に向かって地下水は流れていく。Finnsjön 仮想サイトには、2 種類の流出経路（東部にある鉛直の破碎帯に沿った比較的短い流路と西部にある岩盤を通過するやや長めの透水域）が考えられている。岩盤に比べ破碎帯は透水性が高いため、

* 水成の堆積物が堆積するときに取り込まれ、岩石の空隙中に存在する水。

卓越した流路となる。

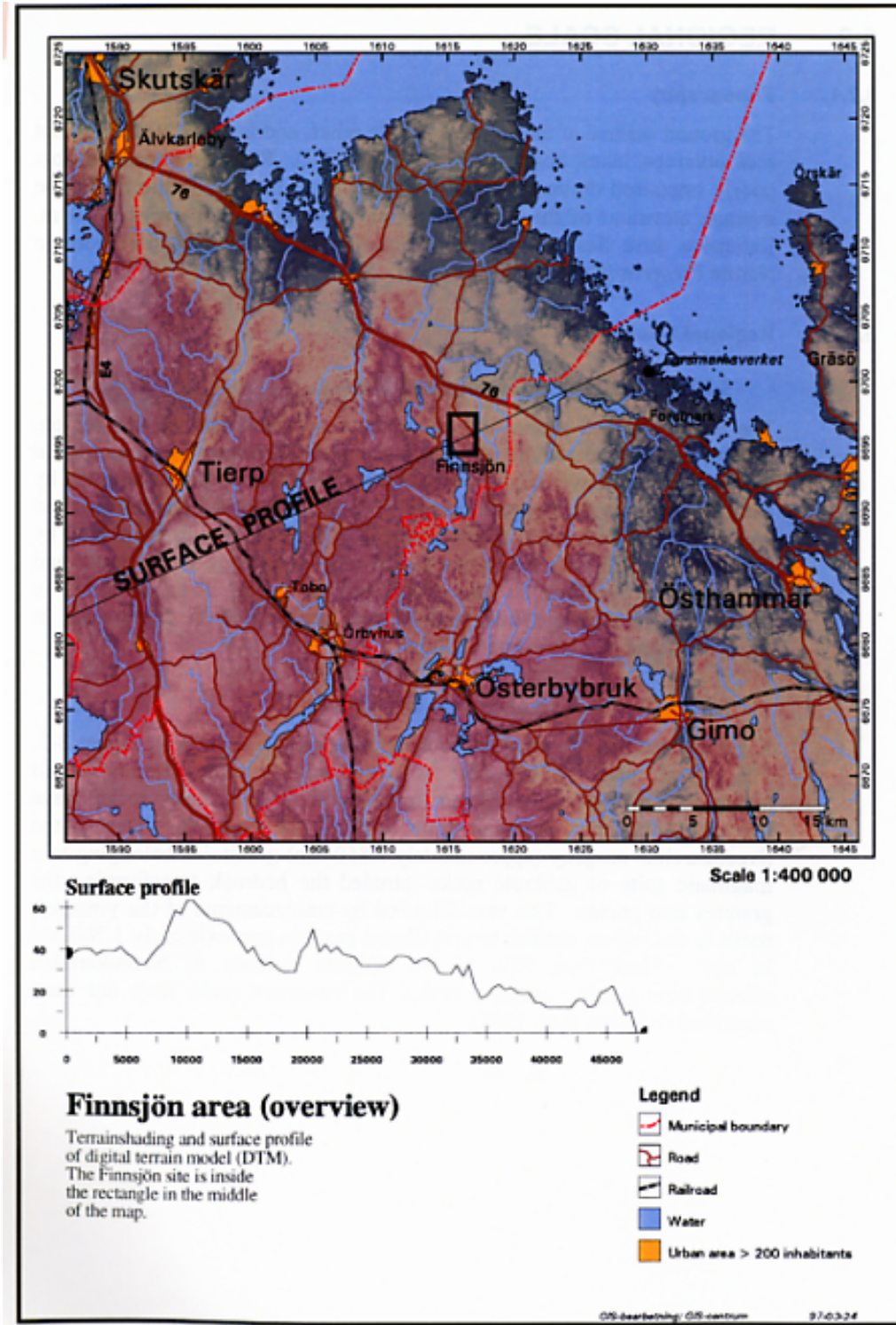


図2.1.1-17 Finnsjön地域およびサイト位置 (Douglas et al. , 1997)

(c) Gideå 地域 (Ceberg)

Gideå 地域は、ボスニア湾から約 20 km 内陸のスウェーデン北部の山岳地帯に位置する。Gideå 地域は、起伏の多い地形であり、海拔は最大 300m 程度である。Gideå 地域の大部分は森林で覆われており、低地には泥炭地が分布している（75%が森林地で、残りは開放地（open land）、湖、湿地帯である。）。平均降水量は、Äspö 地域、Finnsjön 地域よりやや多い。岩の露出部や泥炭地が存在する。支配的な植生は松林である。Gideå 仮想サイトは、2本の河川（Gidealven 川と Husan 川）に挟まれた比較的平坦な台地上に位置する（図 2.1.1-18）。これら河川はどちらとも亀裂のある低地へ北 - 北西方向に流れていく。また、仮想サイト内には多数の湖が存在し、最大の湖沼は Gissjon 湖である。

Gideå 仮想サイトの基盤岩は、堆積起源のミグマタイト化した縞状片麻岩である。縞状片麻岩の支配的な岩種は、片岩、千枚岩、石板をともなう灰色ワッケ（粘土基質砂岩）であり、変質の程度によって変わる。この基盤岩は、幅 15m の鉛直東西方向の粗粒玄武岩岩脈と交差している。Gideå 地域は、頻繁に見受けられる粗粒玄武岩岩脈を除いて、鉱物学的にいえば、かなり均質な領域である。破碎帯の出現率は低いいため、岩盤中の透水性は比較的低い。地下水は塩分を含んでいない。

井戸の地理的位置と地下水コンター図から、領域の中央台地での地下水系は涵養域により決まっており、地下水の流出は亀裂の谷間にある小川で起こることが示されている。

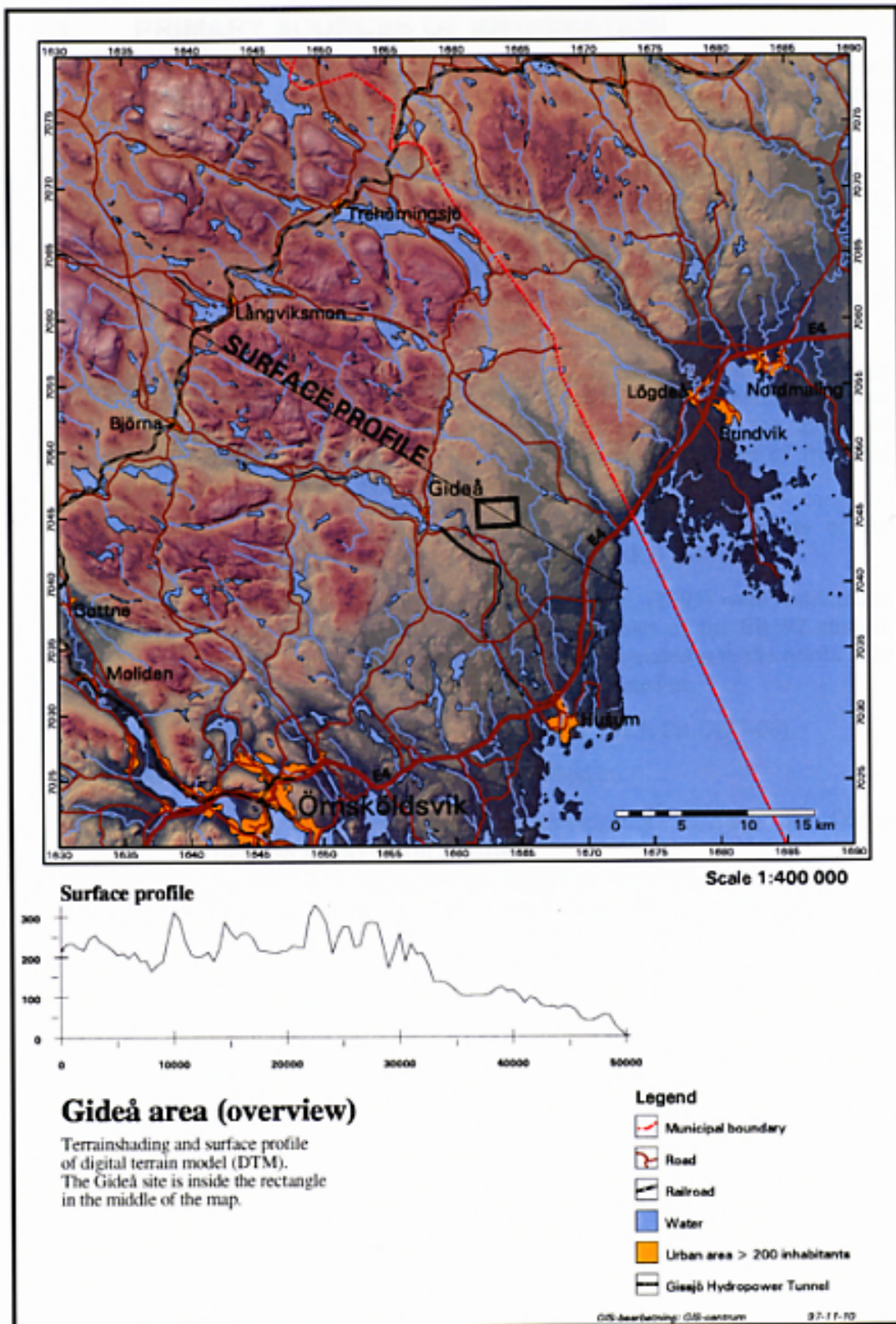


図2.1.1-18 Gideå地域およびサイト位置 (Douglas et al. , 1997)

() 地下水流出域の概要把握

SR-97 の性能評価では、まず広域地下水流動モデルを作成し、その結果を用いて局所的な地下水流動モデルを作成している。さらに、その結果をキャニスタ・緩衝材・地質環境・生物圏での核種移行計算に用いている。図 2.1.1-19 に SR-97 における地下水流動モデルおよびデータの関係を示す。局所的な地下水流動モデルを用いて算出される主要量は以下のとおりである。

- ・ 処分場深度の地下水フラックス (図中：ニアフィールドの流れ)
- ・ キャニスタ位置から G B I への移行経路および移流による移行期間 (図中：移行パラメータ)
- ・ 核種流出域 (図中：移行エンドポイント)

この方法論にもとづき、設定された各想定サイトの流出域を以下に示す。

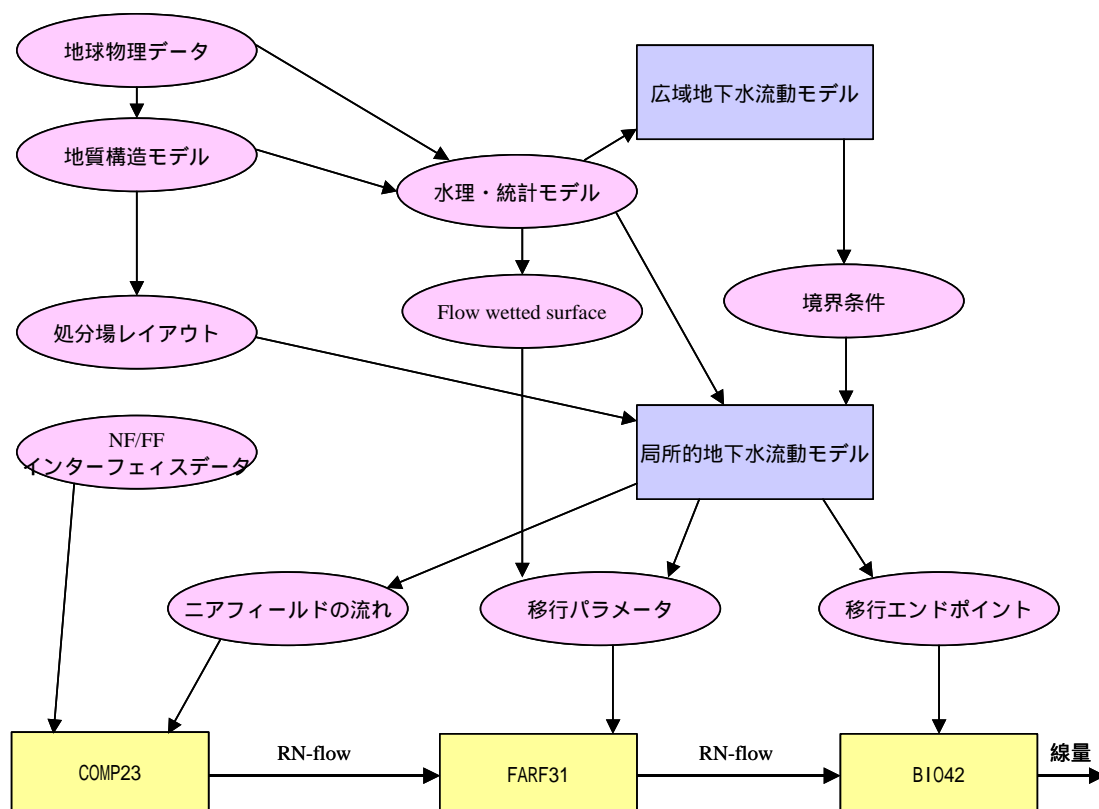


図2.1.1-19 地下水流動モデルおよびデータの関係 (SKB , 1999より)

Äspö 仮想サイト周辺領域は、前述のとおり、低地にある沿岸地形であり、標高差はおよそ 30m である。また、図 2.1.1-20 に示すように、領域内には多数の水域がある。地下水面は地形にしたがっており、地形のレベル差により地下水は、西にある高地から東にある沿岸に向かって流れており、流出域は Äspö 島周辺の入り江であると予測されている。

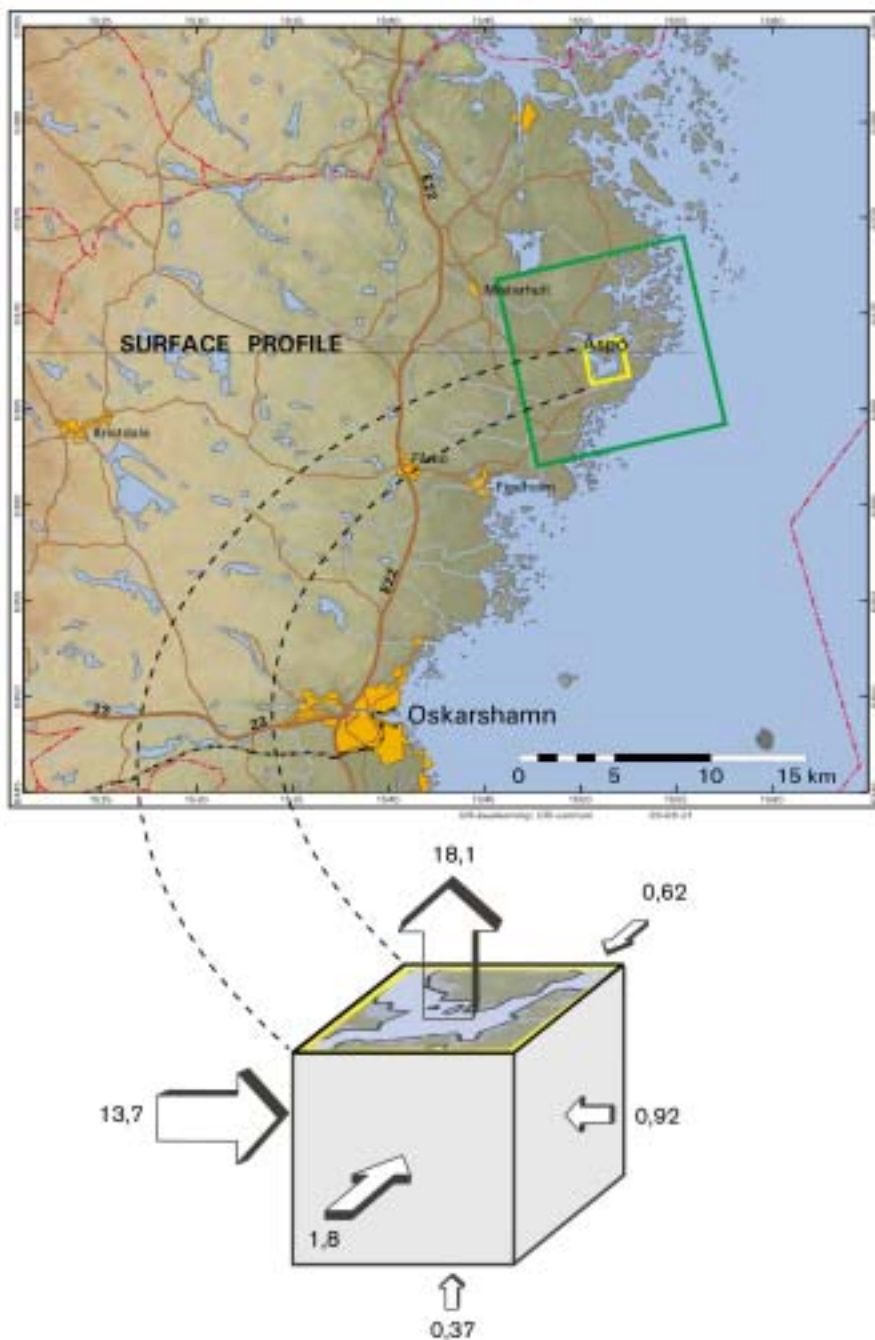


図2.1.1-20 Äspöサイトでの地下水流動パターン (SKB, 1999)

図 2.1.1-21 に Finnsjön 仮想サイト周辺の地下水流動パターンを示す。ここでは、2種類の地下水流出経路が考えられている。一つは仮想サイト東側にある鉛直方向の破碎帯に続く、比較的短い流路で、もう一つは西側にある岩盤を通過する、より長い透水域である。地下水流動パターンに大きな影響を及ぼしているのは、塩分濃度による密度変化である。

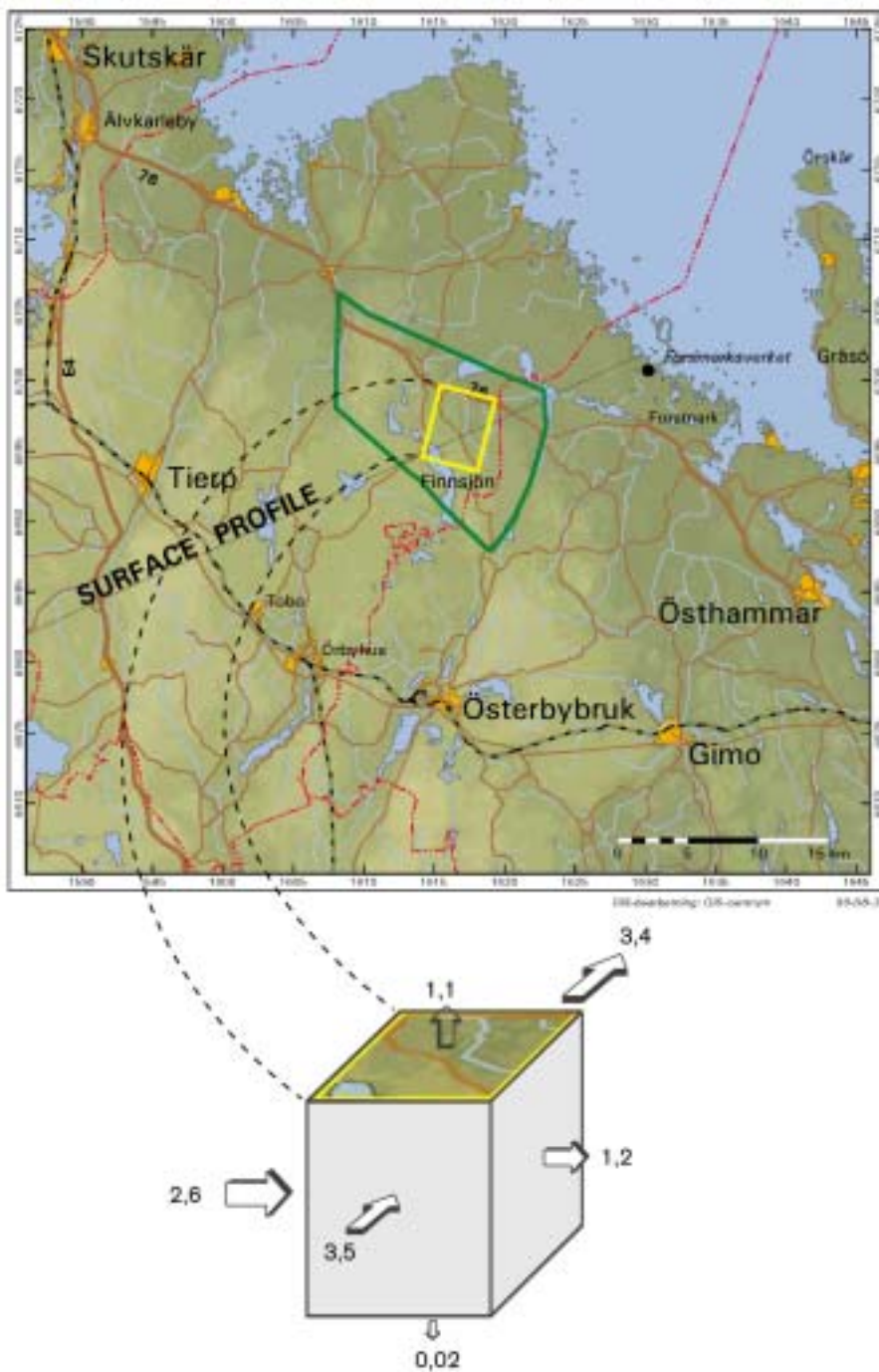


図2.1.1-21 Finnsjönサイトでの地下水流動パターン (SKB, 1999)

図 2.1.1-22 に Gideå 仮想サイト周辺の地下水流動パターンを示す。深度 500m にある下層サイトを通過する地下水は、主に地域的なさまざまな要因により東、南、西に流出する。

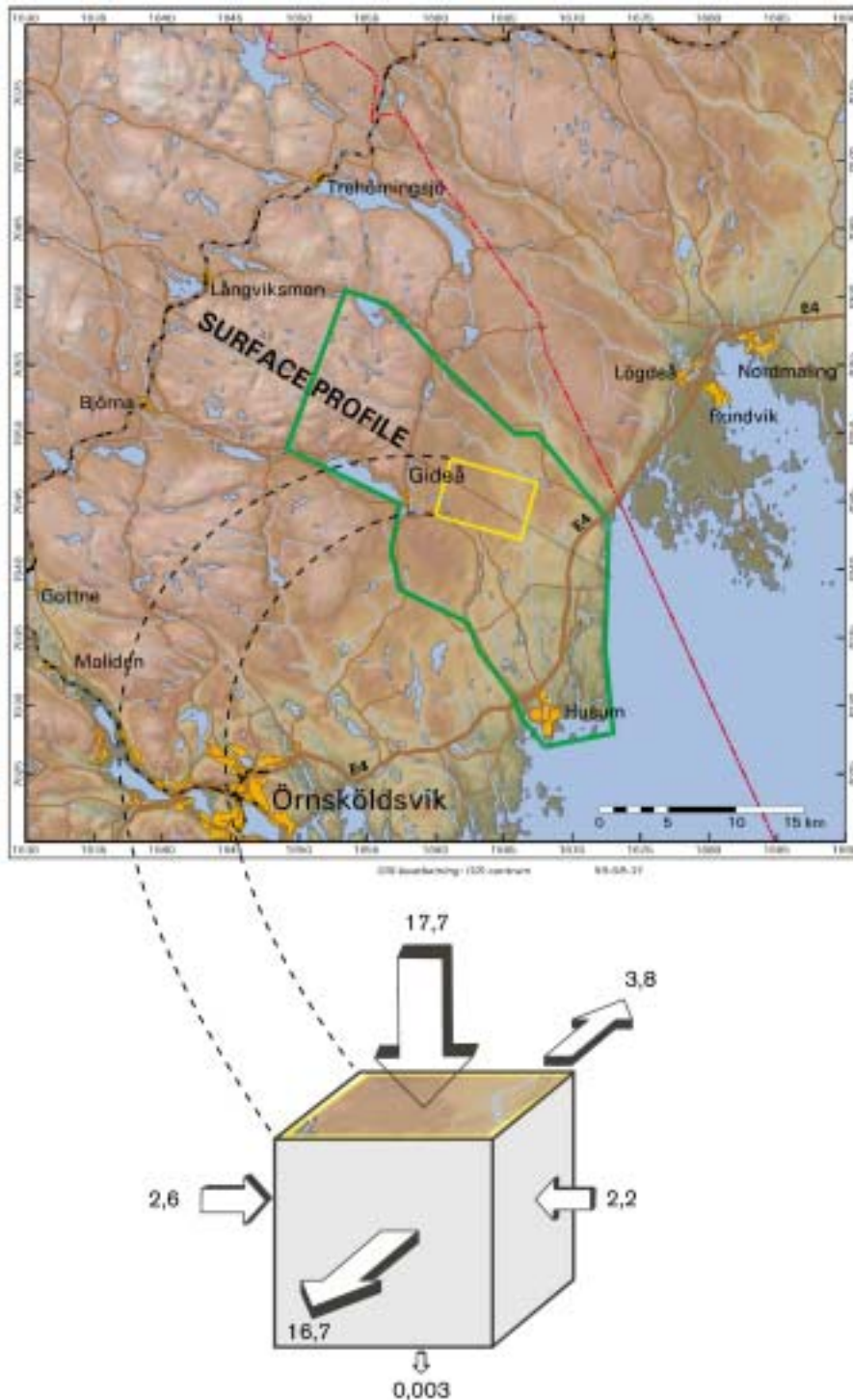


図2.1.1-22 Gideåサイトでの地下水流動パターン (SKB, 1999)

() G B I 候補の選定

SR-97 では，3ヶ所の仮想サイトに対して，地下水流動解析および生物圏モジュール（生物圏への核種の放出域）に関する詳細な調査を行うことにより，G B Iを設定している。なお，生物圏モジュールについては，すでに調査済み（三木他，2003）であり，本項では割愛した。

生物圏への核種の流出点の予測については，処分施設を仮定してパーティクルトラッキング法により評価している。図 2.1.1-23～2.1.1-25 に各仮想サイトの評価結果を示す。図中の青い直線で囲まれた部分は仮想サイトエリアであり，点がパーティクルトラッキングにより得られた流出点である。SR-97 では，井戸，湖，小川，湾，外洋，土壌，泥炭地をモジュールタイプとしている。線量計算に用いるモジュールの選択は，各サイトに対するこれら計算結果で得られた流出点にもとづいて行われている。

図 2.1.1-23 で示されているように，Äspö 仮想サイトについての流出点のうち，その 80%が内湾モジュールとなっている。このため，実際のところ現在の環境条件にもとづけば，流出域は内湾となる。しかしながら，Äspö 地域の隆起活動を考慮した場合，将来の陸化が考えられることから，保守性を考慮し，予備的検討において線量が最も高くなると予測される泥炭地モジュールが選定されている。

図 2.1.1-24 および図 2.1.1-25 より，Finnsjön および Gideå の流出点の多くは，森林モジュール内にある。ただし，森林に関する生物圏は複雑であり，SKB では今後の検討課題としているため，保守的に泥炭地モジュールとみなしている。

() G B I 設定に関するまとめ

スウェーデン SKB による SR-97 では，サイト環境の把握と地下水流動解析により，核種の流出点を設定している。具体的には，3ヶ所の仮想的な処分場サイトを，250m×250m の小領域に分割し，分割した各領域に対して，その領域での地図に関する環境情報や井戸についてのスウェーデン地質調査所の公文書を基にして，各モジュール（井戸，湖，小川，湾，外洋，土壌，泥炭地）を設定している。

そして、地下水流動解析で得られた核種の流出点を基に G B I となるモジュールを選択している。ただし、安全評価の性質上、保守性を勘案した設定が行われており、例えば、モジュールの選定については、実際の流出点とは異なるモジュールが設定されている。図 2.1.1-26 にモジュール選定の概念の概要図を示す。また、スウェーデンの表層環境、つまり、流出点と地表環境との間の核種移行についての考慮はされていない。地質環境中での地下水流動解析は、地表下約 30m までのレベルに対して行われており、この解析から求められる地質環境からの流出点が生物圏への流入点となっているわけではない。これは、前述のように表層の未固結堆積物が比較的薄く複雑でない（一部は岩盤が露頭している）ため、地表下 30m までの部分を考慮する必要はないと判断したためと思われる。また、地表面での水の流れによる核種の水平面での移行は考慮せず、生物圏への核種の流入は地質環境の流出点上において起こると仮定している。この問題に関しては、近年、SSI によっても取り上げられており、検討が開始されている（2.1.2 項参照）。G B I での核種の移行および再分配は非常に複雑なプロセスに支配されているものの、近年スウェーデンで実施されている放射性廃棄物管理プログラムにおける解析では、非常に簡単な方法で取り扱われている。核種の流出点を把握するためには、地質環境および G B I での核種の移行、第四紀堆積層での核種の移行、および地表水文特性が必要である。しかしながら、結晶質母岩から放出された核種は、母岩と母岩を覆っている第四紀堆積層との相互作用を考慮することなく直接沿岸生態系へと流れていくものと仮定している。したがって、地質環境から生物圏への核種移行経路や滞留時間が第四紀堆積層によってどのように変化するかについて、検討を始めている。現在スウェーデンにおいて進められている、地表近傍での核種挙動に関する検討は、これまで保守的に扱ってきた地質環境と生物圏との相互作用を考慮することで、より現実的な評価が可能となることから、わが国における生物圏評価での G B I 設定において、役立つものと思われる。

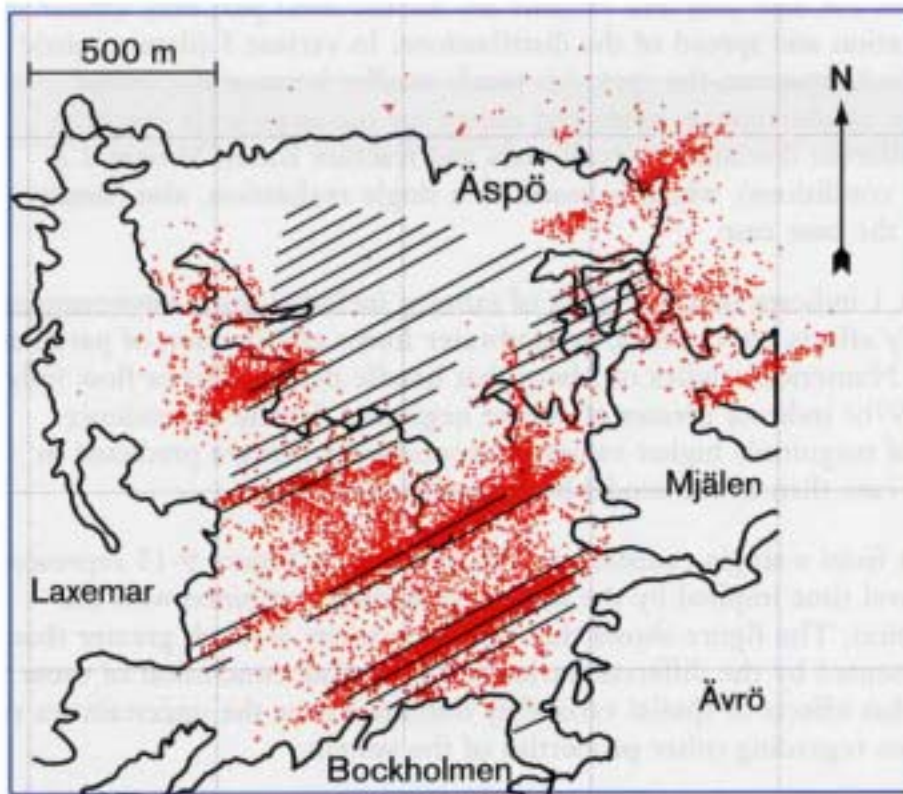


図2.1.1-23 Äspö地域のパーティクルトラッキング結果 (SKB, 1999)

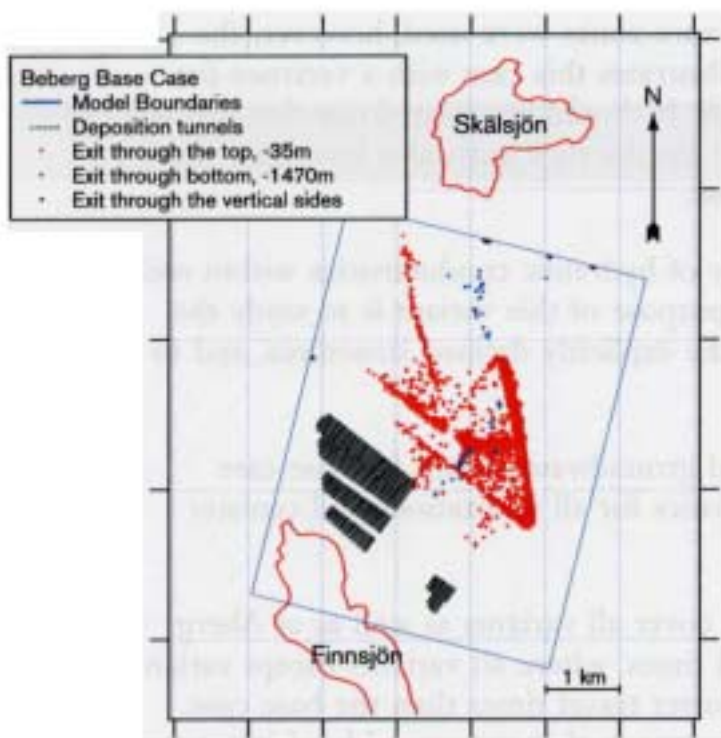


図2.1.1-24 Finnsjön地域のパーティクルトラッキング結果 (SKB, 1999)

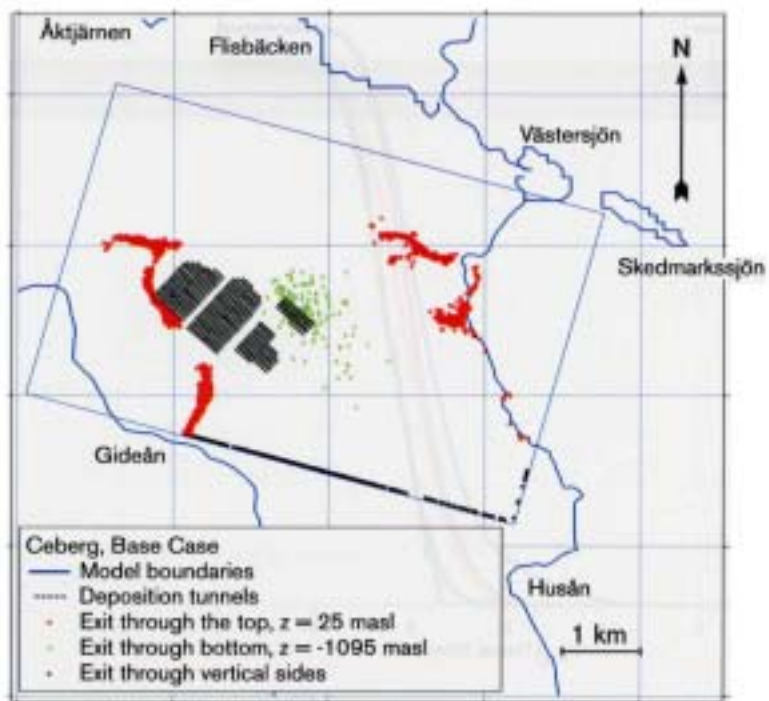


図2.1.1-25 Gideå地域のパーティクルトラッキング結果 (SKB, 1999)

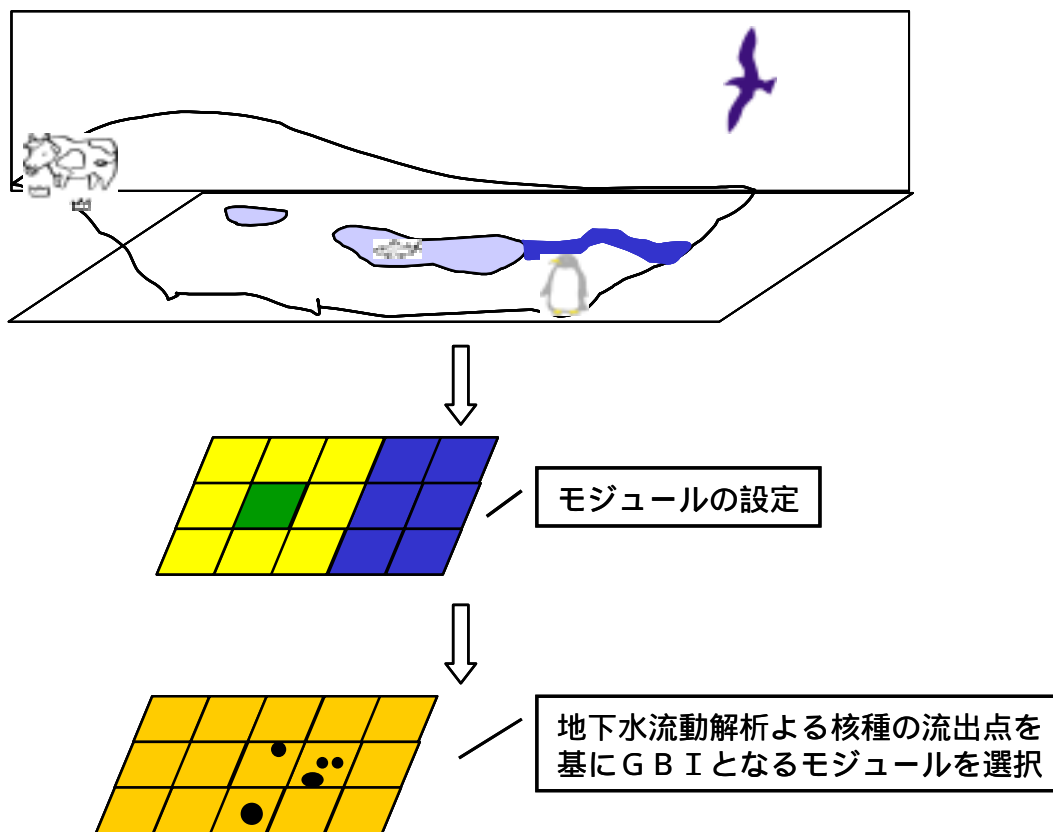


図2.1.1-26 モジュール概念の概要 (S. Nordlinder et al. , 1999)

(3) 性能評価書 (Nirex-97) (英国)

昨年度の英国の G B I 設定に関する調査では、中・低レベル放射性廃棄物処分の実施主体である原子力産業放射性廃棄物管理会社 (以下「Nirex」という。) が 1997 年に公表した「Nirex-97 : セラフィールドにおける深地層放射性廃棄物処分場の閉鎖後性能評価」 (Nirex , 1997) を参考に調査を実施した。その結果、Nirex-97 では、地下水流動解析を行いサイト周辺の地下水流動状況を調査しているものの、生物圏評価においては、一般的な核種の放出点として、井戸および土壌・地表水への排出 (Natural Discharge) を設定していることがわかった。また Nirex-97 では、地表近くでの核種の分布状況については、詳細なモデル (SHETRAN モデル) を用いて解析を実施していることが示唆された。本項では、これらの調査結果を踏まえつつ、サイト環境や地下水流動状況をまとめる。特に本年度の検討では、SHETRAN モデルの概要およびこのモデルを用いた解析例について調査を行うこととした。

() 環境条件

Nirex-97 によれば、図 2.1.1-27 に示すように、英国の処分場候補地帯 (PRZ : Potential Repository Zone) は、イングランドの北西沿岸に位置する Sellafield から数 km 内陸にある。英国 Nirex 社 (以下「Nirex」という。) が実施した、Sellafield における環境条件の把握については、放射性廃棄物の地層処分に関する地質調査として 1989 年に開始されており、その調査プログラムは、段階的なスケールダウンアプローチが採用された。

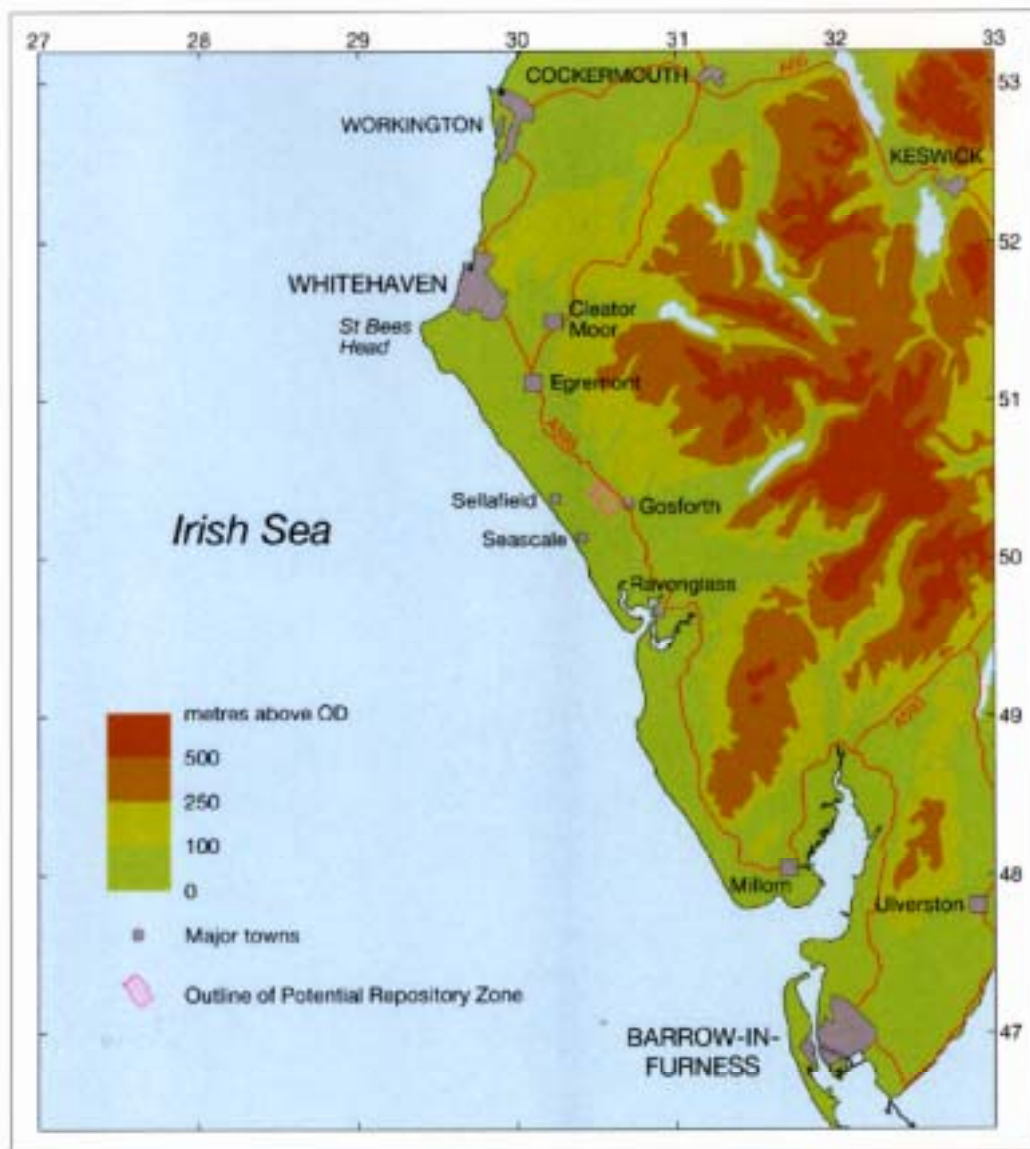


図2.1.1-27 Sellafieldエリアの位置 (Nirex , 1997)

これらの調査により，Sellafield サイトは，地質学的にみるとペルム三畳紀系堆積盆地である East Irish Sea Basin の縁に位置している。図 2.1.1-28 に Sellafield サイトの簡易地質図を示す。処分場母岩としての可能性は，図中右上の緑色部分である Borrowdale Volcanic Group (BVG) が有力である。また，図 2.1.1-29 に Sellafield サイトの簡易地質断面図を示す。図 2.1.1-29 より，BVG は，主として火山碎屑物と火成岩で構成される Ordovician 基盤岩であり，PRZ の東方数 km 地点（図 2.1.1-29 の断層 F から G の緑色部分）で露頭している。PRZ においては，BVG の最上部は地下約 500m にあり，そのすぐ上部を二畳紀系の Brockram が覆っている。

Sellafield の水文地質特性は，盆地 - 縁辺部 (basin-margin) に大きく影響を受けている。地下水の流れは，多くの場合比重が駆動力であり，地下水面レベルの差あるいは地下水の塩分や温度差から生じる流体密度の差である。Sellafield の主な地下水流動特性を図 2.1.1-30 に示す。Sellafield の地下水流動の地域特性は以下のとおりである。

- ・ 深部（西）：地下水は塩分濃度が高いため，深部で地下水の密度が高い。この密度の高い地下水と陸上の比較的密度の高くない（比較的塩分濃度の高くない）地下水との差により，ゆっくりと内陸へ流れていく（図 2.1.1-30 左側）。
- ・ 深部（東）：深部地下水は塩分を含んでいるが，沖合深部での地下水よりも塩分濃度は低く，沿岸に向けて流れる（図 2.1.1-30 右側）。
- ・ 表層部分：東部にある Lake District（図 2.1.1-29 の断層 F 付近）にある丘陵と海岸平野との地下水面レベルの差により，沿岸に向かう淡水の地下水流れが見られる。最高地下水流速は，この淡水地域で見られる。
- ・ 涵養：主に東部の丘陵付近で起こる。流出は，河川が流れる谷，沿岸近くの陸上，現在の沿岸から数 km 沖合で起こる。

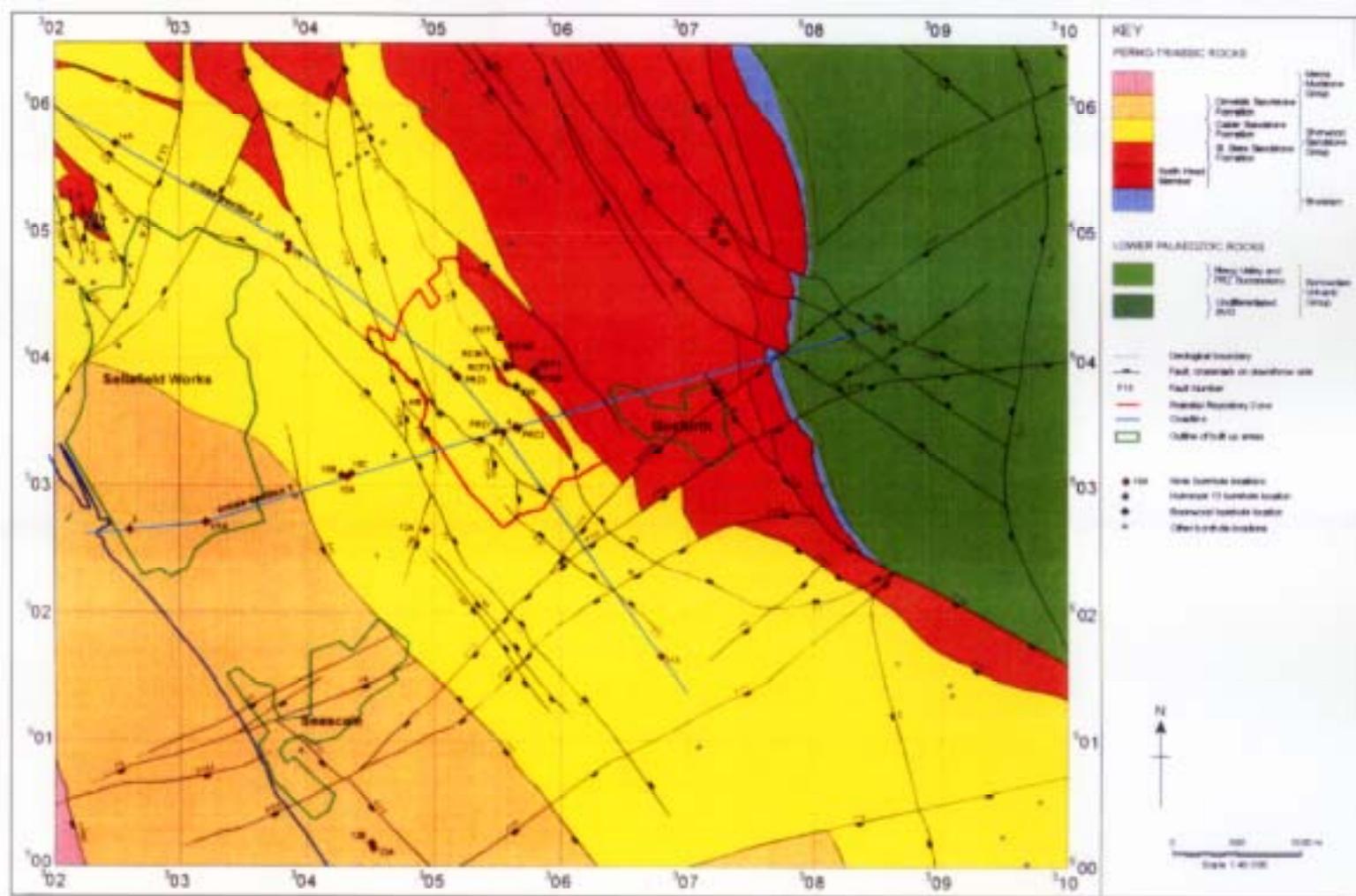


図2.1.1-28 Sellafieldサイトの簡易地質図 (Nirex, 1997)

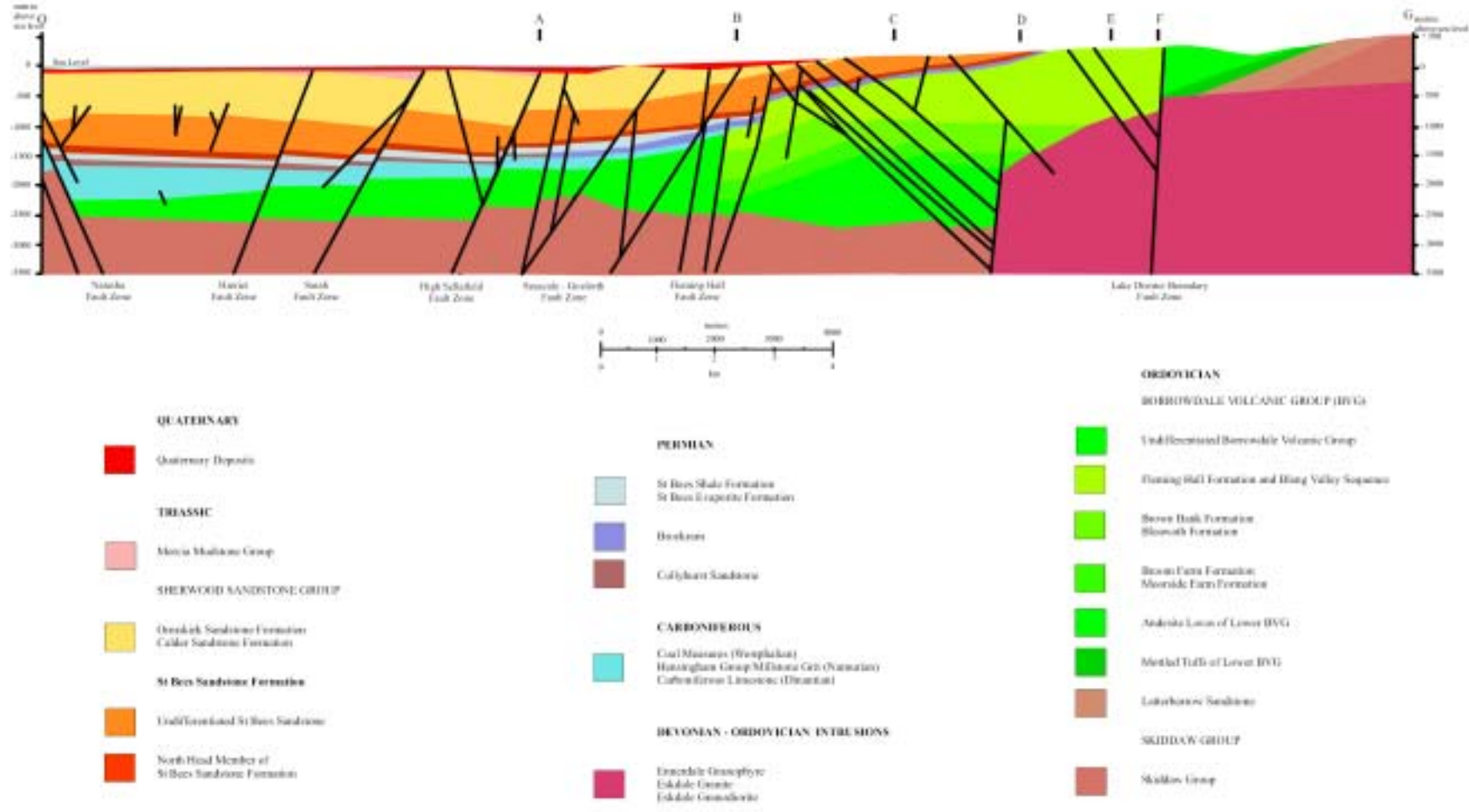


図2.1.1-29 Sellafieldサイトの簡易地質断面図 (Nirex, 1997)

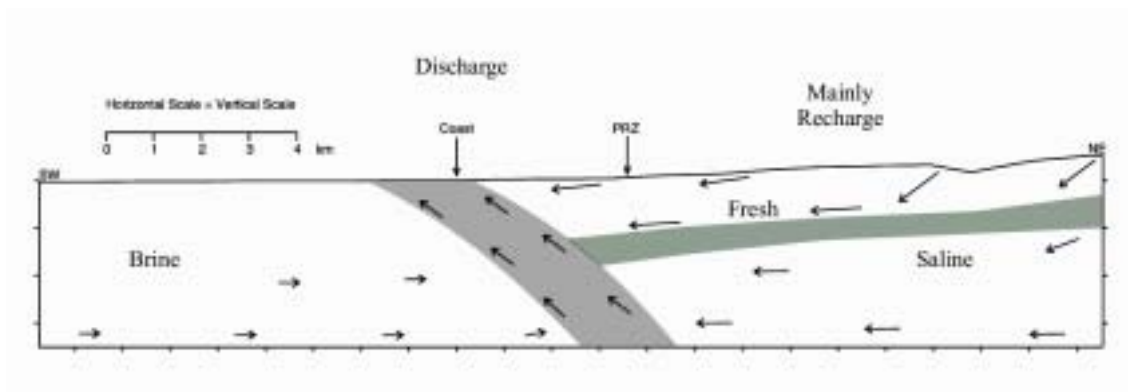
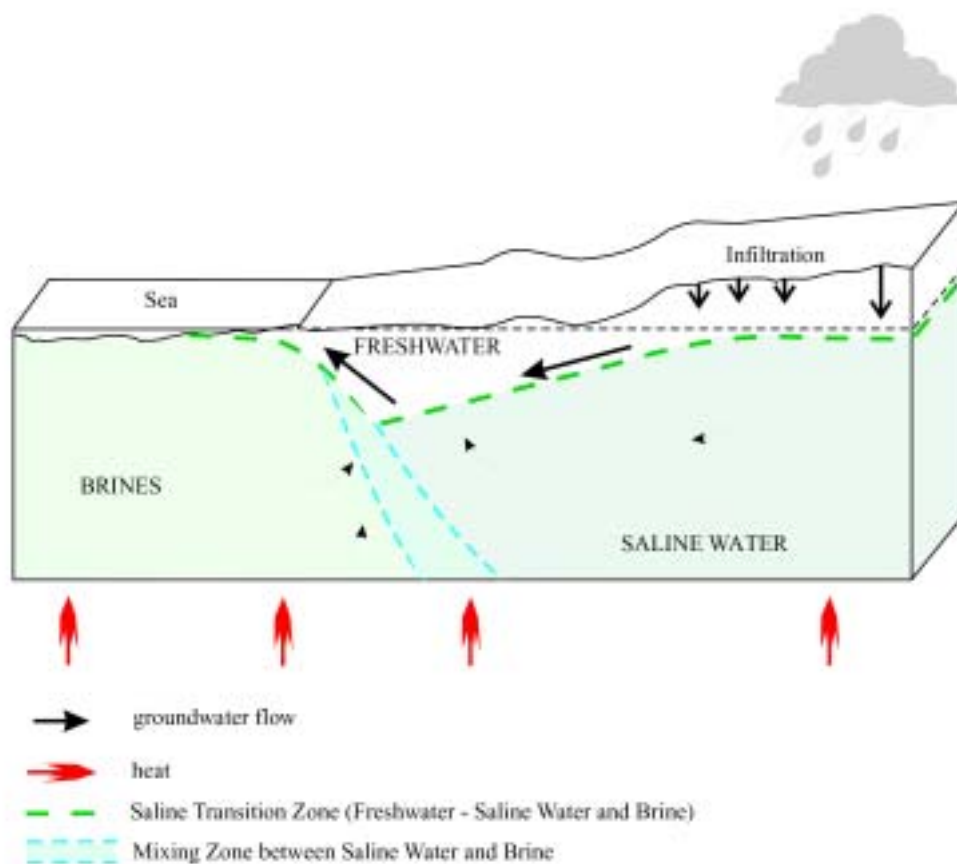


図2.1.1-30 Sellafeldにおける地下水流動系の主要特性 (Nirex, 1997)

() 地下水流出域の概要把握

Nirex では 1990 年代以降、さまざまな地質および水文地質作業が行われており、広域水文地質調査も 1996 年末までに実施されたこのような調査プログラムの一つである。この調査により、Sellafield における表層の水文地質、水理、気象に関するデータが継続的に取得されている。これらのデータは、河川への流出を把握するために必要な、地下水系への涵養あるいは基底流量 (baseflow) の特定のために重要である。これらのデータは、Nirex および外部機関によるモニタリングステーションから定期的に収集されている。モニタリングサイトネットワークには、測候所や流量計測施設などが含まれている。図 2.1.1-31 に Sellafield で実施されているモニタリングネットワークを示す。なお、図 2.1.1-31 では、地表の集水域もあわせて表記されている。また、各種機関により掘削された浅試錐孔によるモニタリングを実施されている。これら浅試錐孔位置を図 2.1.1-32 に示す。

Nirex-97 では、下記に示すさまざまなスケールでの地下水流動モデルが用いられており、これらモデルにより、処分場を通過する地下水フラックスや地下水移行時間が算出され、地下水流動場が導出されるとともに、流出域の把握を行っている。

- ・ 2次元鉛直連続多孔質媒体モデル：基本的にはリスク計算・核種移行計算で使用される
- ・ 3次元連続多孔質媒体地下水流動モデル：処分場周辺領域での地下水流動を検討するために使用される
- ・ 3次元亀裂ネットワークモデル：岩盤を通過する水の流れを扱うために使用される

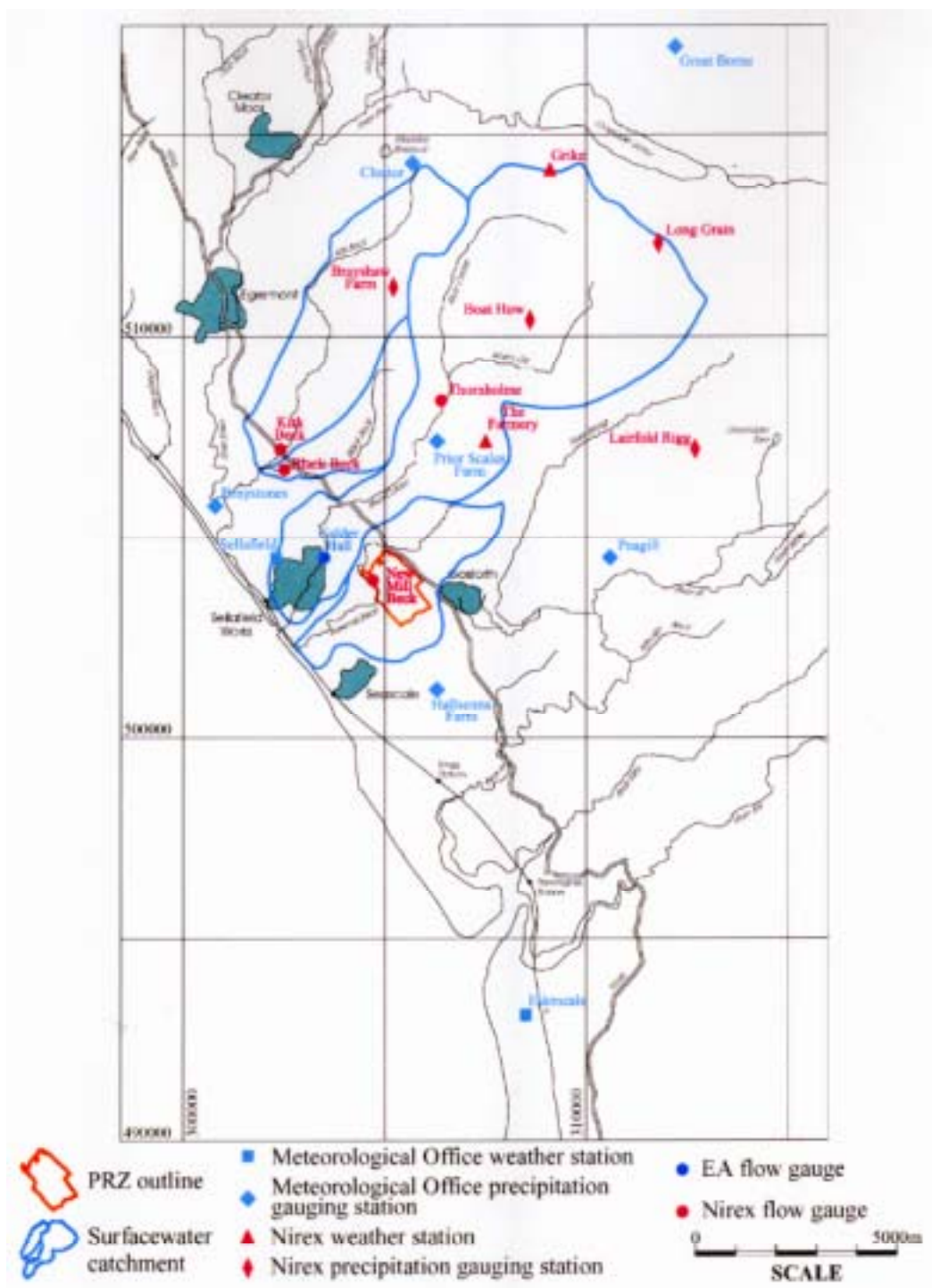


図2.1.1-31 Sellafeldにおけるモニタリングネットワークおよび表層集水域
(Nirex , 1997)

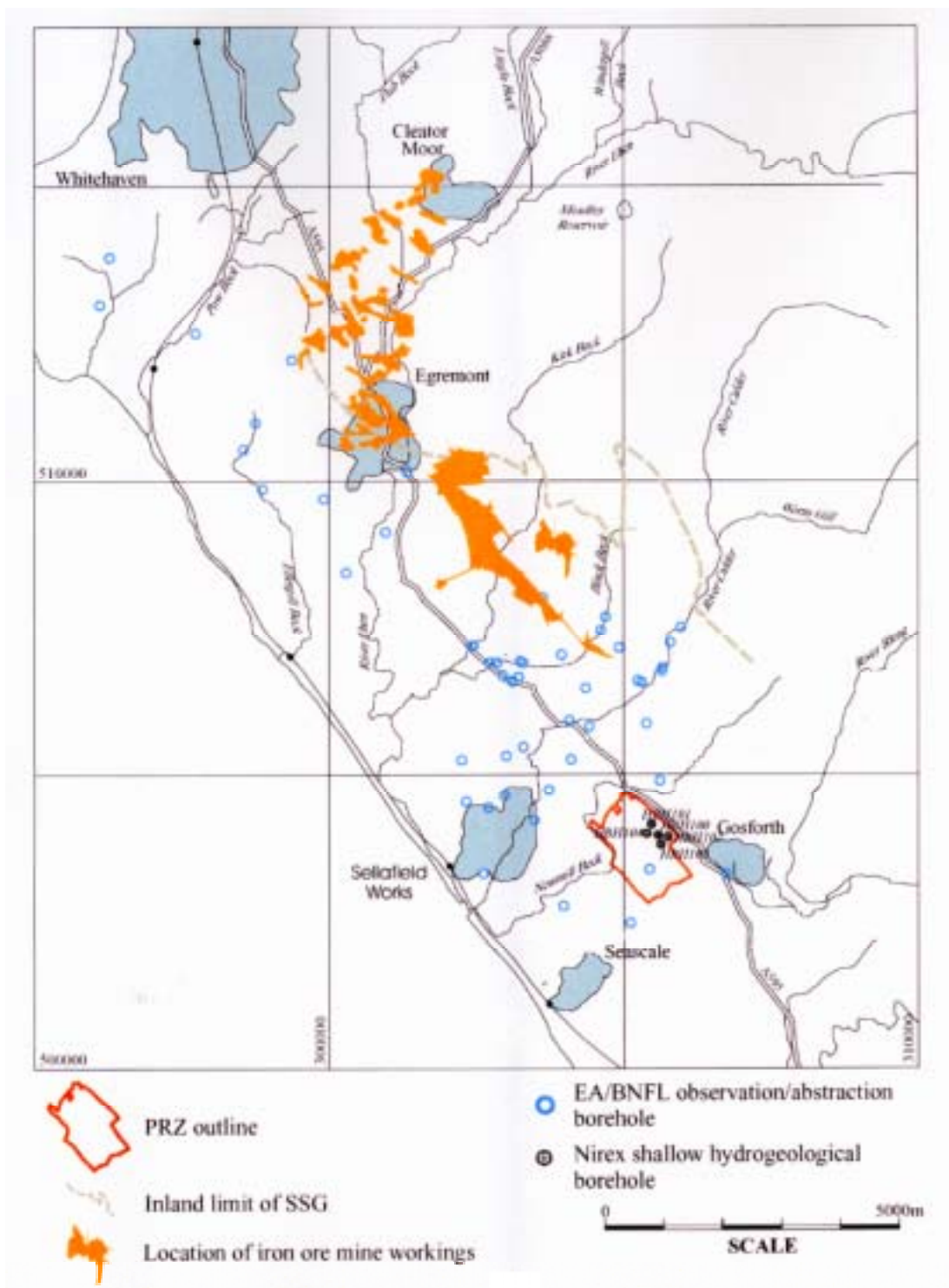


図2.1.1-32 Sellafieldにおける観測試錐孔 (<100m) 位置 (Nirex, 1997)

2次元地下水流動モデルの解析結果から、次のような結論が得られている。地下水流動系で最大の比流量を示すのは、地表近傍の砂岩中である。また、この系内での地下水の流れの特徴は、次のようにまとめられる。沖合では、海底下数100m以上の深さで、塩分濃度の非常に高い地下水が、陸上の地下水との密度差により、ゆっくりと内陸へ流れていく。いくぶんか塩分濃度の低い地下水が、同程度の深さで、東側境界からモデル領域へと侵入し、西方へ流れていく。この場合は、モデルの東側部分の高い地形と海岸平野との標高差が駆動力となっている。東方へと流れていく塩分濃度の非常に高い地下水は、陸上のあまり塩分濃度の高くない移行帯に到達し、その中で流れの方向を変え、移行帯に沿って上向きに流れていく。陸上では、地下水は Lake District にある高台から、沿岸に向かって流れていき、移行帯へと流れ込んでいく。

図 2.1.1-33 に 2次元地下水流動モデルから得られた地下水流路を示す。図 2.1.1-33 より、Sellafield サイト (PRZ) からの地下水流路については、BVG を上昇した後、卓越した流量の砂岩 (図中の黄色部分) を通過し、未固結第四紀堆積物を經由して現在の 900m 沖合に流出するとされた。

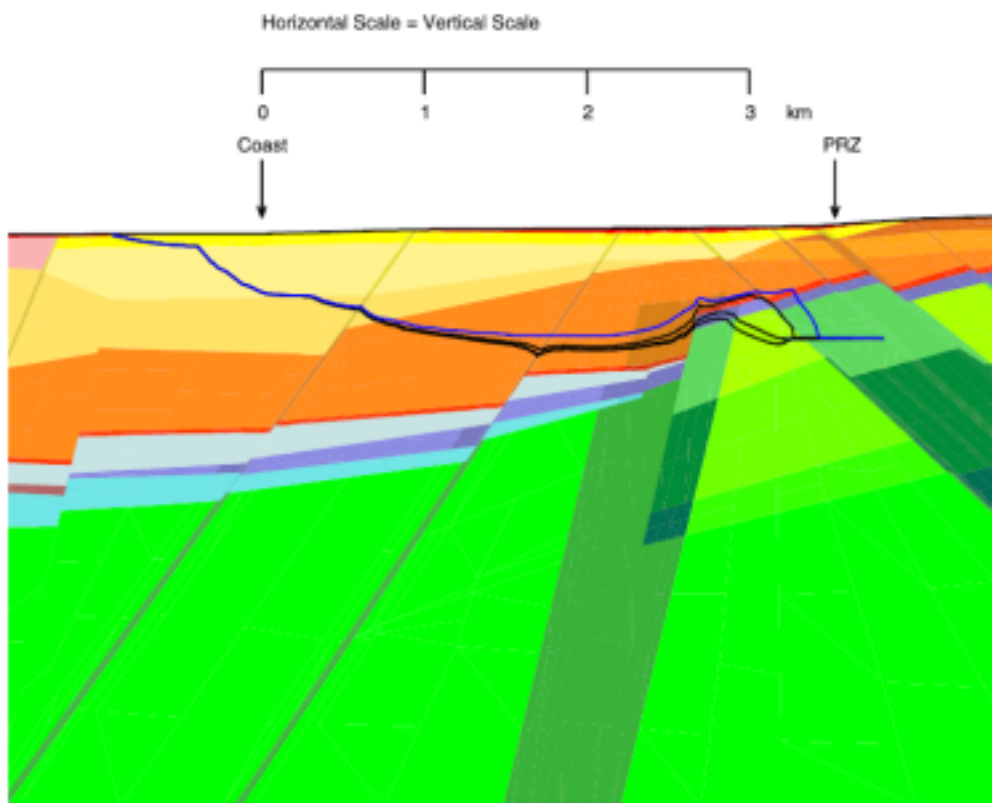


図2.1.1-33 2次元地下水流動モデルによる処分場からの地下水流路（Nirex，1997）

また、図 2.1.1-34 に、3次元地下水流動モデルにより得られた地下水流出点を示す。図 2.1.1-34 の矢印の大きさが流出の程度を示している。この結果より、地下水の流出は、River Calder、New Mill Beck、あるいは南部沿岸の平野へ生じることがわかる。

Nirex-97 では、さらに、上述の地下水流動モデルに関するキャリブレーションを行っている。具体的には、観測結果とモデルによる計算結果とがある程度適合するように、水文地質パラメータの範囲を決めている。キャリブレーションを行うために利用されたデータには、地表近傍砂岩帯水層に関する涵養・流出の分布がある。

地表近傍砂岩帯水層に関する涵養・流出の分布は、直接測定することが不可能である。このため、測定可能なデータである降水量、河川流量や湧水量から推定を行っている。地下水流動システムから河川への地下水の流出は、河川水位図の分析により決めることが可能である。Sellafield の河川流量は、少数であるが、重要な地点で測定が行われている。ただし、これらの計測では、地下水から河川への全体的な流量寄与に関しては推測できるものの、河川沿いの地下水流量の寄与については不確実性がある。また、Sellafield にある多くの湧水や小川は、地表近傍砂岩帯水層からの流出を表していない可能性がある。

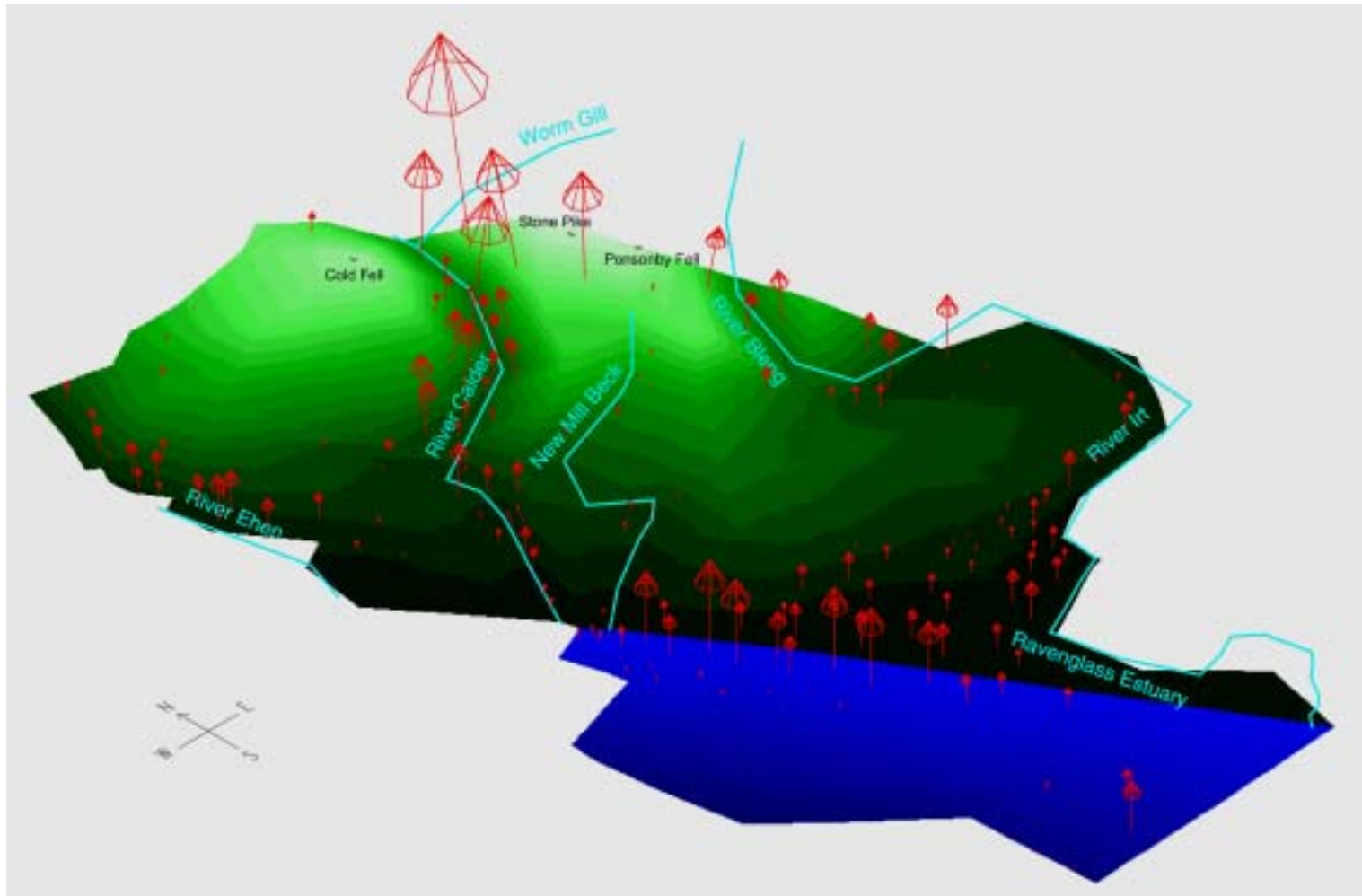


図2.1.1-34 3次元地下水流動モデルによる地下水流出点 (Nirex, 1997)

() G B I 候補の選定

Nirex-97 では、前述の地下水流動モデルによる解析結果から、Sellafield における自然流出 (natural discharge) は、陸域 (土壌、河川および小川) と海洋で起こるとされている。さらに、井戸からの揚水利用についても生物圏評価の視点からは重要であるとされている。例えば、Nirex-97 に先立つ、Nirex-95 では、農業用の井戸水利用シナリオの場合、放射線リスクが高くなるということが示されており (Nirex, 1995a)、Nirex-97 においても数万年後に予想される寒帯気候による海域の陸化を考慮に入れ、現在は沖合にある地点での井戸利用の可能性についても検討している。

なお、Nirex-97 では、自然流出における地表環境媒体が G B I である場合、地質環境と生物圏環境との間には複雑な移行プロセスがともなう。図 2.1.1-35 に Nirex-97 で想定されている表層環境中の核種移行プロセスを示す。図 2.1.1-35 に示すとおり、現実の表層環境において、汚染地下水は、表層土壌との相互作用をしながら流出する。このため、Nirex では、このような複雑なプロセスに関して、集水域モデルを利用した SHETRAN モデルを開発し、評価に取り入れている。SHETRAN モデルは、G B I でのプロセスおよび核種移行を明示的に考慮に入れたものである。(IAEA, 2003) ‘自然放出’ ケースの場合、地表近傍での水文プロセスにより影響を受ける土壌濃度の程度を評価するために SHETRAN が用いられている。現実には、汚染水は地表水排水系に向かってほぼ鉛直に移動していくため、さまざまな種類の土壌との相互作用という複雑なプロセスを経由し、地表環境へと排出されていくことになるものの (図 2.1.1-35 参照)、汚染水が地表環境へと排出する際のこのような複雑なプロセスは、SHETRAN のような空間的に分布した集水域モデルでのみ適切に取り扱うことが可能である。なお、SHETRAN に関する調査結果は 2.1.2 項に記述する。

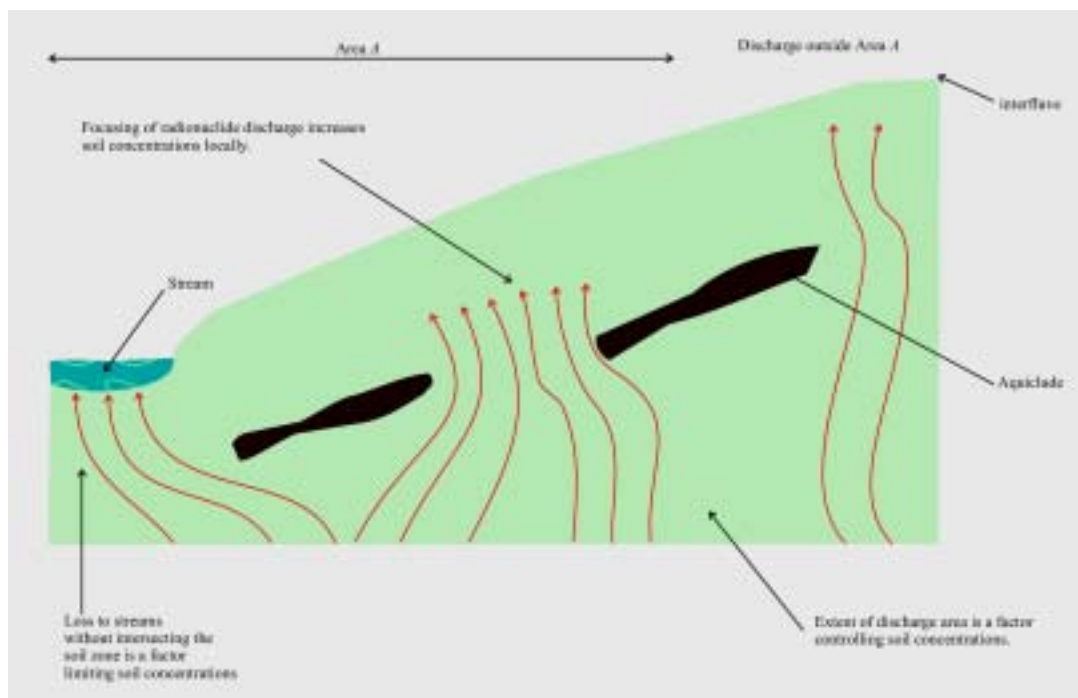


図2.1.1-35 土壌中の核種濃度に影響するプロセス (Nirex, 1997)

() G B I 設定に関するまとめ

Nirex-97 では、地下水流動モデルを用いた核種移行解析結果およびこれまでの検討から得られた知見をもとに、G B I が設定されている。核種の主要な移行メカニズムは地下水内にあるという概念の下に評価を行っている。生物圏での核種の分布および移行を決定する際には、地表近傍での水理システムが主要な因子となる。これら状況より、Nirex-97 では SHETRAN モデルにより、地表環境での水文システムの影響をより詳細に評価に取り入れようと試みられている(2.1.2項参照)。SHETRAN モデルは、地表近傍および地表環境での核種の分布を計算することが可能な地表近傍・地表システムのモデル化に用いられている。Nirex のプログラムでは、処分場から放出される核種を、地表水媒体へと直接放出される分と地上へと放出される分とに分割したコンパートメントモデルを作成しているが、このような分割を行うには複雑な物理プロセスが関与している。SHETRAN モデルは、生物圏中で重要な物理プロセスを特定し、より簡単なモデルで用いるための定量的なデータを提供する。この検討から得られる知見は、わが国における生物圏評価での G B I 設定においても、役立つものと思われる。

(4) オパリナス粘土プロジェクト報告書 (スイス)

スイスの放射性廃棄物管理共同組合 (以下「Nagra」という。) が 2003 年に公表した「オパリナス粘土プロジェクト報告書 (Nagra, 2003)」は, Zürcher Weinland のオパリナス粘土をサイト候補母岩とし, 地層処分に関するフィージビリティ検討をとりまとめている。以下に本報告書の生物圏評価について, GBI 設定の視点からその内容をまとめた。

() 環境条件

対象領域内の現在の気候は温暖で, 平均温度はおよそ 9 , 年間降水量は 800 ~ 1200 mm a⁻¹, 年間蒸発散量は 550 ~ 600 mm a⁻¹ で, いずれもかなりの季節変動がある。対象領域の主要な土壌は, 谷床は中性の“パラ褐色土 (Parabraunerde)” (parabrownearths), 谷の斜面は“褐色土 (Braunerde)” (brownearths) である。もともとの植生はその領域にはほとんど存在せず, 現在は, 過去数世紀にわたる人間による耕作の結果生じた田園風景となっている。地表近傍の水理は, 気候および第四紀堆積物中の水の流れによって決定される。その他, 発電用ダムが存在によって影響を受ける。領域内には, 流量が最大で 5,000 l min⁻¹ (2.6×10⁶ m³ a⁻¹) の, 第四紀帯水層からの汲み上げサイトが幾つかある。その他, 多くのミネラルウォーター用および温泉用の井戸がある。

スイス北部の Zürcher Weinland におけるオパリナス粘土は, およそ 1 億 8000 万年前に, 粘土, 石英および炭酸塩の粒子が浅い海洋環境に沈殿堆積して形成されたものである。Molasse 盆地 (Molasse Basin) の古生界 (Palaeozoic) 堆積物および結晶質基盤岩の上部を覆っている, 中生界 (Mesozoic) および第三紀 (Tertiary) の堆積物の厚いシーケンスの一部に相当する。図 2.1.1-36 にサイト候補母岩である Zürcher Weinland のオパリナス粘土の位置を示す。また, 図 2.1.1-37 に Zürcher Weinland の地質断面図を示す。図 2.1.1-37 より, Zürcher Weinland では, オパリナス粘土を含む堆積層は数 km にわたって均一かつ水平であり, 断層活動をほとんど受けていない。



図2.1.1-36 スイス北部およびその周辺地域 (Nagra, 2003)

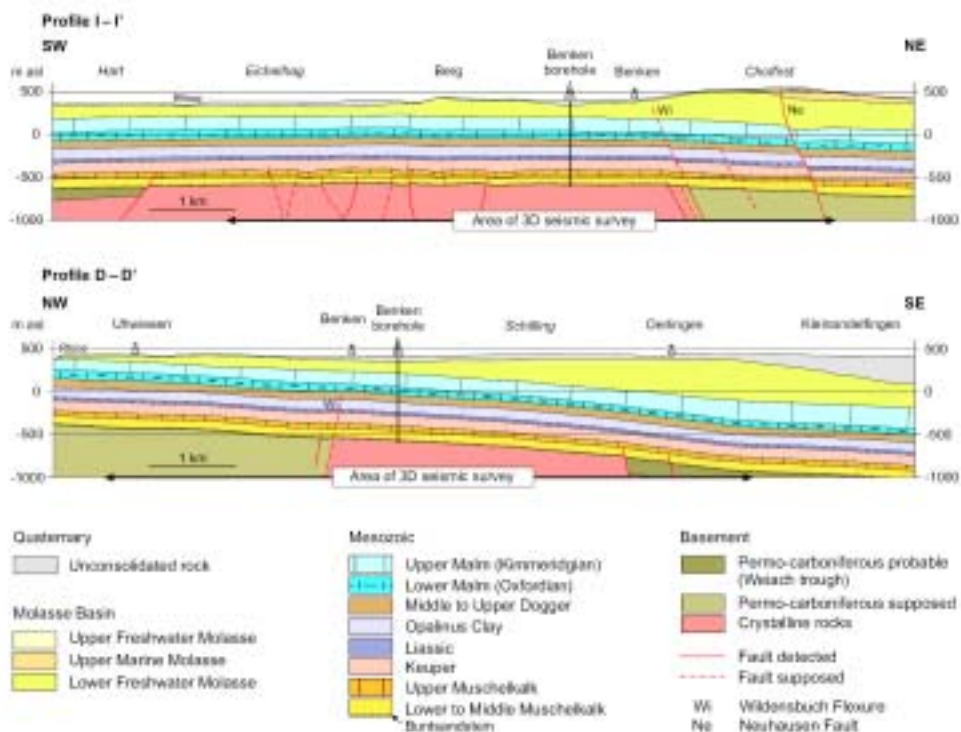


図2.1.1-37 Zürcher Weinlandの地質断面図 (Nagra, 2003)

() 地下水流出域の概要把握

Zürcher Weinland の堆積層における地下水の動きは、過去 20 年にわたる地質調査（主に Benken にある 1000m 級の試錐孔による測定と周辺で実施された 3 次元弾性波探査）により把握されている。これによれば、前図 2.1.1-37 に示すように、オパリナス粘土層およびその上下層である Dogger 層および Lias 層は透水性が低く、対象的にその上下層である Malm 層および Muschelkalk 層は透水性の高い広域帯水層である。このため、地下水の流れは、透水性の高い広域帯水層で支配的である。

これらの 2 種類の広域帯水層に関して、図 2.1.1-38 に Muschelkalk 層、図 2.1.1-39 に Malm 層についての浸透域、流出域および水頭圧分布を示す。図 2.1.1-38 より Muschelkalk 層への浸透域は Zürcher Weinland 北方のドイツ国内 Black Forest（黒い森）付近である（図 2.1.1-38 の橙部分、Black Forest は図 2.1.1-36 参照）。Muschelkalk 層での流れは南西方向であり、その流出域はライン川とアーレ川との合流付近に分布している（図 2.1.1-38 の緑部分）。

一方、図 2.1.1-39 より、Malm 層の浸透域は北東地域（図 2.1.1-39 の水色部分）であるが、評価上重要となるのは、南東の Molasse 盆地からの涵養のほうがより重要であるとされている。Malm 層中の流れは全体に北西方向であり、最終的に数 km 北方のライン滝下流にあるライン溪谷の第四紀砂礫帯水層の底部（深さ数 10m 程度）に流出する（図 2.1.1-38 の緑部分）。

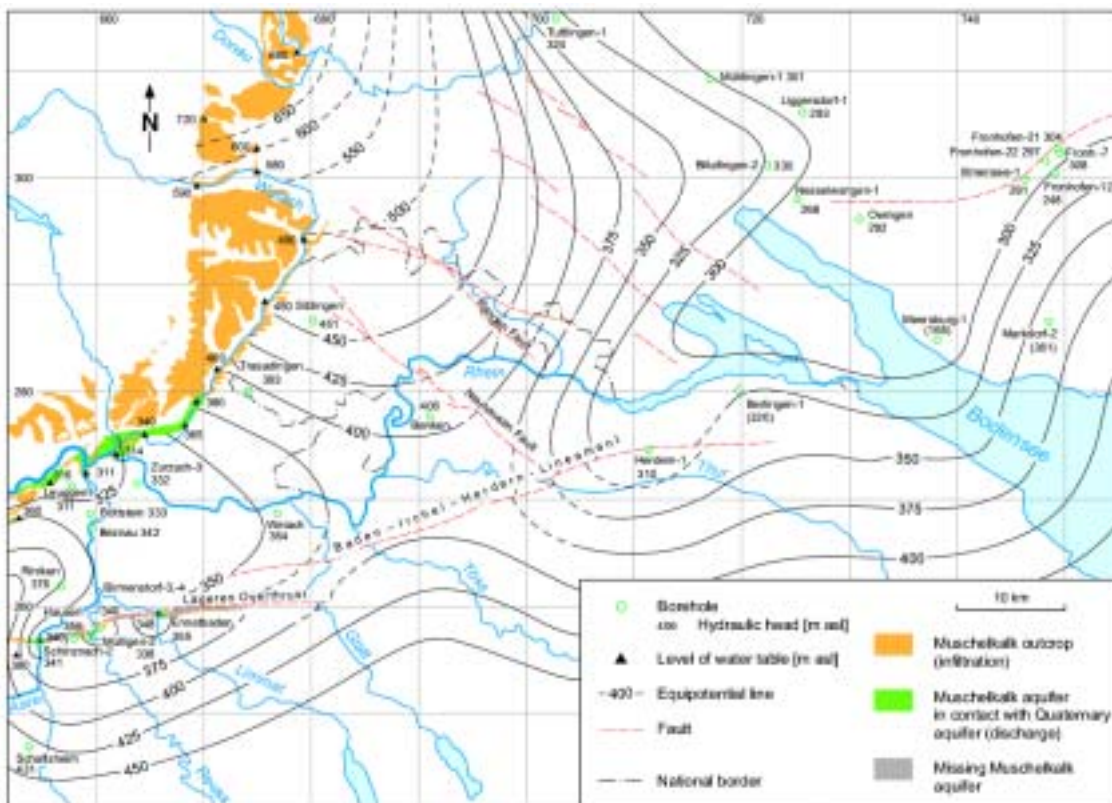


図2.1.1-38 Muschelkalk帯水層の浸透域，流出域および水頭圧分布（Nagra，2003）

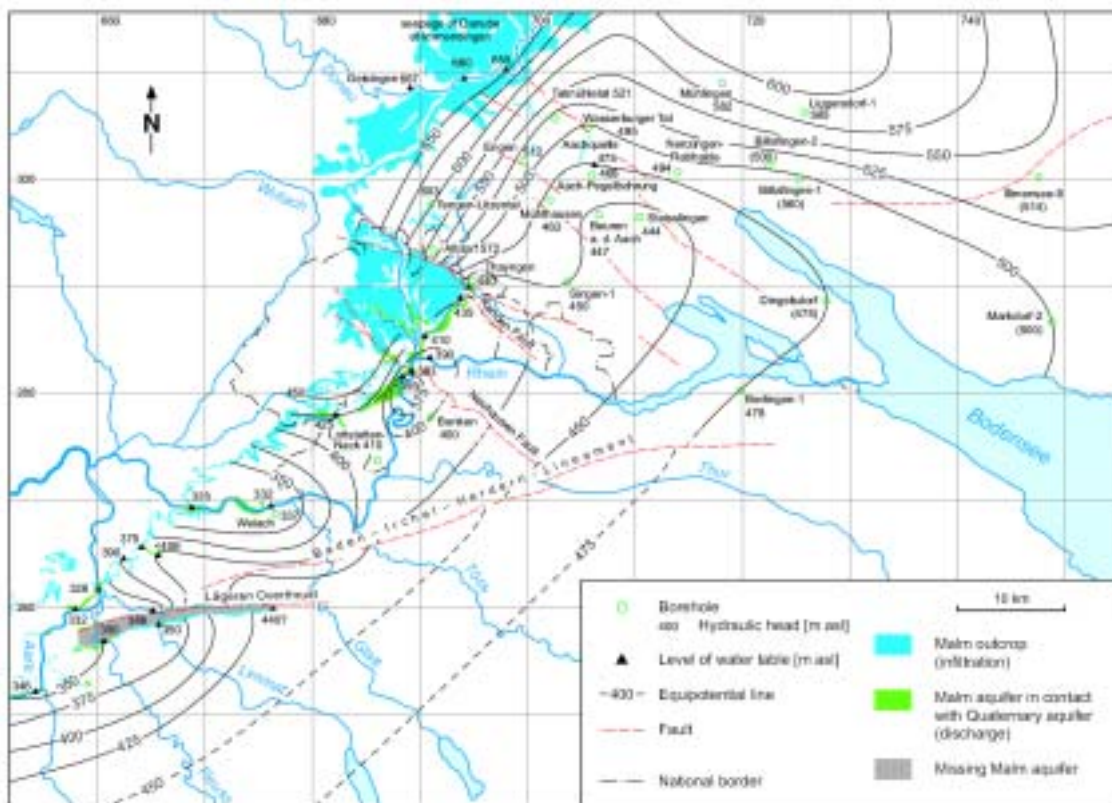


図2.1.1-39 Malm帯水層の浸透域，流出域および水頭圧（Nagra，2003）

また，その他の透水性の高い地層の可能性としては，上記の広域帯水層とオパ
リナス粘土との間のマイナーな透水性ユニット（Wedelsandstein および
Sandsteinkeuper）があるとされている。図 2.1.1-40 では，これらを含む移行メ
カニズムが示されている。

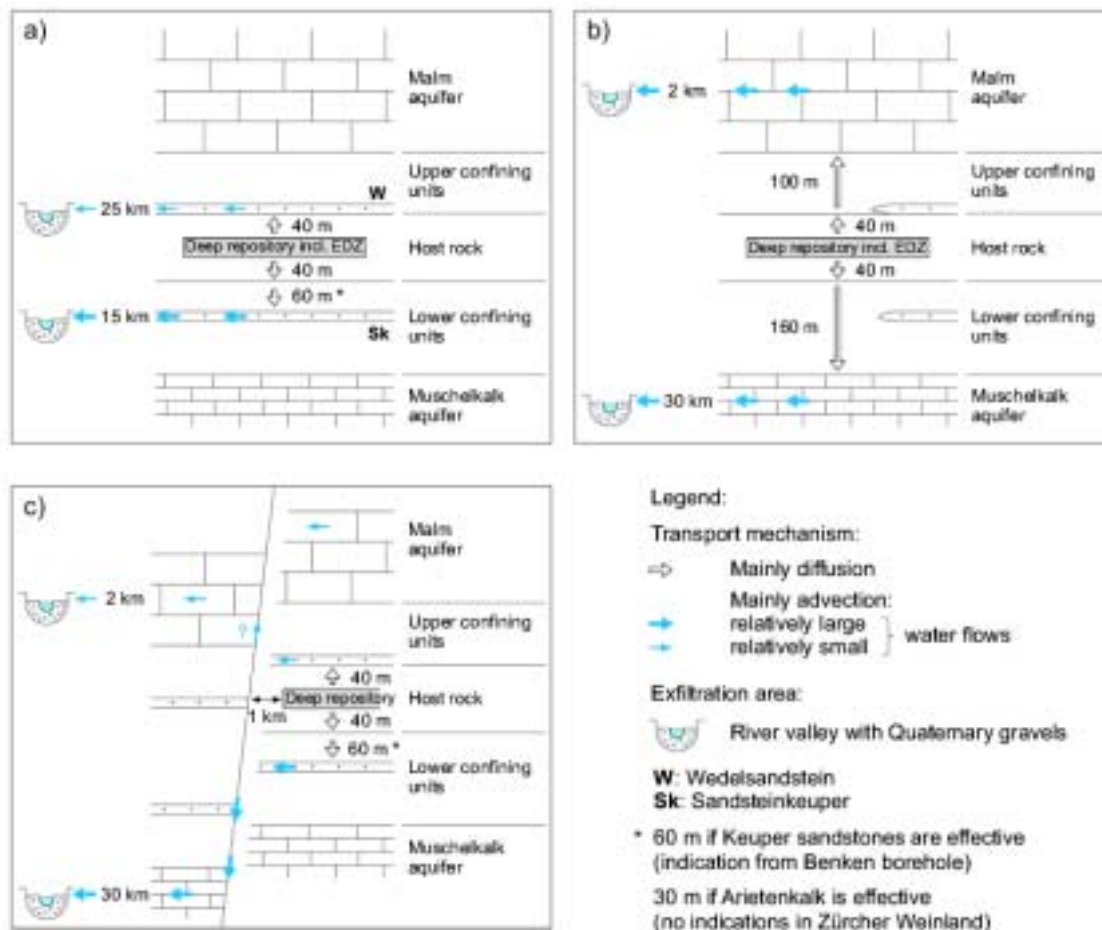


図2.1.1-40 Zürcher Weinlandにおいて想定された地下水移行経路の可能性

(Nagra, 2003)

上記より，オパリナス粘土に設置された処分場から流出した核種が，上下帯水層への移流により，現在の地表環境に到達する可能性は下記のようにまとめられる。

処分場から Malm 帯水層への拡散，および帯水層からライン滝下流のライン渓谷底部の第四紀砂礫層への移流

処分場から Muschelkalk 帯水層への拡散，および帯水層からアーレ川と

ライン川の合流地点近傍の第四紀砂礫層への移流

処分場から Wedelsandstein 層への拡散，および下流のライン渓谷底部の
第四紀砂礫層への移流

処分場から Sandsteinkeuper 層への拡散，およびライン渓谷北部の
Klettgau 帯水層への移流

流出域であるライン渓谷およびライン川に関しては次のような特性がある。

- ・ 深部地下水は，主に河川あるいは渓谷底部の第四紀砂礫層中に流出すると考えられる。これは，渓谷に不透水性の湖沼堆積物が沈降していることによる。一部の場所では，谷の斜面に位置する湧水（泉）への深部地下水の排出が観測されている。
- ・ 現在のライン渓谷の地形は，地表の標高は海拔 300～700m にあり，図 2.1.1-41 に示すとおり，第四紀に堆積した砂礫段丘があり，谷床への傾斜が比較的緩やかであるという特徴を有している。ライン川はその地域における主要な集排水機能を有しており，したがって排出域から放出された放射性核種の地表環境中における主要な輸送経路ともなる。周辺の主要河川であるアーレ川も同様の機能を有している。

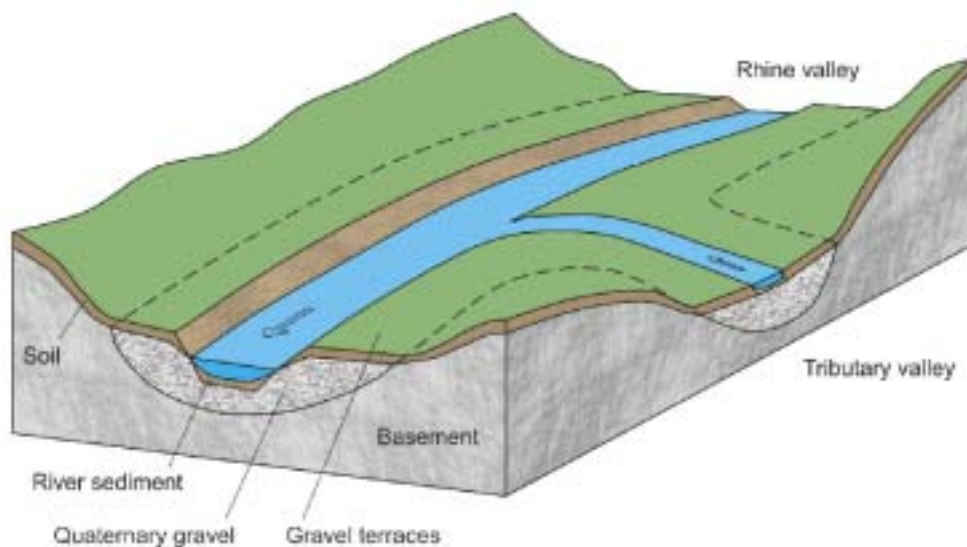


図2.1.1-41 ライン渓谷の表層環境概念図 (Nagra, 2003)

() G B I 候補の選定

オパリナス粘土プロジェクト報告書において選定された G B I は、前述の検討を踏まえ、ライン渓谷底部の第四紀砂礫堆積層である。また、保守的に堆積層からの井戸も選定されている。G B I を含む生物圏評価モデルに関する仮定は以下のとおりである。

- ・ 地表環境は 5 つの主要なコンパートメント（第四紀砂礫帯水層，深部土壌，表土，地表水および地表水堆積物）で構成される。
- ・ 地表環境内での核種輸送は，液相および固相を媒体とする。
- ・ 核種の流出が起こると予測される将来の地表環境特性は，現在のライン滝下流のライン渓谷である。なお，深部地下水は渓谷底部の第四紀砂礫帯水層に流出すると仮定される。
- ・ 対象とする将来の生物圏の自然環境は，現在の地形，気候および水理条件が用いられる。
- ・ 対象とする将来の生物圏の社会環境は，現在の食生活による自給自足を仮定する。なお，飲料水は第四紀砂礫帯水層中に掘削された井戸から汲み上げられる。

() G B I 設定に関するまとめ

オパリナス粘土プロジェクトでは、これまでに実施された地質調査や当該地域での研究結果から得られた知見を基に、対象地域の地下水の流れを把握し、それを基に G B I を設定している。この事例は、地下水流動モデルや核種移行解析を行わずに、地質調査の結果を利用して、G B I の設定を行っている例である。G B I の設定に際して行った地質調査については参考になるものと思われる。

(5) 各国の G B I 設定手法に関する整理

表 2.1.1-3 に各国の G B I 設定事例について、下記の観点から整理した。

サイト環境

流出域の把握

地表環境の把握

G B I 候補の選定

G B I 設定に関する考察

表2.1.1-3 各国のGBI設定方法の整理（米国：ユッカマウンテンプロジェクト関連文書）（1/4）

サイト環境	流出域の把握	地表環境の把握	GBI候補の選定	GBI設定に関する考察
<ul style="list-style-type: none"> Yucca Mountain は、ネバダ州南部にあり、北部にある Timber Mountain から南部にある Amargosa Desert までの約 40km におよぶ尾根から成る。尾根の標高は、海拔約 1,800m～900m で、処分サイトは 1,400～1,500m に位置する予定である。 Yucca Mountain における先カンブリア時代および古生代の岩盤は、一部を除き非透水性の堆積岩が変成岩の半帯水層である。このため、破碎帯部分での水の流れが強くなる。他方、透水性の古生代炭酸塩ユニットは、ネバダ州南部の重要な帯水層となっている。 Yucca Mountain 周辺の最も有意な地下水流出は、処分場候補地の南南東約 50km の Ash Meadow エリアの炭酸塩岩中で起こる。この流れの起源は、Yucca Mountain における凝灰岩の下に位置する帯水層である。 地表からの試錐孔による水位測定結果から、地下水水面は地表下およそ 500～800m であり、処分場はこの地下水面上に位置する。 Yucca Mountain の地下水は Death Valley 地下水流動系に含まれる。 	<ul style="list-style-type: none"> Yucca Mountain の地下水移行経路の把握は下記的手法により 1980 年代初期より実施されている。 <ul style="list-style-type: none"> 塩化物濃度による地下水移行経路の推定、試錐孔の掘削調査 地下水流動・核種移行モデル解析 パーティクルトラッキング解析 Yucca Mountain 処分場近傍での地下水流動特性把握は、広域スケールモデルとサイトスケールモデルとにより行われている。 <ul style="list-style-type: none"> 広域スケールモデルは、約 50,000km² で、Death Valley 地下水流動系と処分場を包含している。 サイトスケールモデルは、1,350km² のエリアで、処分場および法令で明文化されている 20km 地点（提案規則 10 CFR 63.115(b)(1) [64 FR 8640]）を包含している。 なお、各スケールでの地下水流動・核種移行特性を補完するために、水文データ（水位、井戸試験、涵養）、移行に関する水化学データ（特定パターン、トレーサ試験結果、酸化電位）から、広域スケールおよびサイトスケールでの水の流れについて考察している。 地下水流動特性は次のとおり。 <ul style="list-style-type: none"> 海洋への排出のない閉じた系であり、蒸発または蒸発散によってのみその領域から水は排出される。 涵養は、比較的降雪量および降雨量の多い標高の高い地域で起こる。 地下水は、第四紀・第三紀・古生代の帯水層を通過して、流出域へと流れていく。 動水勾配によって地下水流路は決まる。 モデルエリアの地下水流動は南へ向かっている。 涵養は、降水とめったに起こらない流出の浸透に限られる。降雨による浸透は高地に限定される。 自然流出（湧水、浅地下水の蒸発）は起こらない。 井戸の揚水によりかなりの流出が起こる。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動把握と共に地表環境（自然地理、気候、土壌・植生、地質環境）の把握も広域スケールモデルとサイトスケールモデルとにより行われている。 <ul style="list-style-type: none"> 【自然地理】 <ul style="list-style-type: none"> Yucca Mountain の 25% は高地、残りは山間盆地 山間盆地は、沖積層と局所的に層間火山性堆積物 【気候】 <ul style="list-style-type: none"> 地域北部は、暖かい乾燥した夏と寒い乾燥した冬である。 地域南部は、暑い乾燥した夏と暖かい乾燥した冬である。 年間降雨量は高地で多く、低地で少ない。 現在の気候は間氷期の特色を示す。 【土壌・植生】 <ul style="list-style-type: none"> 一般的な山地・丘陵地の土壌は、浅く、粗い粒子の土であり、含まれる水分はほとんどない。 降雨水が涵養となるほど十分深く浸透する前に、植生が降雨水の多くを吸い出してしまふ。 	<ul style="list-style-type: none"> 生物圏は処分場の全体的な性能評価で考慮する最後のコンポーネントであり、その上流側コンポーネントである飽和帯地下水流動・移行モデル（ミナルケースである汚染地下水利用シナリオ）と連結している。 海洋への排出のない閉じた系であり、蒸発または蒸発散によってのみその領域から水は排出される。 地下水は、第四紀・第三紀・古生代の帯水層を通過して、流出域へと流れていく。 モデルエリアの地下水流動は南へ向かっている。 涵養は、降水とめったに起こらない流出の浸透に限られる。降雨による浸透は高地に限定される。 湧水は起こらない。 井戸の揚水により、かなりの流出が起こる。 一般に、仮想的な農業集団が存在するようなレファレンス生物圏は、処分場候補地から、水文学的に下流方向に位置するものである。 生物圏への仮定上の核種放出は、将来の農業集団が給水のために地下水を揚水することで生じる。 処分場候補地に最も近いエリアであり、地下水水面の深さは、農作業により接近可能である。すべての核種は井戸からの揚水によるものとし、この集団が使用する地下水中に均一に分布しているものとする。 10 CFR Part 63（提案規則）（64 FR 8640）にもとづき、決定グループは、地下水流路に沿って処分場候補地から 20 km 南方の地点にある Amargosa Valley に位置する農業共同体に居住する（ネバダ州ラスロップウェルズ国道 95 号と州道 373 号の交差点がおおよその位置）。 	<p>【まとめ】 米国 Yucca Mountain では、地質環境特性の把握により、天然の地下水湧水域がない（地下からの蒸発散はある）。 このため、GBI の設定にあたっては、将来の農業集団が給水のために地下水を揚水することで生じるとしており、その決定グループは、処分場候補地から 20km 南方の地点にある Amargosa Valley に位置する農業共同体に居住する人間とした。 なお、この処分場候補地からの距離に関しては他の地域との相対的な居住者の数によるものである。</p> <p>【考察】 本調査による GBI 設定方法は以下のとおりであると考えられる。</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center;">サイトおよびその周辺環境の把握</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p style="text-align: center;">地下環境</p> <ul style="list-style-type: none"> 地質（年代、地層、岩種、透水性等） 水層（帯水層、地下水流動、地下水面、涵養等） </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p style="text-align: center;">地表環境</p> <ul style="list-style-type: none"> 自然地理（標高、堆積物等） 気候（乾燥状態、降水、気温等） 水収支（土壌、植生）、湧水 社会環境（人口分布、水利用） </div> </div> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">GBI 設定の判断</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p>地下水流動は南方に向かう。</p> <p>井戸揚水による流出がある。</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p>自然湧水はない。</p> <p>サイトより最も近傍でかつ人口密集地域は約 20km 南方の Amargosa Valley である。</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">GBI の選定</p> <p>生物圏への仮定上の核種放出は、将来の農業集団が給水のために地下水を揚水することで生じる。決定グループは、地下水流路に沿って処分場候補地から 20km 南方の地点にある Amargosa Valley に位置する農業共同体に居住する。</p> </div> <p>Yucca Mountain 特有の環境であり、類似の環境はほとんどないと考えられる、わが国では、同様の GBI 設定方法を適用することは困難であると思われる。ただし、環境把握の手法は参考となる。</p>

表2.1.1-3 各国のGBI設定方法の整理（スウェーデン：性能評価書（SR-97）およびその関連文書）（2/4）

サイト環境	流出域の把握	地表環境の把握	GBI候補の選定	GBI設定に関する考察
<p>・ 3ヶ所の仮想的な処分場サイト(Aberg, Beberg, Ceberg)を検討対象としている。Aberg は, Småland Äspö(南部; 沖合の島)からのサイトデータを引用している。Beberg は, Uppland Finnsjön(中央部; 沿岸から 10km)からのサイトデータを引用している。Ceberg は, Ångermanland Gideå(北部; 沿岸から 5km)からのサイトデータを引用している。</p> <p>・ Aberg の処分場深さでの地下水は, 塩水である。Beberg は, 北部にある平坦な破砕帯上部での自然流量が高い。地下水は塩水であり, 一部吸蔵塩水である。Aberg および Beberg では隆起により地下水組成が影響を受ける。Ceberg は岩盤中の透水性が低く, 地下水は塩分を含んでいない。</p> <p>・ 3 サイトとも代表的なスウェーデンの結晶質基盤岩である。</p> <p>・ Aberg サイトは, 沿岸地形であり, 多数の流域がある。Aberg サイトの地下水流出域は, 島周辺の湾である。地下水面は地形にしたがっており, 地形のレベル差により広域地下水は, 西部の高地から東部の沿岸に向かって流れていく。</p> <p>・ Beberg サイトは, 平坦な露頭部, 湿地, 小さな湖を有する低地にある。河川および湖が流域となっている。地下水は亀裂地帯と透水性地帯を通過して移行すると考えられている。地形が平坦であるので, 地下水面は比較的均一であり, 南西から北東に向かって地下水は流れていく。</p> <p>・ Ceberg サイト周辺は, Aberg および Beberg サイトよりも地形の起伏があり, 川に挟まれている。井戸の地理的位置と地下水コンター図から, 領域の中央台地での地下水系は涵養域により決まっていること, 地下水の流出は亀裂の谷間にある小川で起こることが示されている。</p>	<p>・ SR-97 では, まず広域地下水流動モデルを作成し, その結果を用いて局所的な地下水流動モデルを作成している。</p> <p>・ 局所的な地下水流動モデルを用いて算出される主要量は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 処分場深さでの地下水フラックス(ダルシー流速) ▶ キャニスタ位置からGBIへの移行経路および移流による移行時間 ▶ 地表流出点位置 <p>・ 地下水流動解析から得られたデータを用いて, 核種移行解析を行い, 核種の放出点をパーティクルトラッキングにより予測している。</p>	<p>・ Aberg は Småland Äspöからのサイトデータを, Beberg は Uppland Finnsjönからのサイトデータを, Ceberg は Ångermanland Gideåからのサイトデータを引用している。</p> <p>【自然地理】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Aberg: バルト海沿岸に位置し, 群島および外洋が景観を特徴付けている。開放水域面および島間にある湾が全領域の大部分となっている。地上植生は森林が主であり, モデル領域のほぼ 40%を占めている。 ・ Beberg: 比較的平坦な内陸地域である。全領域の多くを森林地が占めており, 次いで農耕地, 泥炭地となる。領域全体の約 10%が湖に相当する。土地が平坦なため, 湿地帯が多い。 ・ Ceberg: ポスニア湾から約 20km 内陸のスウェーデン北部の山岳地帯に位置する。地表部分の 75%が森林地である。残りは, 開放地(open land), 湖, 湿地帯である。 <p>【気候】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Aberg: 平均降水量は比較的少ない。 ・ Beberg: 平均降水量は比較的少ない。 ・ Ceberg: 平均降水量は, Aberg, Bebergよりやや多い。 <p>【土壌・植生】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Aberg: 岩盤は主に花崗岩からなり, 土壌層は薄く, 露出部が頻繁に存在している。草木は松林が支配的である。 ・ Beberg: モレーン(氷河が運搬した土砂が堆積した地形), 泥炭地, および露出岩が優勢。植生は主として森林からなり, 松の木が支配的である。 ・ Ceberg: 岩の露出部や泥炭地が存在する。支配的な植生は松林である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 井戸, 湖, 小川, 湾, 外洋, 土壌, 泥炭地をモジュールタイプとして考慮している。 ・ 地質環境中での地下水流動解析は, 地表下約 30m のレベルに対して行われており, 地質環境からの流出点と生物圏への流入点とはギャップがある。 ・ 地表面での水の流れによる核種の水平面での移行は考慮せず, 核種の流入は地質環境の流出点上にある生物圏へと起こると仮定している。 ・ 線量計算に用いるモジュールの選択は, 各サイトに対する地下水流動計算で得られた流出点にもとづいて行われている。 ▶ 流出点の 80%が内湾モジュールにあることを考えると, Aberg についての合理的な推定は, 内湾に対する平均値となる。しかしながら, 現在進行中の土地の隆起を考慮した場合, 泥炭地モジュールに対する平均値を用いることが適切である。 ▶ Beberg および Ceberg の流出点の多くは, 森林モジュール内にあるが, 保守的に森林モジュールは泥炭地モジュールとみなせるため, 泥炭地モジュールに対する平均値が合理的となる。 	<p>【まとめ】</p> <p>SR-97 では, 3ヶ所の仮想的な処分場サイトを, 250m×250m の小領域に分割し, 分割した各領域に対して, その領域での地図に関する環境情報や井戸についてのスウェーデン地質調査所の公文書を基にして, 各モジュール(井戸, 湖, 小川, 湾, 外洋, 土壌, 泥炭地)を設定している。そして, 地下水流動解析で得られた核種の流出点を基にGBIとなるモジュールを選択している。</p> <p>【考察】</p> <p>GBIでの核種の移行および再分配は非常に複雑なプロセスに支配されているものの, 近年スウェーデンで実施されている放射性廃棄物管理プログラムにおける解析では, 非常に簡単な方法で取り扱われている。核種の流出点を把握するためには, 地質環境およびGBIでの核種の移行, 第四紀堆積層での核種の移行, および地表水文特性が必要である。しかしながら, 結晶質母岩から放出された核種は, 母岩と母岩を覆っている第四紀堆積層との相互作用を考慮することなく直接沿岸生態系へと流れていくものと仮定している。したがって, 地質環境から生物圏への核種移行経路や滞留時間が第四紀堆積層によってどのように変化するかについて, 検討を始めた。SSI では, 2つの移行経路(①第四紀堆積層を通過して地表水理系へ, ②母岩を通過して水媒体域へ)における核種の移行挙動に関する解析を行っている。その結果, 核種の移行経路は, 第四紀堆積層の存在に左右される可能性があることが示唆された。</p> <p>現在スウェーデンにおいて地表近傍での核種挙動に関する検討が進められている。この検討から得られる知見は, わが国における生物圏評価でのGBI設定において, 役立つものと思われる。</p>

表2.1.1-3 各国のG B I設定方法の整理（英国：性能評価書（Nirex-97））（3/4）

サイト環境	流出域の把握	地表環境の把握	GBI候補の選定	GBI設定に関する考察
<ul style="list-style-type: none"> ・ 処分場候補地帯 (PRZ: Potential Repository Zone) は Sellafield から数 km 内陸にあり、イングランドの北西沿岸に位置する。 ・ 地質学的にみると、PRZ は主要なベルム三疊紀系堆積盆地である East Irish Sea Basin の縁に位置する。処分場の母岩となりそうなのは、Borrowdale Volcanic Group (BVG) であり、主として浅部で貫入している火山砕屑物と火成岩で構成される Ordovician 基盤岩である。 ・ BVG は処分場候補地の東数 km 地点で露頭している。処分場候補地においては、BVG の最上面は地表面下約 500m にあり、そのすぐ上を Brockram が覆っている。 ・ Sellafield エリアの水文地質特性は、盆地—縁辺部 (basin-margin) の設定に大きく影響を受ける。地下水の流れは、多くの場合比重が駆動力であり、地下水面標高の差が塩分と温度の差から生じる流体密度の差である。 ・ Sellafield エリアの主な地下水流動特性は以下のとおりである。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 深部(西): 塩分濃度が高いため、深部で地下水の密度が高い。この密度の高い地下水と陸上のあまり密度の高くない(あまり塩分濃度の高くない)地下水との差により、ゆっくりと内陸へ流れていく。 ➢ 深部(東): 深部地下水は塩分を含んでいるが、沖合深部での地下水よりも塩分濃度は低い。 ➢ 表層部分: 東部にある Lake District の丘陵と海岸平野との地下水面レベルの差により、沿岸に向かう淡水の地下水流れが見られる。最高地下水流速は、この淡水地域で見られる。 ➢ 涵養は主に東部の丘陵で起こる。流出は、河川が流れる谷、沿岸近くの陸上、現在の沿岸から数 km 沖合で起こる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Nirex Report 524 (Nirex, 1993) 発行以来、さまざまな地質および水文地質に関する検討が行われている。Sellafield 地方についての、地表近傍の水文地質、水理、気象に関するデータは、継続的に入手されており、これらデータは地表近傍の地下水流動系の理解を深め、地下水流動モデルの校正に役立つものである。 ・ データは、Nirex が稼働しているモニタリングステーションと外部機関により管理されているモニタリングステーションとの両方から、定期的に収集されている。モニタリングサイトネットワークには、測候所や流量計測施設などが含まれている。また、各種機関により掘削された浅試錐孔もモニターされている。 ・ Nirex-97 では、異なるスケールでの地下水流動モデルを用いて、処分場を通過する地下水フラックスや地下水移行時間を算出し、地下水流動場を導出するとともに、流出域を把握することが可能となる。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 2次元鉛直連続多孔質媒体モデル 基本的にリスク計算・核種移行計算で使用 ➢ 3次元連続多孔質媒体地下水流動モデル 処分場周辺領域での地下水流動を検査するために使用 ➢ 3次元亀裂ネットワークモデル 岩盤を通過する水の流れを扱うために使用 ・ 2次元地下水流動モデルの解析結果から、以下のような結論が得られている。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 地下水流動系で最大の比流量を示すのは、地表近傍の砂岩中にあることがわかる。 ➢ 沖合では、海底下数 100m 以上の深さで、塩分濃度の非常に高い地下水が、陸上の地下水との密度差により、ゆっくりと内陸へ流れていく。いくぶんか塩分濃度の低い地下水が、同程度の深さで、東側境界からモデル領域へと侵入し、西方へ流れていく。この場合は、モデルの東側部分の高い地形と海岸平野との標高差が駆動力となっている。 ➢ 東方へと流れていく塩分濃度の非常に高い地下水は、陸上のあまり塩分濃度の高くない移行帯に到達し、その中で流れの方向を変え、移行帯に沿って上向きに流れていく。 ➢ 陸上では、地下水は Lake District にある高台から、沿岸に向かって流れていき、移行帯へと流れ込んでいく。 ・ 3次元地下水流動モデルの解析結果から、River Calder, New Mill Beck への流出、およびモデル南部にある海岸平野への流出が明らかになった。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地表近傍砂岩帯水層に関する涵養・流出の分布は、直接測定することが不可能であるので、涵養は降水量から、地下水から河川への流出は、河川水位図の分析から推定可能である。 ・ Sellafield の河川流量は、少数の重要位置での測定が行われており、地下水からの河川流量への全体的な寄与に関しては推測できるものの、河川沿いの地下水流量の寄与については不確実性がある。 ・ Sellafield にある多数の湧水や小川は地表近傍砂岩帯水層からの流出を表していない可能性があることに注意が必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2次元核種移行解析の結果およびこれまで得られた知見から、Nirex-97 では、生物圏での放射線影響は、処分場からの核種が土壌や地表水媒体(河川、湖沼など)である陸上環境および海洋環境へと自然放出 (natural discharge) する結果として、そして処分場から発生する核種によって汚染された井戸水揚水の結果として生じる可能性があるとして、検討を行っている。 ・ 地表環境にある土壌、小川、および河川への核種放出の際には、地表環境と生物圏環境との間に複雑な移行プロセスがともなわれる。Nirex-97 では、この部分に関してより詳細な解析を行っており、SHETRAN モデルを開発し、取り入れている。 ・ SHETRAN モデルは、GBIでのプロセスおよび核種移行を明示的に考慮に入れたものである (IAEA, 2003)。自然放出ケースの場合、地表近傍での水文プロセスにより影響を受ける土壌濃度の程度を評価するために SHETRAN が用いられている。 	<p>【まとめ】</p> <p>Nirex-97 では、GBIとして、核種移行解析結果および過去の知見を参考に、陸域および海洋環境への自然放出と井戸を検査している。評価の際には、地表環境と生物圏環境との間にある移行プロセスを考慮している。</p> <p>【考察】</p> <p>本調査から、地下水流動モデルによる核種移行解析結果およびこれまでの検討から得られた知見をもとに、GBIが設定されているということがわかった。</p> <p>英国 Nirex-97 の検討で特徴的なのは、SHETRAN モデルにより、地表環境での水文システムの影響をより詳細に評価に取り入れようとしていることである。SHETRAN は、地表近傍および地表環境での核種の分布を計算することが可能な地表近傍・地表システムのモデル化に用いられるものである。Nirex のプログラムでは、処分場から放出される核種を、地表水媒体へと直接放出される分と地上へと放出される分とに分割したコンパートメントモデルを作成しているが、このような分割を行うには複雑な物理プロセスが関与している。SHETRAN は、生物圏中で重要な物理プロセスを特定し、より簡単なモデルで用いるための定量的なデータを提供するものである。</p>

表2.1.1-3 各国のGBI設定方法の整理（スイス：オパリナス粘土プロジェクト報告書）（4/4）

サイト環境	流出域の把握	地表環境の把握	GBI候補の選定	GBI設定に関する考察
<ul style="list-style-type: none"> ・ スイスにおける現在のプロジェクトでは、長寿命廃棄物の処分場のための母岩として、Zürcher Weinland のオパリナス粘土の評価を行っている。 ・ オパリナス粘土は、およそ 1 億 8000 万年前に、粘土、石英および炭酸塩の粒子が浅い海洋環境に沈殿堆積して形成されたものである。Molasse 盆地 (Molasse Basin) の古生界 (Palaeozoic) 堆積物および結晶質基盤岩の上部を覆っている、中生界 (Mesozoic) および第三紀 (Tertiary) の堆積物の厚いシーケンスの一部に相当する。 ・ Zürcher Weinland の堆積岩シーケンスにおける深部地下水の動きは、有意な地下水流れのない、透水係数の低いオパリナス粘土および上下の封じ込めユニットによって水理的に分離された、Malm および Muschelkalk という2つの広域帯水層によって支配されている。 ・ Malm 帯水層においては、対象領域の流れは全体に北西に向かい、数 km 北方のライン滝下流のライン渓谷に排出している。 ・ Muschelkalk 帯水層の流れは全体的に南に向かい、西に向きを変えて、西方に 20 ~30km の、ライン川-Aare 川の合流地点に近い地域にある排出域に最短経路で向かっている。 ・ 処分場周辺の地質特性から、地下水が湧水に直接放出されることも考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ オパリナス粘土に設置された処分場から流出した核種が、上下帯水層への移流により、現在の地表環境に到達する可能性は下記のようにまとめられる。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 処分場から Malm 帯水層への拡散、および帯水層からライン滝下流のライン渓谷底部の第四紀砂礫層への移流 ➢ 処分場から Muschelkalk 帯水層への拡散、および帯水層からアーレ川とライン川の合流地点近傍の第四紀砂礫層への移流 ➢ 処分場から Wedelsandstein 層への拡散、および下流のライン渓谷底部の第四紀砂礫層への移流 ➢ 処分場から Sandsteinkeuper 層への拡散、およびライン渓谷北部の Klettgau 帯水層への移流 ・ いくつかの場所では、谷の斜面に位置する湧水(泉)への深部地下水の排出が観測されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 【自然地理】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 対象領域の地表の標高は海拔 300 ~700m であり、ライン渓谷の今日の地形は、第四紀に堆積した砂礫段丘があり、谷床への傾斜が比較的緩やかであるという特徴を有している。 ・ ライン川はその地域における主要な集排水設備としての機能を有しており、したがって排出域から放出された放射性核種の地表環境中における主要な輸送経路ともなる。 ・ 領域内のその他の主要河川 (Aare 川) も類似の特徴を有している。対象領域内にはさまざまな支流がある。 【気候】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 対象領域内の現在の気候は温暖 ・ 年平均温度はおよそ 9°C、年間降水量は 800 ~1200mm a⁻¹、年間蒸発散量は 550 ~600mm a⁻¹ で、いずれもかなりの季節変動がある。 【土壌・植生】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 対象領域の主要な土壌は、谷床は中性の“パラ褐色土 (Parabraunerde)” (parabrownearths)、谷の斜面は“褐色土 (Braunerde)” (brownearths) である。 ・ もとものと植生はその領域にはほとんど存在せず、現在は、過去数世紀にわたる人間による耕作の結果生じた田園風景となっている。 ・ 地表近傍の水利は、気候および第四紀堆積物中の水の流けによって決定される。その他、発電用ダムが存在によって影響を受ける。 ・ 領域内には、流量が最大で 5,0000 min⁻¹ (2.6 × 10⁶ m³ a⁻¹) の、第四紀帯水層からの汲み上げサイトがいくつかある。その他、多くのミネラルウォーター用および温泉用の井戸がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 放射性核種の流出が起こると予測される将来の地表環境特性は、今日のライン滝 (Rhine Falls) 下流のライン渓谷である。なお、深部地下水は渓谷底部の第四紀帯水層中に流出すると仮定される。 ・ 安全評価においては、下記の仮定を設けている。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 対象とする将来の生物圏の自然環境は、現在の地形、気候および水利条件が用いられる。 ➢ 対象とする将来の生物圏の社会環境は、現在の食生活による自給自足を仮定する。なお、飲料水は第四紀砂礫帯水層中に掘削された井戸から汲み上げられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 【まとめ】 <ul style="list-style-type: none"> ・ スイスでは、最近 10 年間の地域を絞った研究をはじめとする過去 20 年にわたる北スイスでの広域の地質調査により、Zürcher Weinland の地質・水利構造および特性に関する明確な情報が得られている。この情報は主として、Benken の深さ 1000m の試錐孔における集中的な作業および周辺地域の 3D 地震波探査から得られたものである。地震波探査により、オパリナス粘土の卓越した均質性と横方向の (lateral) 広がりが確認されている。さらに、地質、水利、地球化学および同位体に関する広域規模のデータが総合化され、かつ新たな狭域流体力学モデルが開発されている。包括的かつ詳細な地質情報は“総合地質情報 (geosynthesis)” 報告書 (Nagra, 2002) に示されている。 ・ その他に、北部-中央スイスにおける Nagra の深試錐孔から、またスイスのその他の地域における地下掘削部 (例えば、道路および鉄道用のトンネル) に交差しているオパリナス粘土に関する研究から、多くの情報が得られている。これら情報から、対象地域の地下水の流れを把握しており、それをもとに GBI を設定している。 【考察】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水流動モデルや核種移行解析を行わずに、地質調査の結果を利用して、GBI の設定を行っている一例である。GBI の設定に際して行った地質調査については参考になるものと思われる。

2.1.2 各国の表層水理に関する取り扱い

前項にて示したとおり、近年、諸外国では、これまでの保守的な設定がなされていた地質環境と生物圏との間の表層水理に関して、より具体的な知見を評価に取り入れることが試みられている。このため、本項では以下の関連資料の調査を行った。

SSI レポート（スウェーデン）

SHETRAN（英国）

（1）SSIレポート（スウェーデン）

前2.1.1項で示したとおり、SKBによる現在のスウェーデンにおける安全評価解析では、地質環境と生物圏との相互作用を保守的に簡略化した方法で扱っている（例えば、Bergström, et al., 1999）。すなわち、処分場から流出し、母岩中を移行した核種は、母岩を覆う表層の第四紀堆積層との相互作用を考慮せず、直接沿岸の生態系へと通ずる流路を移行すると仮定している。このような評価に関して、近年SSIでは、GBIを含む第四紀堆積層についての研究を行い、地表生態系へのさまざまな流路が明らかとなっている。本項では、SSIが2003年に公表した報告「GBIでのプロセス - SKBによる現在のアプローチおよび表層水理・生態環境連成アプローチ事例」（Wörman, 2003a）などについてその概要をとりまとめた。

（ ）現在のSKBによる評価におけるGBIの取り扱い

SR-97では、核種移行モデル（Lindgren and Lindström, 1999）と線量評価モデル（Bergström, et al., 1999）のどちらにおいても、GBIの詳細について、全く取り扱われていない。図2.1.2-1にSR-97で利用された概念モデル（Bergström, et al., 1999）を示す。このように、地質環境から生物圏へ流入した核種は、表層環境中に蓄積することなく、地表環境へ直接放出されるという仮定にもとづいており、GBIにおける移行は、地表の水理条件に関係なく実施され、モデル間の連結も考慮されていない。SR-97以降のSKBの検討では、例えば、中低レベル処分場（SFR）を対象とした安全評価の基礎研究（SKB, 2003）において、第四紀堆積層の考慮はなされてきているが、モデル化までには至っていない。また、RD&Dプログラム（SKB, 2001）ではGBIについて注目し始めており、これまでは分断していたモデルを統合化するための枠組みについての検討が開始された

ところである。

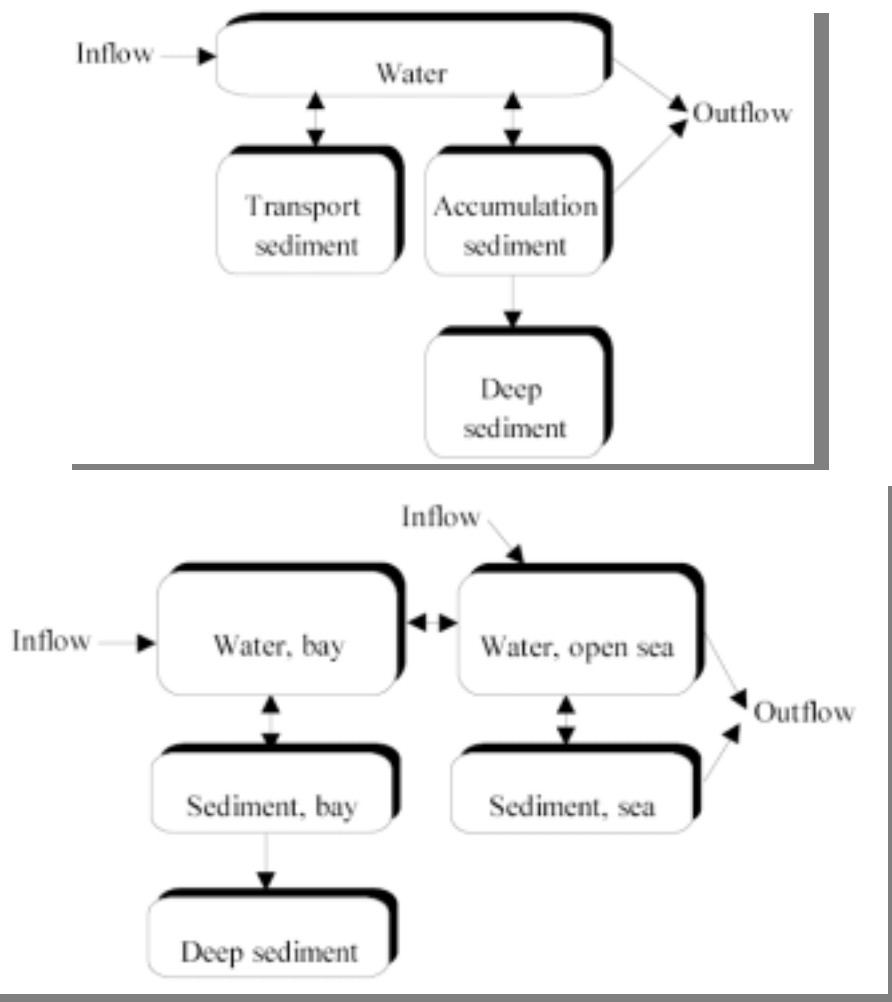


図2.1.2-1 SR-97で利用された概念モデル（上：湖沼放出／下：沿岸放出）

（ Bergström, et al. , 1999 ）

（ ）地下水理と表層水理との連成モデル

（ a ）モデルの概要

SSI では、地下と表層水理との連成モデル開発にあたり、2つの生態系モデルを用いて、2種類の検討ケースを設定した。想定した検討ケースを図 2.1.2-2 および図 2.1.2-3 に示す。

検討ケース1（図 2.1.2-2）は、図 2.1.2-1 に示した Bergström et al. (1999) で

利用された環境モデルにもとづいており、河川が湖沼あるいは沿岸海域へ流出する。検討ケース2（図 2.1.2-3）は、IAEA の BIOMASS プロジェクトで使用された Example Reference Biosphere 2B（以下、「ERB 2B」という）（IAEA，2002a；2002b；2002c）である。表 2.1.2-1 に ERB 2B の環境条件を示す。ERB 2B は、地表面に耕作地、牧草地、湿地、河川、湖沼が存在する。検討ケース2の流出は、湖沼堆積層および集水域系に沿った表層堆積物へ生じる。

検討ケース1 および検討ケース2 の両ケースともに、第四紀堆積層には水理的に2種類の移行経路を設定している。移行経路1 は第四紀堆積層を通過して地表水理系へ移行し、河川を経由して湖沼あるいは沿岸海域に移行する。移行経路2 は母岩を通過して湖沼あるいは沿岸海域に移行する。処分場は、湖沼あるいは沿岸海域から約 5km 内陸の深度 240～440m にあると仮定する。母岩上部には厚さ 20m の第四紀堆積層があるとする。

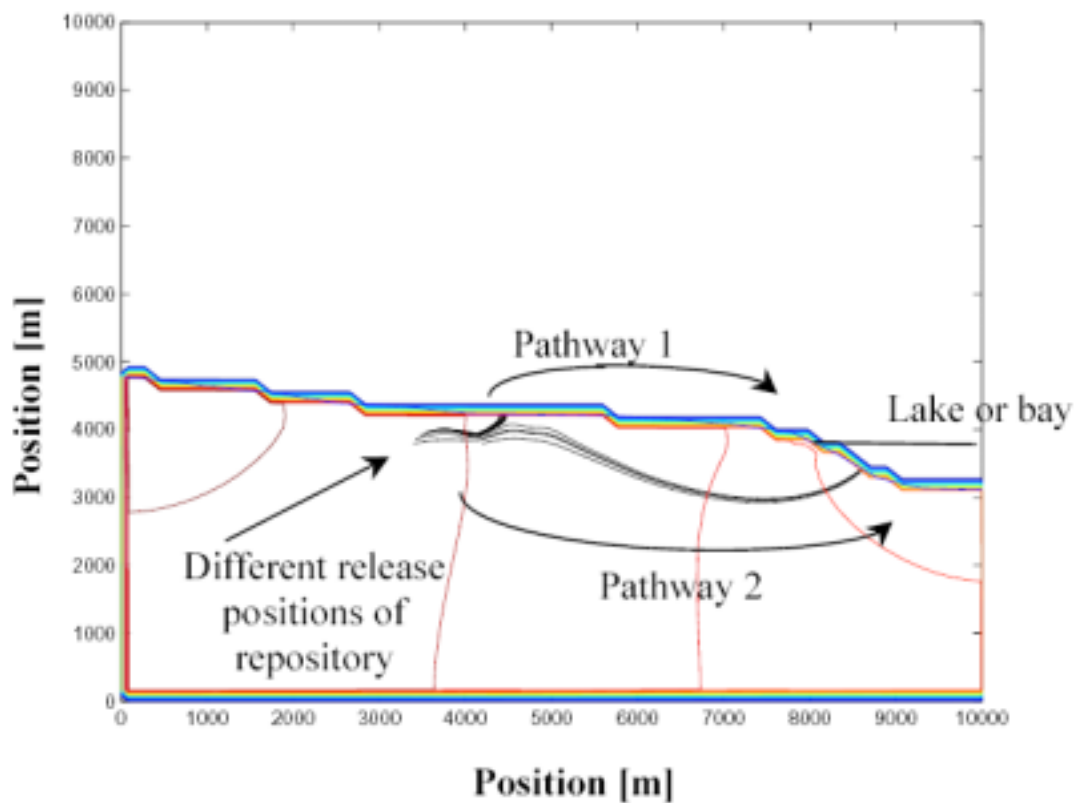


図2.1.2-2 SSIによる検討ケース1 (Wörman, 2003a)

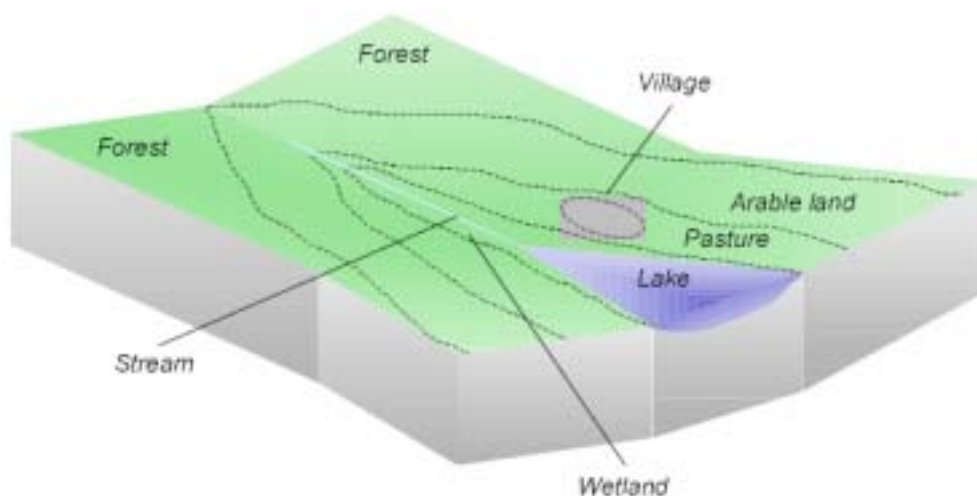


図2.1.2-3 SSIによる検討ケース2 (Wörman, 2003b)

表2.1.2-1 BIOMASSのERB 2Bの概要 (IAEA, 2003)

評価目的	調査優先事項を導出すること(地質環境, ニアフィールド, 人工バリアシステム)。概念の立証。規制者/科学的信頼性。サイト選定の手引き。
評価指標	年個人実効線量
処分場のタイプ	長寿命固体放射性廃棄物のための深地層処分場
サイト条件	一般的な内陸処分場, 接近可能な深度にある帯水層を有する。生物圏の変化はない。
ソースタームおよびGBI	各核種に対して恒久的に定常状態が維持する生物圏システムへの定常的な移行 ($Bq\ y^{-1}$) を仮定する。Tc-99, I-129, Np-237 を対象核種とする。帯水層へと核種が流入した地下水が自然移行し, その後, 地表環境へと移行する。潜在的な生物圏受容体には, 泉, 小川/河川, 湖沼, 湿地, 下部土壌を含む。
評価期間	1,000,000年まで。
将来の人間社会に関する仮定	農村, 開墾および家畜に対して現在の慣例を用いる。多くの食材について, 地域的な自給率が高いとする。

(b) 解析結果

検討ケース1 (図 2.1.2-2) による水理学的な解析の結果、核種の 19%が第四紀堆積層を經由して地表水へ、その後、湖沼あるいは沿岸海域へと移行する(図 2.1.2-2 の経路 1) 可能性が示唆された。この経路を移行する核種の比率は、対象とする母岩の厚さ、地表の地形、湖沼あるいは沿岸海域と処分場との位置関係によるものである。さらに岩盤の透水係数も重要な因子である。残りの核種(81%)は、より深い経路で、湖底あるいは海底堆積物へと移行する(図 2.1.2-2 の経路 2)。なお、堆積物の特性によって、核種は底部堆積物に蓄積するか、あるいは移流する可能性がある。

また、表 2.1.2-2 に、検討ケース1による、各環境媒体における水媒体および Cs-135 の平均滞留時間を示す。表 2.1.2-2 に示すように、水媒体の平均滞留時間について、母岩を通過する全経路の平均滞留時間(1,438 年)は、第四紀堆積層から河川に至る時間(35 年)よりも長い。しかしながら、母岩の低空隙率によるダルシー流速から予想されるよりもその差異は少ない結果が得られた。さらに、Cs-135 について見ると、この滞留時間結果は逆転している。これは、第四紀堆積層の遅延係数が高いことによる。また、湖沼堆積物の滞留時間は、流速の遅さや遅延係数が高いために非常に高くなっている。このように、表層環境中での滞留時間には分布があり、核種が移行する際の時間分布は、生物圏での被ばく経路および線量に寄与することが示された。

表2.1.2-2 各環境媒体における平均滞留時間 (Wörman, 2003a)

	水媒体の平均滞留時間[年]	Cs-135の平均滞留時間[年]
母岩を通過する全経路の平均滞留時間	1,438	15,819
第四紀堆積層から河川に至る平均滞留時間	35	17,716
河川から湖沼あるいは沿岸海域に至る平均滞留時間	0.033	427
湖沼堆積物(20m)の平均滞留時間	968	485,300
経路1:母岩および第四紀堆積層	2,495	44,754
経路1:母岩, 第四紀堆積層, および河川から湖沼へ	2,495	45,181
経路2:母岩, 堆積物, および湖沼	2,166	498,470

上述の平均滞留時間を利用し、各検討ケースについて、人間への被ばく線量へのGBIの影響を見積もっている。

沿岸海域に関する検討ケース1については、既存の評価と同様に、第四紀堆積層を無視し、生物圏に到達した核種は瞬時にすべて沿岸海域に移行する場合と、GBIでの移行プロセスを考慮した場合の比較を行っている。図2.1.2-4に線量ピークの比較結果を示す。図2.1.2-4より、既存の評価結果(図2.1.2-4の左図)は、GBIを考慮した場合(図2.1.2-4の右図)に比べて、線量ピークが約6倍高い結果が得られている。この結果より、GBIを無視することで、非常に保守的な評価を実施していることが裏付けられる。ただし、GBIを考慮した場合には、比較的高い線量が長期間継続している。

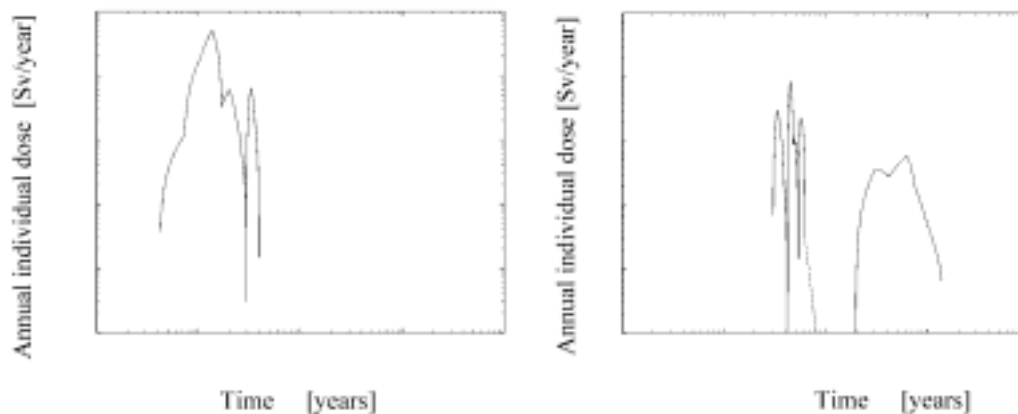


図2.1.2-4 検討ケース1（沿岸モデル）の線量ピーク比較結果（Wörman, 2003a）
 （左図：既存の評価 / 右図：G B Iプロセス考慮した評価）

検討ケース2についての比較結果を図 2.1.2-5 に示す。図中のグラフは、全線量を直線で示し、それ以外は各媒体（耕地，牧草地，湿地，湖沼）を点線で示している。図 2.1.2-5 より，G B Iを無視した場合（図 2.1.2-5 右図）に比べて，考慮した場合（図 2.1.2-5 左図）の線量のほうが，わずかに高くなっている。

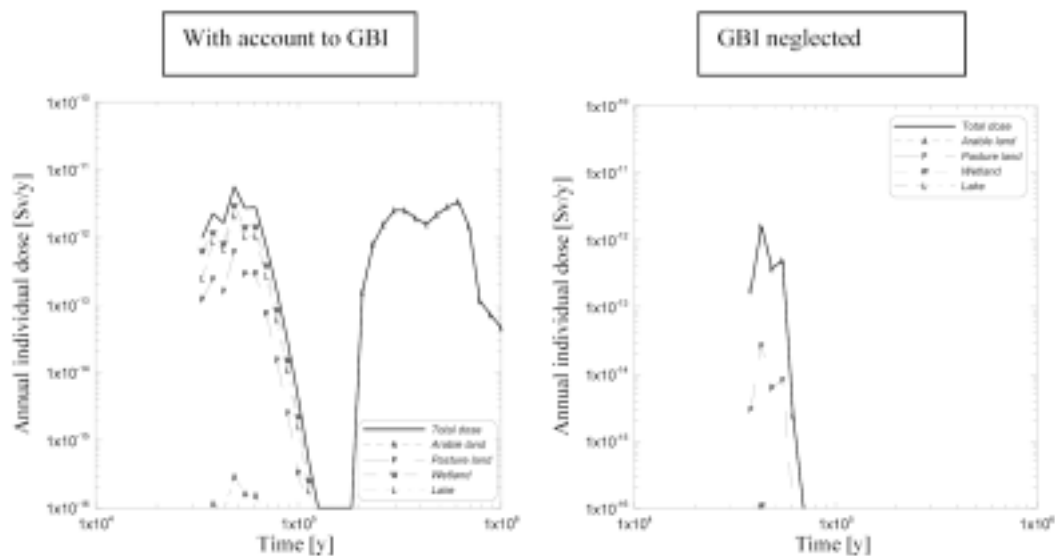


図2.1.2-5 検討ケース2の線量ピーク比較結果（Wörman, 2003a）
 （左図：G B Iプロセス考慮した評価 / 右図：既存の評価）

この理由として，陸域における表層水理環境（第四紀堆積層）と生態環境との

相互作用があげられる。例えば，第四紀堆積層と生態環境との相互作用を考慮しない場合，湖沼への直接放出が起こる。このため，例えば河川の淡水生物や家畜の飲料水摂取あるいは人間の飲用といった一部の経路による線量はゼロとなる。一方，G B I を考慮した場合は，すべての被ばく経路が関与するため，線量は高くなる。

(c) 結論

SSI による検討結果より，核種の移行経路は，第四紀堆積層の存在に左右される可能性が示唆されている。例えば，第四紀堆積層での核種の滞留時間が，母岩中の核種の滞留時間を支配し得る。特に，陸域生態系と水圏生態系との相互作用が考慮される場合には，表層環境中での移行時間が重要となることが示されている。

(2) SHETRAN (英国)

英国 Sellafield にある中・低レベル放射性廃棄物処分場サイト候補地での放射線リスク評価を行った Nirex のプログラムでは、一部の弱吸着性の長寿命核種が、数千年から数万年のオーダーで、天然の地下水流路を經由し、生物圏へと到達することが示されている。すなわち、核種移行にとって地下水による移行経路は支配的であり、処分場から移行した核種は、まず広域地下水システム中を移行し、その後、地表近傍の帯水層および地表水中を移行する。表層における水理システムは、地質環境から放出された後の生物圏中での核種分布や移行を決定する際の主要因である。特に、地表の集水域に流入する地下水中の核種濃度について、降水 (meteoric water) と地下水の混合や土壌への収着や動植物による取り込みによる核種の濃集の可能性を決定することが必要となる。これらの諸問題を解決するため、Nirex のプログラムでは、SHETRAN を地表近傍および地表環境での核種分配システムのモデル化に利用している。

このように SHETRAN は、表層環境における物質収支を評価するために有用なツールであり、その情報は、本件のような G B I に関する検討に有益であると考えられる。以下では、SHETRAN の概要、解析例および地層処分へ適用する際の入力情報の調査例について調査・整理した。

() SHETRAN の概要

英国 Newcastle 大学の WRSRL (Water Resource Systems Research Laboratory) では、主な研究活動の一つとして、水資源や土地管理の分野、極限事象、地表・地下汚染、侵食、土地利用や気候の変化の影響に使用することを目的とした、河川流域のモデル化システムの開発・応用研究を行っている。WRSRL で開発された河川流域モデルには、SHETRAN、UP、NUARNO、TOPCAT-N がある。SHETRAN システムは WRSRL により開発されたシステムであり、英国・デンマーク・フランスの共同で開発された SHE (Systeme Hydrologique European) をベースとしたものである。

SHETRAN は分散型 (distributed) 集水域モデル化システムであり、地下水流

動，堆積物の移行，地表近くの帯水層・土壌・地表水（河川，小川，湖沼）での汚染物質移行をシミュレーションすることが可能である。SHETRAN で考慮されるプロセスには，下記のものあげられる（図 2.1.2-6）。

- ・ 飽和・不飽和層での地下水流動
- ・ 表面流（overland flow）
- ・ 河川や小川による流水（channel flow）
- ・ 樹冠による遮断（canopy interception）*
- ・ 貯留および雨滴（storage and drip）
- ・ 蒸発散
- ・ 積雪・溶融
- ・ 地表・流水での堆積物移行
- ・ 地表・地下の溶質移行
- ・ 流水による溶質移行

* 降雨が土に到着せずに最終的に蒸発してしまう現象を遮断といい，森林地帯で樹木による損失を樹幹遮断損失と呼ぶ。

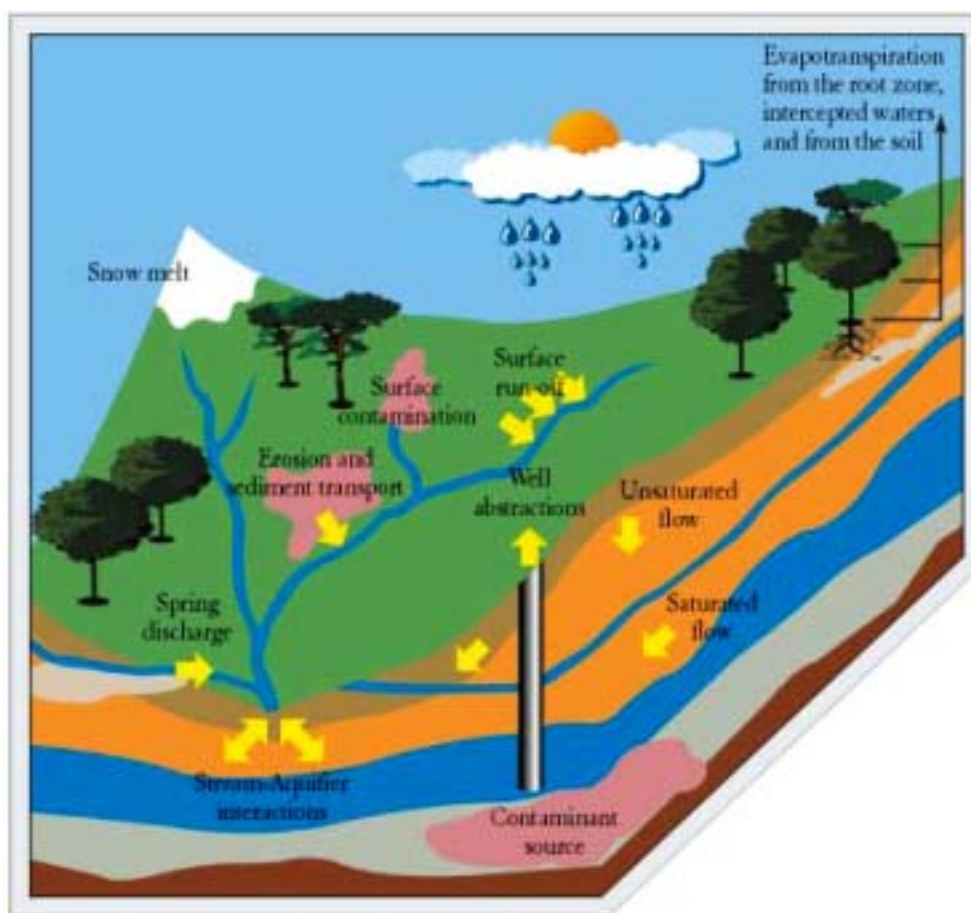


図2.1.2-6 SHETRANで考慮される主要な表層プロセス (Nirex, 2001)

() SHETRAN の解析例

SHETRAN の機能について、英国 Sellafield を想定した Parkin et al. (1999) による解析例を示す。ここでは、下記の設定にもとづいている。

- ・ 2 種類の気候状態（現在の温帯気候および将来の寒帯気候）を仮定する
- ・ 実際のデータを利用して、各気候状態に対する仮想的な集水域を設定する
- ・ 表層地質は、Cumbria 地域西部の沿岸で見られる、砂質の表層帯水層（地下 30～90m 程度を想定）と 20m 程度の砂質と粘土質からなる第四紀堆積層を仮定する。なお、実際の Cumbria 地域西部の沿岸における第四紀堆積層は時間・空間的に非常に複雑であるが、本解析では単純化する。
- ・ 5 種類の汚染物質を対象とし、汚染源から広域帯水層へ、その後、砂質の表層帯水層（地下 30～90m 程度を想定）へ、さらに集水域の底部への移行（これが G B I となる）を仮定する。なお、広域帯水層から砂質の表層

帯水層への移行は，年間 95mm と仮定した。

- ・ 表土は，上層より A 層 20cm，B 層 50cm，C 層 1.5m とし，汚染物質は有機物含有量が多い，A 層と B 層のみ収着すると仮定し，C 層（さらに砂質土，第四紀堆積層についても同様）では収着は考慮しない。
- ・ パラメータの不確実性は検討対象外とする

図 2.1.2-7 は，想定した 2 種類の気候状態に対して設定した仮想集水域を示している。このうち，温帯気候（図 2.1.2-7 上図）については，現在の Sellafield 周辺の沿岸域における実際の集水域情報を利用している。また将来の寒帯気候（図 2.1.2-7 下図）については，40m 程度の海水準変動による約 14km の陸化を想定し，将来の寒帯気候における集水域の地形や水系は，不確実性が大きいことから，現在の Cumbria 地域西部の情報にもとづく，単純化が行われている。

図 2.1.2-8 は，想定した 2 種類の気候状態に対して設定した，地形および流水系，土壌分布ならびに植生分布モデルを示している。図中の太線は流水系であり，図 2.1.2-7 と同様，将来の寒帯気候については単純化されたモデルを利用している。

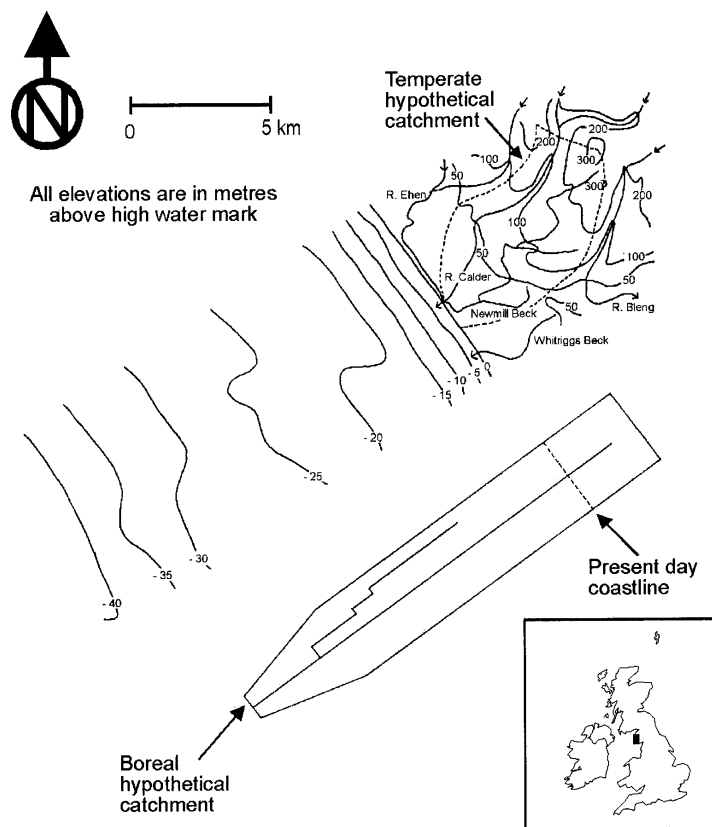


Figure 1. Location map for the temperate and boreal catchments.

図2.1.2-7 温帯・寒帯気候での集水域の位置 (Parkin et al., 1999)

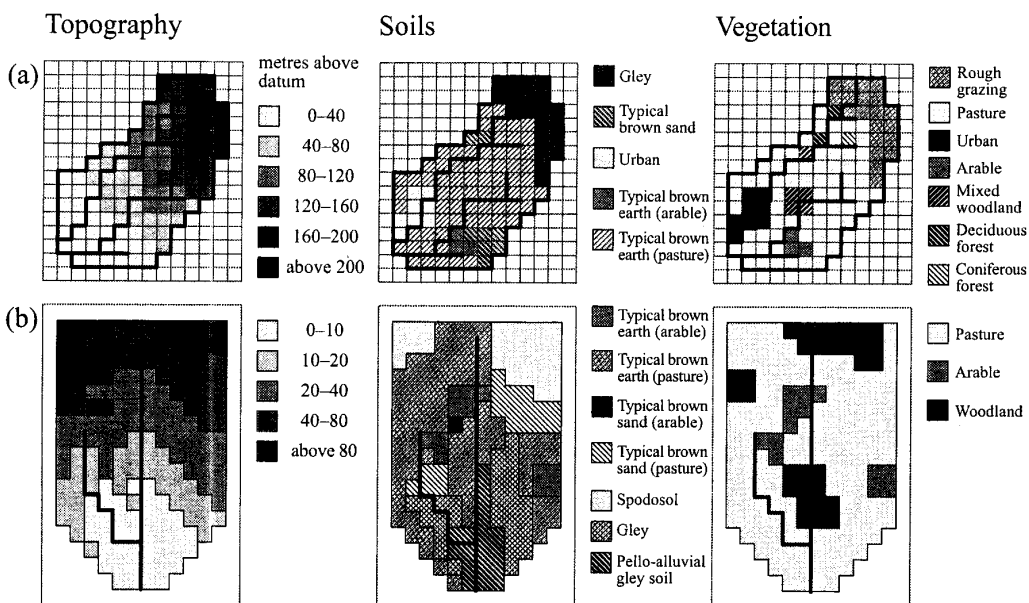


Figure 2. Topography and river network, soil distribution, and vegetation distribution: (a) temperate catchments (b) boreal catchment.

図2.1.2-8 温帯・寒帯気候での集水域の特性 (Parkin et al., 1999)

(上図：温帯気候 / 下図：寒帯気候)

表 2.1.2-3 に、解析に利用した 5 種類の汚染物質について、複数の土壌（地表面から 20cm 程度の A 層）に対する分配係数データを示す。これらの分配係数は、IAEA の TRS No.364 (IAEA, 1994) を参考としている。

表2.1.2-3 表土での汚染物質の分配係数値 (Parkin et al., 1999より)

土壌の種類	$K_d(m^3 kg^{-1})$				
	物質1	物質2	物質3	物質4	物質5
グライ土(寒帯)	0	2.0×10^{-3}	2.5×10^{-2}	2.0×10^{-1}	2.5
Pello-alluvial gley	0	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-2}	5.0×10^{-1}	5.0
スポゾドル	0	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-2}	5.0×10^{-1}	5.0
グライ土(温帯)	0	5.0×10^{-3}	5.0×10^{-2}	5.0×10^{-1}	5.0
褐色森林土	0	2.5×10^{-4}	0.0	2.5×10^{-2}	1.0×10^{-5}
褐色砂質土	0	1.0×10^{-4}	0.0	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-5}

図 2.1.2-9 に温帯気候での集水域に関する年間の水収支結果例を示す。図 2.1.2-9 のうち、上部のグラフは集水域での流入（降水および帯水層からの上昇）・流出（河川の流水および蒸発散）量を示している。また、下部のグラフは表層環境中の貯留量変化を示している。

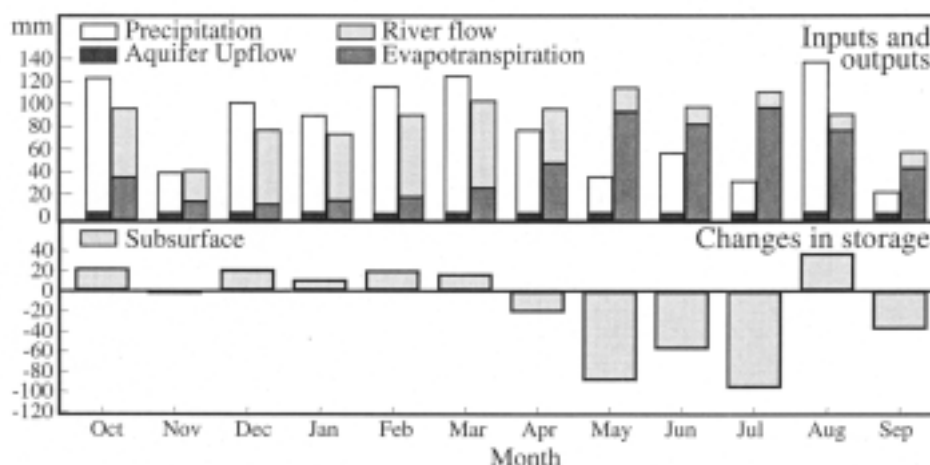


図2.1.2-9 温帯気候での集水域に関する年間の水収支結果 (Parkin et al., 1999)

図 2.1.2-10 に、想定した 2 種類の気候状態について汚染物質 1 の 30 年後の土壌（C 層）中濃度結果例を示す。なお、汚染物質 1 の分配係数はすべての土壌で保守側（ $K_d=0$ ）である。図 2.1.2-10 より、温帯および寒帯のいずれの気候状態においても、河岸および氾濫原（河川の氾濫・河岸変化による低平な土地）で最大濃度となっている。このような濃度分布は、地下水の流れが収束していることを示しており、流出域と考えることが可能である。

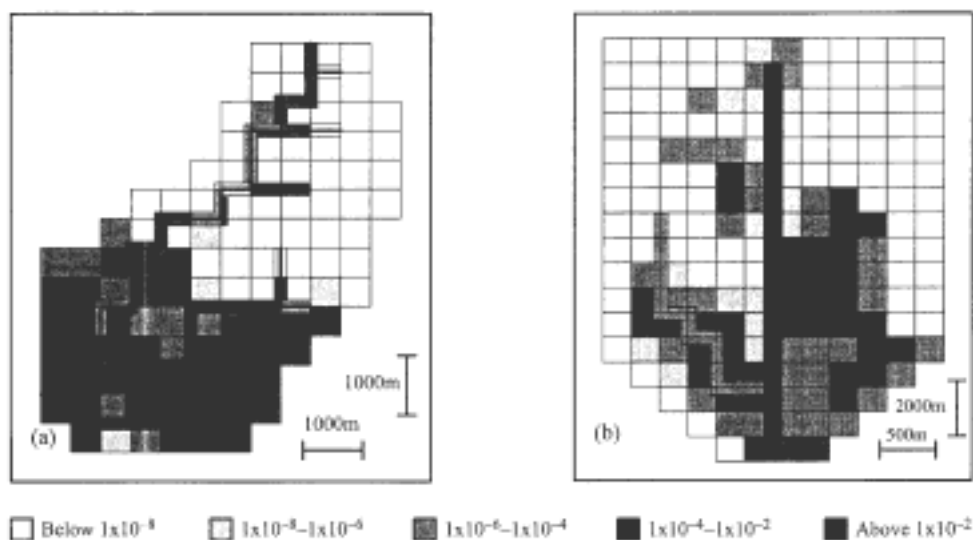


Figure 5. Concentration of Contaminant 1 in the C-horizon at the end of the 30-year simulations: (a) temperate catchment, (b) boreal catchment.

図2.1.2-10 30年後の表土での汚染物質濃度（左図：温帯 / 右図：寒帯）
（Parkin et al. , 1999）

また、図 2.1.2-11 に寒帯気候について汚染物質 4 の濃度分布断面図を示す。図 2.1.2-11 より、汚染物質の大半は河岸に直接流出しており、地表への直接流出は少ない。なお、この解析結果は、実際にカナダで実施されたフィールド調査（Shepherd et al., 1995）や前述のスイスでの結果と同様である。

SHETRAN による解析検討により、下記の知見が得られている。

- ・ 地表水や土壌中の汚染物質濃度は、数時間から数十年以上のタイムスケールのプロセスに依存する。
- ・ 本解析で想定した 2 種類の気候について、地下水中の汚染物質は、表土に移行することなく、河岸に直接流出する。

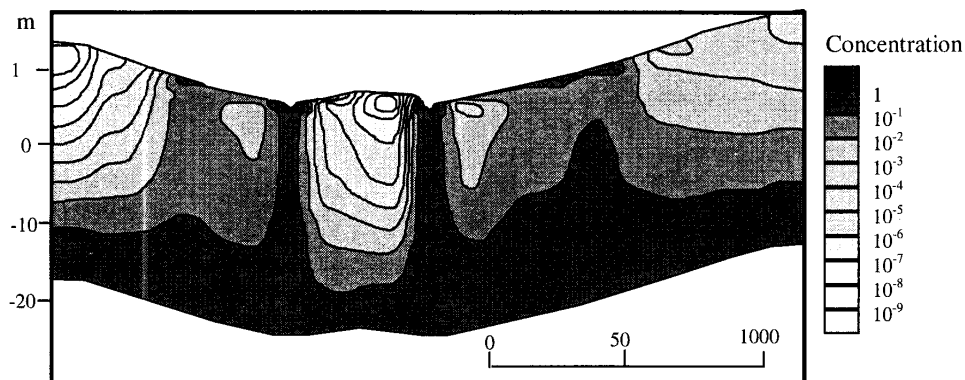


Figure 6. Cross section showing the concentration of Contaminant 4 in the boreal catchment at the end of the 30-year simulation.

図2.1.2-11 寒帯気候での30年後の汚染物質の濃度分布 (Parkin et al., 1999)

() 解析データ

前記 SHETRAN による解析は、Cumbria 地域にある Sellafield を対象とした表層環境データを利用して実施された。Nirex が 1995 年に公表した報告書 (Nirex, 1995b) によれば、以下に示すようなプログラムとその予定が記載されている。これらは、SHETRAN への入力データを含む、第四紀堆積層の特性や表層環境における水文調査プログラムである。

(a) 第四紀堆積層の特性

Sellafield にある第四紀堆積層については、英国地質調査所 (BGS: British Geological Survey) による地質図が利用されている。地質図は、既存の記録情報、フィールド調査、試錐孔の検層・サンプリング、物理探査より作成されたものである。物理探査には、電磁波反射法探査、conductivity traversing、見かけ比抵抗測深、浅層弾性波探査といった一般的な手法が用いられている。また、試錐孔では、透水係数や 検層による観測を行い、補足としてボアホールテレビによる撮影が行われている。

(b) 表層水理特性

Nirex は Sellafield 近傍での表層水文調査を多数実施している。以下に、主なプ

ログラム概要を示す。

(イ) 河川流量

前 2 . 1 . 1 項に記したように，Nirex では，Sellafield 周辺の河川流量について多くのデータ取得を実施してきている（前図 2.1.1-31）。具体的には，Calder 川にある NRA（National River Authority）を始め，Kirk Beck や Black Beck にも計測器が設置されており，1994 年 3 月以降データ取得が実施されている。現在，Calder 川の Thornholme で計測器の設置作業が進行中であり，1995 年 6 月に試運転を開始する予定である。

(ロ) 気象

調査地域の水象状況を把握する目的で 6 ヶ所の専用気象ステーションが設置されている。すべてのステーションには，降雨量モニタリング装置が備えられており，このうち，2 ヶ所のステーションには気象全般をモニタリング可能な装置が組み入れられている。

(ハ) 地下水

NRA による透水性の高い砂質層の水位モニタリングネットワークには，多数の連続記録可能な計器が備えられている。

(ニ) 土壌

サイト内には 7 箇所の土壌調査サイトが特定されている。これら各サイトにおいて，下記項目の測定が予定されている。

- ・ 土壌タイプおよびその特性
- ・ 水理特性
- ・ 力学特性

これら調査サイトは 1995 年 2 月に設置される予定で，9 ヶ月の調査スケジュールが予定されている。さらに生物圏調査チームやサイト特性調査チームによるレビューにより，一部サイトについてはモニタリング範囲や期間の拡張も予定される。

(ホ) 第四紀堆積層の試錐孔調査

水文地質や地質特性を明らかにするために，作業範囲には，13 ヶ所の地点での単孔掘削が含まれる。これら試錐孔のうちおよそ 6 ヶ所には，砂質層へのピエゾメータ設置も予定されている。

(ヘ) 可変区分可変密度 (VSVD : variable section variable density) モデル開発

VSVD のモデル開発には、調査サイトの代表的な3層の水理セクションをモデル化することが必要となる。このため、深部の試錐孔調査や熱や塩分が地下水流動に影響する範囲を特定するための解析が必要である。

(ト) 表層水理モデル開発

表層水理モデルの開発計画は、水収支把握とモデル化段階からなる。水収支把握段階は、1995年5月中旬に完了する予定で、先述の河川流量と気象ネットワークからの測定データを利用して、調査サイトの有効雨量および涵養量が特定される。モデル化の際は、既存の流量解析コードと前述の砂質層の地下水位や河川流量データを用いて、調査エリアの砂質層に対する予備的な地下水力学モデルの開発が必要となる。モデル化段階は1995年5月中旬に開始される予定である。

(チ) 水理地質図

上記の調査検討結果を踏まえ、調査エリアの水理地質図は改訂・更新される予定である。

2.1.3 調査結果から得られるG B I設定に有用な情報

本節にて実施した調査内容について、各国ごとに次項のG B I設定に資する有用な情報を表 2.1.3-1 にまとめた。

表2.1.3-1 G B I設定に資する調査結果の整理(1/2)

国名	岩種	調査結果のまとめ	G B I候補	G B I設定に有用と考えられる情報
米国	凝灰岩	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米国 Yucca Mountain では、地質環境特性の把握により天然の地下水湧水域がないため、G B Iの設定にあたっては、井戸利用を想定し、その地点は保守的に処分場の近傍の人口密集地としている。 ・ Yucca Mountain 周辺では自然湧水域がみられない。 ・ 下記の地下および地表環境把握が行われているが、これらは、G B I設定のためだけに検討・取得されたものではない。 ・ 広域およびサイトスケールモデルによる環境把握 ・ 地下環境(地質(年代、地層、岩種、透水性など);水理(帯水層、地下水流動、地下水面、涵養状況など)) ・ 地表環境(自然地理(標高、堆積物など);気候;水収支(土壌、植生);湧水域;社会環境) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 井戸 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水流動把握の結果、被ばくに影響する自然湧水域がない場合、保守側の設定として、井戸を考慮する。 ・ G B Iの把握には地下および地表環境の把握が必要であるが、多くは、サイト環境把握のための調査検討で入手した情報を利用することで対応可能である。
スウェーデン	花崗岩	<p>【SR-97】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ G B Iの把握は、パーティクルトラッキングによる地下水流動解析およびG B Iとなりうる生物圏(モジュール)の文献調査から行われている。 ・ G B I候補(生物圏モジュール)は、井戸、湖、小川、湾、外洋、土壌および泥炭地である。 ・ 表層環境(流出点と地表環境と)の核種移行は考慮されていない。 ・ 気候変動による陸化の検討が実施されている。 <p>【SSIレポート】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ より現実的なG B I把握の視点から、第四紀未固結堆積物の水理解析が実施されている。 ・ 表層環境中での核種移行時間を考慮することにより、被ばくに影響を及ぼすことが確認された。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 井戸 ・ 湖 ・ 小川 ・ 湾 ・ 外洋 ・ 土壌 ・ 泥炭地 	<ul style="list-style-type: none"> ・ G B I設定において、気候変動による沿岸の陸化は考慮すべき要件となる。 ・ 現実的なG B I設定の視点からは、表層環境の特性把握は重要となる。 ・ スウェーデンのような薄い第四紀未固結堆積物の場合でも核種移行時間による被ばく影響を及ぼしている。わが国の表層環境はさらに複雑であることが想定されるため、この影響は無視できない可能性がある。

表2.1.3-1 GBI設定に資する調査結果の整理(2/2)

国名	岩種	調査結果のまとめ	GBI候補	GBI設定に有用と考えられる情報
英国	火成岩	<ul style="list-style-type: none"> • Sellafield サイト周辺では、多数の地質および水文特性把握作業が実施されており、自然流出は土壌、河川、小川および海洋で起こると考えられている。また井戸も重要視している。 • 沿岸の陸化を考慮し、沖合での井戸の利用も考慮 • 表層環境での核種移行を重要視している。 • 表層環境での水収支・物質移行は実際のサイト周辺の取得データを利用して SHETRAN により解析。 • SHETRAN の解析では、将来の気候変動については不確実性が大きいと考慮していない。 	<ul style="list-style-type: none"> • 河川 • 小川 • 土壌 • 海洋 • 井戸 	<ul style="list-style-type: none"> • GBI設定において、気候変動による沿岸の陸化は考慮すべき要件となる。 • 現実的なGBI設定の視点からは、表層環境の特性把握は重要であり、下記のような解析データ取得が必要となる。 <ul style="list-style-type: none"> • 第四紀堆積層の特性 • 表層水理特性 • その他(河川流量や気象条件など一般の環境把握で取得される可能性が高いデータ)
スイス	粘土質岩	<ul style="list-style-type: none"> • サイト候補地を含む広域および狭域スケールで多くの現地調査結果にもとづく検討からGBIを推定している。 	<ul style="list-style-type: none"> • 第四紀堆積層 • 井戸 	<ul style="list-style-type: none"> • サイトが特定されている場合、十分な現地調査によりGBIの把握は可能である。

2.2 わが国の典型的な環境パターンの設定

本件で対象とする仮想的な処分サイト周辺の環境パターンの設定を行う。わが国における統計情報や環境分野の情報を利用して、典型的な環境条件を検討・整理し、それらを反映した複数の環境パターンを設定する。

2.2.1 考慮すべき要件の整理

前項の諸外国における調査結果からも明らかなように、GBI設定にあたっては、まず対象地域に関して、下記のようなサイト環境特性を把握しておく必要がある。本件の場合、サイトを特定しない一般的な環境条件を対象とすることから、これらの各要件について、国内の統計情報や環境関連文書などを利用し、GBI設定に資する内容（例えば、地下水経路や流出域など）についてとりまとめることとする。

- ・ 地理条件
- ・ 地形条件
- ・ 地質条件
- ・ 水文条件
- ・ 人間活動など

(1) 地理条件

日本列島はユーラシア大陸の東縁部に位置し、日本海をへだて大陸とほぼ平行に連なる南北約 3,000km におよぶ弧状列島である。世界でも比較的新しい地殻変動帯にある日本列島は、種々の地学的現象が活発である。地形は起伏に富み、丘陵地を含む山地の面積は国土の約 4 分の 3 を占める。山の斜面は一般に急傾斜で谷により細かく刻まれており、山地と平野の間には丘陵地が分布する。平野、盆地の多くは小規模で、山地との間や海岸沿いに点在し、その多くが河川の堆積により形成されている。また、気候は湿潤であり、季節風が発達し、四季の別が一般に明確である。

このように、日本列島は起伏が大きく、国土の多くを丘陵地や火山を含めた山地地域が占め、山地が海岸付近まで迫っているところも少なくない。このような地理条件から、わが国では一般に地下水の水位が高く、岩盤は地表付近まで地下水に満たされている。また、海岸付近の地下では、内陸側からもたらされた降水起源の水と海側の

塩水とが接していると考えられる。

日本の地理条件の一例として「処分場の概要（原子力発電環境整備機構，2002）」に記されている，処分場の建設地として選ばれる地域の地理条件を示す（図 2.2.1-1）。図 2.2.1-1 に示すとおり，わが国の地理条件としては，大まかに内陸部，沿岸部および島嶼部に区分できる。

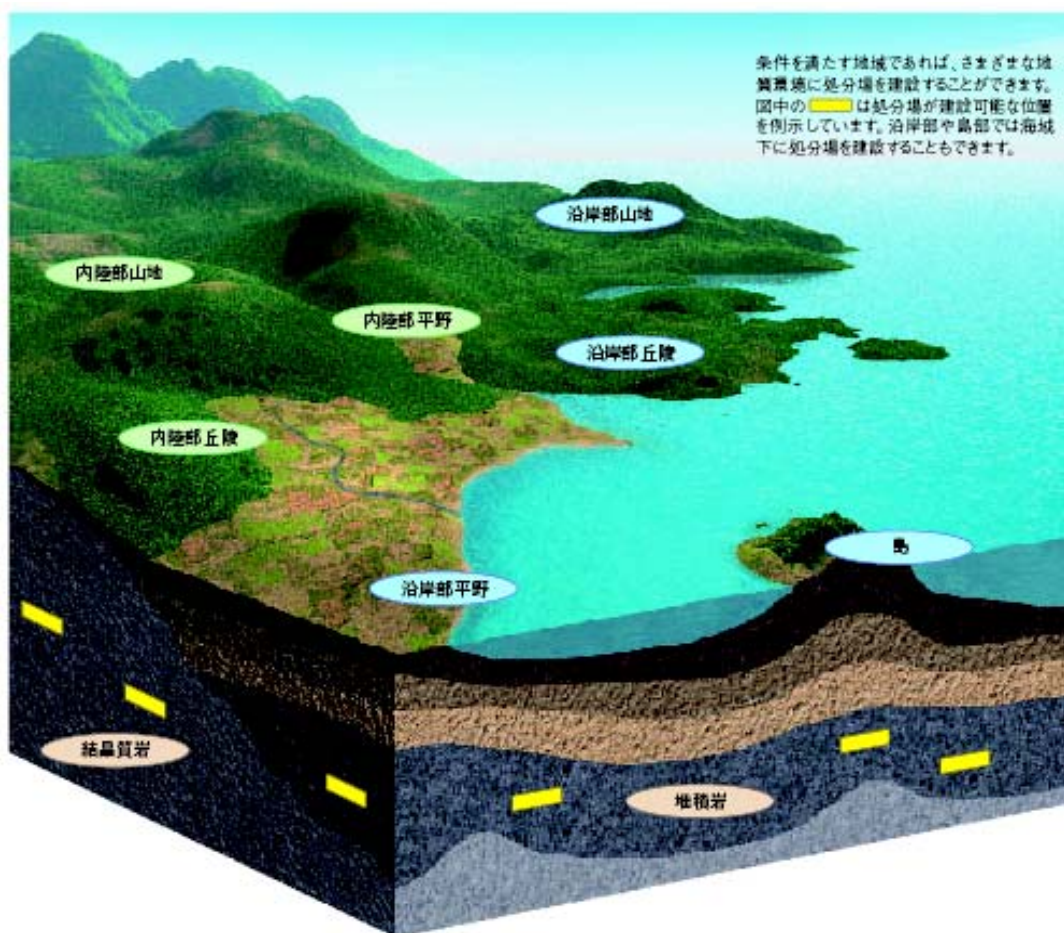


図2.2.1-1 処分場建設可能な地理条件（原子力発電環境整備機構，2002）

(2) 地形条件

わが国は、太平洋をとりまく変動帯に位置しており、山地が多く起伏に富む地形、数多くの火山とその噴出物の広い分布、さまざまな種類の地層や岩体が構成する地質などは、活発な天然現象を背景としたわが国の特徴といえる。

わが国の地形条件に関しては「国土統計要覧（国土庁長官官房総務課，1993）」が発行されている。国土統計要覧によれば、日本の地形は大まかに山地、丘陵、台地、低地および内水域などの5つに分類される。国土統計要覧による、わが国の都道府県別地形別面積を表 2.2.1-1 に示す。さらに表 2.2.1-1 による、全国の地形分布の平均割合を図 2.2.1-2 に示す。前述のように、わが国は山地あるいは丘陵に富んでおり、約 70%を占める。一方、台地や低地の割合は少ない。ただし、これらの分類については正確な定義がなく、現在、さまざまな専門家による分類検討が実施されているところである。

地下水と地形条件との関連性についての包括的な情報としては、例えば、環境省で実施された検討をとりまとめた「大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術検討会中間報告書（環境省，2002）」がある。ここでは、地形（および地質）は、その供給源となる「降水・蒸発散の状況」とともに、地下水の賦存（ここでは地下に存在する地下水の状態を賦存という言葉で表している）・流動を規定するうえで特に重要な留意事項であるとされている。図 2.2.1-3 にわが国の地形区分とその特徴付けを示す。図 2.2.1-3 では、わが国の地形条件を、主に相対的な高度などで火山、山地、丘陵、台地および低地に分類しており、その地下水のあり方について示されており、例えば、山地における地下水は深部に賦存し、山地内部では高圧の地下水が存在するのに対して、低地の地下水は、主に自由水であり、まれに被圧地下水が存在するとされている。

表2.2.1-1 都道府県別地形別面積（国土庁長官官房総務課，1993）（1/2）

都道府県	地形別面積				
	山地	丘陵地	台地	低地	内水域など
全国	230,331	44,337	41,471	51,963	9,232
北海道	40,842	12,024	15,364	9,794	5,367
青森	4,868	1,570	1,831	1,237	118
岩手	11,021	2,089	881	1,261	11
宮城	2,158	2,673	652	1,757	23
秋田	6,755	1,629	710	2,453	84
山形	6,307	841	776	1,393	2
福島	10,389	702	1,114	1,437	129
茨城	1,444	436	2,270	1,647	290
栃木	3,388	615	1,637	752	13
群馬	4,887	224	654	585	13
埼玉	1,230	232	900	1,414	20
千葉	388	1,575	1,670	1,452	42
東京	848	164	629	274	246
神奈川	895	415	451	575	55
新潟	8,142	1,161	491	2,775	8
富山	2,733	331	196	987	5
石川	2,048	1,277	199	656	0
福井	3,021	101	119	932	8
山梨	3,820	26	222	343	58
長野	11,543	101	1,171	751	26
岐阜	8,258	933	208	1,174	23
静岡	5,650	443	325	1,155	204
愛知	2,134	635	940	1,148	278
三重	3,704	428	565	1,031	38
滋賀	1,949	372	197	935	563
京都	3,146	428	168	820	44
大阪	706	212	2	610	334
兵庫	4,858	1,354	492	1,604	49
奈良	2,960	371	66	273	18

表 2.2.1-1 都道府県別地形別面積（国土庁長官官房総務課，1993）（2/2）

都道府県	地形別面積				
	山地	丘陵地	台地	低地	内水域など
和歌山	3,832	384	177	316	2
鳥取	3,057	3	10	411	24
島根	4,845	1,182	7	495	183
岡山	4,896	976	45	1,141	22
広島	6,754	1,082	45	559	26
山口	4,062	1,315	104	461	160
徳島	3,308	146	72	551	63
香川	922	105	316	474	53
愛媛	4,692	347	67	557	0
高知	6,076	508	180	327	11
福岡	2,389	515	704	1,224	112
佐賀	1,243	448	51	645	42
長崎	2,551	358	474	339	347
熊本	5,669	205	543	958	17
大分	5,000	250	441	595	46
宮崎	5,663	639	647	764	23
鹿児島	4,732	1,742	1,904	771	21
沖縄	547	766	784	151	11
最大値	40,842	12,024	15,364	9,794	5,367
最小値	388	3	2	151	0
平均値	4,901	943	882	1,106	196

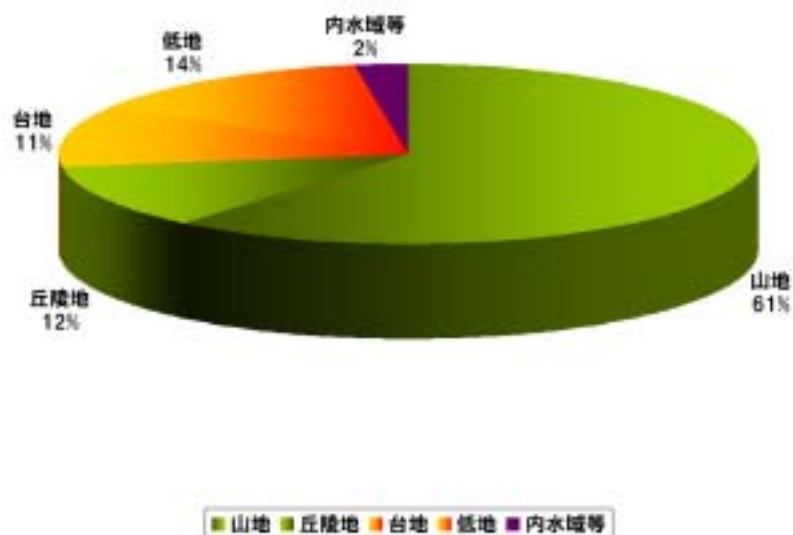


図2.2.1-2 わが国の地形分布割合（国土庁長官官房総務課，1993）

中地形類の五大区分	地形と地質の概略的断面図(日本の場合)				
	名称	火山	山地(狭義)	丘陵	段丘(台地)
形態的特徴	火口(山頂部)を中心に対称的形態をもつ高まりまたは円形の凹地。原形は山地より滑らかである。	主要な尾根と谷底の比高が約300m以上の大起伏地であり、30度以上の急傾斜地が多く、平坦地はほとんどない。	付近の山地より低く、主要な尾根の高さがほぼ揃っており、主要な尾根と谷底の比高が約300m以下である。	低地より一段と高い高台で、周囲または一方を急崖で囲まれた平坦地である。その平坦地は百年に一度起こる程度の出水・高潮でも冠水しない。	河川や海ぞいの低い平坦地で、人工堤防がなければ百年に一度起こる程度の大規模な出水や高潮のときに冠水する。砂丘とサンゴ礁も低地に含まれる。
構成する地形種	各種の火山体、火山原面、熔岩流原、火砕流原、火山岩屑流丘陵、火山扇状地、火口、カルデラなど。	尾根、谷、前輪廻地形(山頂平坦面、小起伏面)、地すべり・崩落地形、崖線、沖積層、断層地形など。谷底は幅狭く、谷底低地は断片的に発達する。	山地とほぼ同じ、ただし、谷底に段丘や谷底低地が連続的に発達する。急傾斜地より緩傾斜地が多い。	段丘面と段丘崖、階状に数段の段丘面が発達する。段丘面は大小の谷に刻まれて分離している。	扇状地、蛇行原、三角洲、干潟、河川敷、自然堤防、後背低地、浜堤、砂丘、堤間低地、海潮跡地、波蝕槽、流路跡地、支谷閉塞低地など。
主要な形成営力と形成過程	火山活動による火山噴出物の定着、爆発など、削削過程一般。	地殻変動で隆起し、地すべり・崩壊、河川・氷河などで削削される。	山地と同じ。	地盤の隆起または海水準の低下によって、低地が離水して生じる。	河川や海、風の堆積・侵蝕作用で平坦になった土地である。サンゴ成育や泥炭の堆積でも生じる。
主要な地形物質(地表直下の岩石)	第四紀の熔岩、火山岩屑岩類。	硬岩(先第四系と火山岩、深成岩、半深成岩、変成岩)が多い。	軟岩(新第三系、第四系の堆積岩)が多い。	非固結の段丘堆積物、降下火山岩屑物。	非固結堆積物(完新統)、サンゴ礁石灰岩。
地形災害・土工事で問題となる地形物質	非固結の火山岩屑物、温泉余土。他は山地と同じ。	断層破砕帯、風化岩、崖線堆積物、蛇紋岩、頁岩など。	山地と同じ。	厚い段丘堆積物、段丘崖では山地と同じ。	軟弱地盤(厚い粘土、泥炭層)、高含水比の中粒砂層。
基本的な形態の形成時代	第四紀。活火山は約1万年以新のものが多い。	第三紀末～第四紀更新世(数百万年以古)	第三紀末～第四紀更新世(数百万年以新)	第四紀更新世・完新世(数十万年以新)	第四紀完新世(約1万年以新)
起こりやすい自然災害	活火山では噴火、降灰。古い火山では山地と同じ。	地すべり、崩落(落石)、土石流、鉄砲水、雪崩。	山地と同じ。炭坑地域では落盤・沈下。	段丘面では比較的に少ない。段丘崖では山地と同じ。	洪水、内水、高潮、津波、漂砂、地盤沈下、地震時の砂の液状化。
地下水のあり方	山地と同じ、ただし山麓に豊富で良質な湧水、火口・噴気孔付近では毒水。	裂き水、洞穴水などのみで、地下水は深く、少ない。山地の内部では高圧の地下水がある。	山地と同じ、ただし被圧地下水があるが、量は少ない。	丘陵と同じ、まれに宙水。	主に自由地下水で、まれに被圧地下水がある。扇状地や微高地以外では浅く豊富。海岸では塩水がある。
主要な農業的土地利用	山地と同じ。	自然林、人工林、草地、荒地(裸岩地)	人工林、草地、果樹園、茶畑、桑畑、普通畑。	丘陵と同じ、他に段丘面では灌漑による水田。	微高地では丘陵と同じ、それ以外の平坦地では水田、養魚場など。

V: 火山噴出物, P・M: 古生界・中生界, G: 深成岩類, T: 第三系, Pl: 更新統(洪積層), HI: 完新統(沖積層), f: 断層, a: 火山灰層。

図2.2.1-3 わが国の地形区分とその特徴(環境省, 2002)

(3) 地質条件

わが国の一般的な深部の地質条件については、第2次とりまとめに示されている。ここでは、『現在の日本列島は成因や生成時期を異にする、さまざまな種類の岩石で構成されており、また、構造線で分断されていて、ひとつのユニットとしての地層や岩体の規模が小さい。日本列島の地表に分布する岩石は、60%弱が堆積岩、40%弱が火成岩で、変成岩は4%程度である。ただし、地層処分の対象となるような深度では、堆積岩の割合は地表付近よりも小さくなると考えられる。火成岩、堆積岩および変成岩は、それぞれ起源となったマグマ、堆積物、原岩の性質およびそれらが固結する過程での温度や圧力などの条件の違いによって、さらに多種多様の岩石に分類される。』とされている。

また、わが国の表層における地質条件に関する情報については、全国レベルで土地分類基本調査（国土交通省、各都道府県）が実施されている。土地分類基本調査は、農林業、工業などの生産基盤である、地表および地表近くの浅い部分の開発・保全およびその高度利用を目的として実施されており、地表から深度数十 m までを構成する堆積層や岩石の分布、性状（固結度、岩石区分、くさり方、割れ目などの構造、透水性）、地質構造などが示されている。一例を図 2.2.1-5 に示した。また、一般的な地質の状態と地下水の賦存様式について表 2.2.1-2 に示した。これらより、海岸付近あるいは河川付近の表層地質の多くは、比較的新しい第四紀などの泥や砂質の未固結あるいは半固結堆積物からなり、内陸に行くにしたがい、第三紀の固結堆積物が表層を占める割合が高くなっている。また、未固結の堆積物は透水性が高くなるのに比べ、第三紀は透水性が小さく、地下水の流れに影響する因子となりうる。

表2.2.1-2 一般的な地質の状態と地下水の賦存様式の例（建設産業調査会, 1998）

地質年代	岩相の特徴	固結度	地下水の賦存状態	地形	構成岩石・地層	透水性
後期更新世～ 完新世	非海成～浅海成 堆積物	未固結	層状水	沖積低地	粘土・シルト・ 砂・礫	大
				河成扇状地	礫・砂	極めて 大
第四紀	段丘堆積物	未固結	層状水	河岸段丘	礫・砂・粘土	極めて 大
				海岸段丘	砂・シルト・粘 土	大
新第三紀	海成堆積物	固結～ 軟岩	層状水	丘陵地	礫岩・砂岩	小さい

※ 地質年代および岩相上の特徴は代表的なものであり、必ずしも厳密ではない。

このように地下水の賦存・流動を考える際には、地質条件に依存するところが多く、微視的にいえば、地層中の空隙特性によるものであると考えられている。一般に空隙には、多孔質と亀裂質に区別される。さらには鍾乳洞のような大規模な空洞性のもも存在する。多孔質の空隙をもつ地層は多孔質媒体として層状水とよばれる空隙水をもつ。また、亀裂質の空隙をもつ媒体には亀裂水（破か水）を含有している。なお、空洞には地下河川などの地下水体が存在し、それらは洞穴水とよばれている。なお、多孔質・亀裂質にかかわらず、空隙は必ずしも水で満たされているわけではなく、水が十分にある場合（飽和体）とそうではない場合（不飽和体）とに区別される。

わが国では経験的に新第三紀以降の堆積層と風化した火山岩などの岩石には多孔質の空隙があり、それ以前の地質年代の堆積層あるいは火山岩の一部および深成岩、変成岩には亀裂質の空隙が発達しているとされている。また空洞は一般に石灰岩層や第四紀の粘性の低い溶岩層に特徴的にみられる。なお、わが国とは異なり、大陸地域では中生代の砂岩層にも多孔質の空隙が広く認められている。

空隙率と透水性に関して、多孔質媒体の場合、一般的には空隙率が高い場合には透水性も高いと考えられている。これは空隙率が地層を構成する粒子形状や粒子間の充填物の存在によるため、充填物が少なく、粒子形状がそろっている場合には空隙率は高く、逆の場合には低くなる。しかしながら、粘土層やローム層の場合、空隙率は

高いものの透水性はよいとはいえず、必ずしも空隙率の高いといって、透水性も高いとはいえない。一方、亀裂質媒体の空隙率は、亀裂密度や幅、長さが空隙率を決定する要因となる。このため、破碎帯や溶岩の急冷部の空隙率は高く、さらに地層を構成する粒子や鉱物の並び方が規則的で一定の方向を示すような頁岩、粘板岩、片岩などには割れ目が多く存在するため、空隙率も高くなる。なお、充填物との関連性は多孔質媒体と同様であり、断層であっても地質年代が古く、充填物により固結したものは空隙率が著しく低い(図 2.2.1-4)。

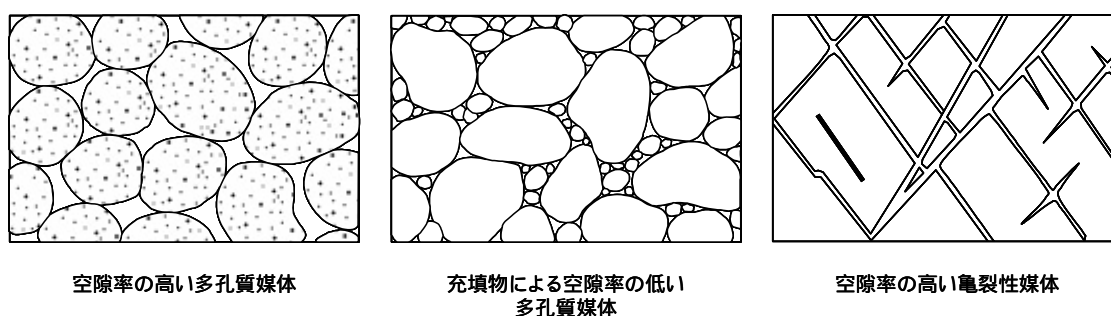
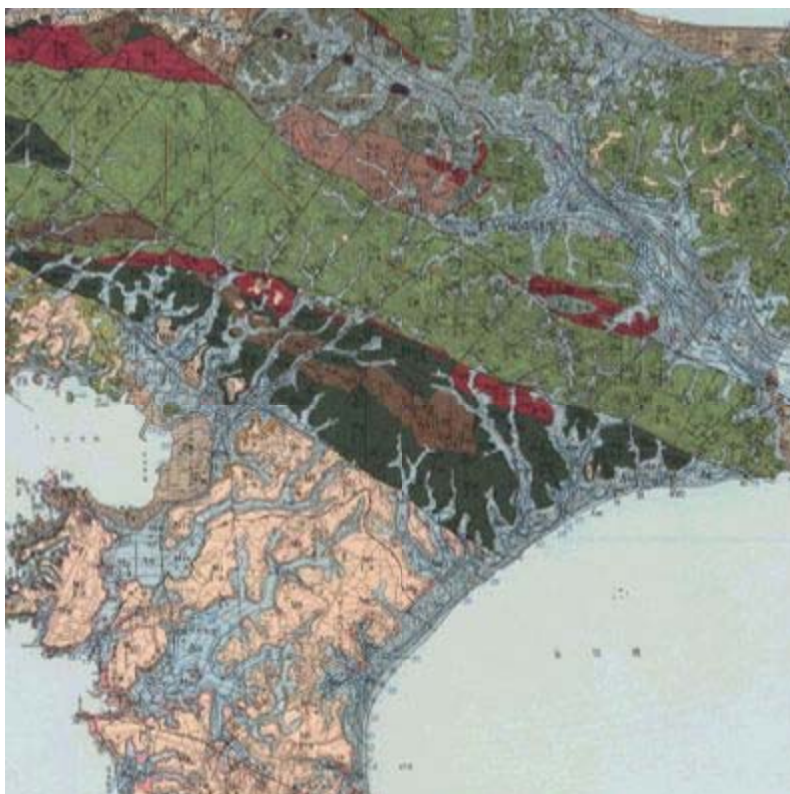


図2.2.1-4 空隙の種類模式図(建設産業調査会, 1998)

さらに、前項の地形条件と同様、環境省で実施された検討報告書である「大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術検討会中間報告書(環境省, 2002)」では、一般的な地下水と典型的な地質特性との関連性についての情報として、先の図 2.2.1-3 あるいは表 2.2.1-3 に示す「地形区分ごとの水理地質特性と地下水などの賦存・流動を考慮する際の留意点」において典型的なわが国の地質環境とその地下水のあり方についてまとめられている。具体的には、例えば、山地は、硬質な岩盤が主体であり、断層破碎帯や亀裂などに沿って流動する深層地下水が主体であるため、断層や亀裂分布などの地質構造に支配され、水循環系の境界が必ずしも地形的分水界に一致せず、特に、火山岩地域や石灰岩地域では、構造的要因により地下水流動が規定される。また、丘陵では、新第三紀～第四紀の未固結堆積層主体で、地下水流動は地層の透水性や分布に規定され、地下水の賦存・流動形態が複雑である場合が多いことがあげられている。

前述の多孔質媒体および亀裂質媒体が、ある程度連続して地域的な広がりをもち、採取可能な地下水を含むものを帯水層とよぶ。このため、一般的に、その利用性から、

粘土層やローム層は、含水量が多いものの帯水層には含まれない。堆積岩などの多孔質媒体が帯水層となっているとき、その帯水層は一般に層状に分布している。一方、亀裂質媒体が帯水層となっている場合は、地層の岩質的な特徴（例えば緻密な頁岩などの無数の割れ目）や構造運動の結果（破砕帯）を示していると考えられており、帯水層の存在形態としては、前者は面的に広がり、後者はほぼ直線状に延びる。



第四紀	完新世	Am	泥, 砂	未固結堆積物
		Am	砂, 礫	
	更新世	Hts	砂, 礫	半固結堆積物
		Mts	凝灰質砂, 礫	
鮮新世	Ntam	凝灰質砂岩・泥岩		
	Zm	泥岩・砂岩		
第三紀	中新世	Yl	石英安山岩質 凝灰岩	固結堆積物および火成岩類
		Mt	泥岩・凝灰岩	

図2.2.1-5 土地分類基本調査結果（表層地質）の例（凡例は一部の地質）

（国土交通省，各都道府県）

表2.2.1-3 地形区分ごとの水理地質特性と地下水などの賦存・流動（1 / 2）

（環境省，2002）

地形区分	水理地質の特性	地下水などの賦存・流動を考慮する際の留意点
火山	<ul style="list-style-type: none"> ・ 比較的堅硬の火山砕屑岩類と軟質～未固結の火砕流堆積物などが不規則・不均質に互層することが多い。 ・ 全体に透水性が良好で、表流水に乏しく、地下水位も低いことが多い。 ・ 山麓末端部などに、大量の被圧地下水の湧泉がみられることが多い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 山体の透水性が良好な場合、水循環系の境界は地形的分水界に一致しない。 ・ 火砕流堆積物に埋没された旧地形に従って、地下水が流動する場合がある。 ・ 山麓末端の湧泉の集水域に留意が必要である。
山地	<ul style="list-style-type: none"> ・ 相対的に硬質な岩盤が主体で、断層破碎帯や亀裂などに沿って流動する深層地下水が主体。 ・ その他、表層の崩積土層や風化帯中の浅層地下水や土壌水も水循環の要素を構成する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 深層地下水の流動は、断層や亀裂分布などの地質構造に支配され、水循環系の境界が必ずしも地形的分水界に一致しない。 ・ 特に、火山岩地域や石灰岩地域では、構造的要因により地下水流動が規定される。 ・ 浅層地下水や表流水と深層地下水との関係は、地質構造や土被りなどの位置関係によって多様である。
丘陵	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新第三紀～第四紀の未固結堆積層主体で、地下水流動は地層の透水性や分布に規定される。 ・ 地下水は、地表浸透や表流水による供給が主体で、残積土層が重要な帯水層として機能する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 縁辺部では、隣接する山地や台地・低地の地下水と連続する場合がある。 ・ 火山性丘陵では、比較的硬質な火山岩類と未固結の火山灰などが雑多に堆積する環境にあることが多く、地下水の賦存・流動形態が複雑である場合が多い。
台地	<ul style="list-style-type: none"> ・ 第四紀～新第三紀の未固結堆積層主体で、周囲を崖で囲まれたブロック状を呈する。 ・ 地下水は、主に台地上への降水によって供給され、周囲とは独立する。 ・ 台地内の地下水流動は、地層分布やその透水性に規定される。 ・ 一般に地下水面は低いですが、台地末端の崖線部では、湧水としての流出がみられる場合がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 山地や丘陵との境界付近では、山地・丘陵からの地下水供給も考慮する必要がある。 ・ 地下水流動は、地表地形や帯水層分布だけでなく、難透水性基盤の上面形状によっても左右される。 ・ 難透水性基盤の分布深度によっては、低地部の地下水と連続する場合もある。 ・ 不連続な難透水層の分布により、局所的な宙水が発生し、下位の地下水とは異なる挙動を示す場合がある。

表2.2.1-3 地形区分ごとの水理地質特性と地下水頭の賦存・流動（ 2 / 2 ）

（ 環境省 ， 2002 ）

地形区分	水理地質の特性	地下水などの賦存・流動を考慮する際の留意点
扇状地	<ul style="list-style-type: none"> ・ 主に山間河川から供給された堆積物によって構成され、側方変化が顕著。 ・ 扇頂部や扇央部では地下水位が低く、河川は伏流する。逆に扇端部では地下水位は高く、被圧地下水の湧出もみられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水は、山間河川と密接な関係にある。 ・ 特に扇頂～扇央部では、伏流水として旧河道を地下水谷状に流動する。
低地	<ul style="list-style-type: none"> ・ 主に沖積層（一部洪積層）を流動する不圧・被圧地下水が主体。 ・ 地表浸透や表流水の伏流・浸透が地下水供給の主体となっている。 ・ 河川沿いでは、自然堤防や旧河道などの微地形区分ごとに地層性状が異なり、地下水流動を規定する要因となる。 ・ 市街地などとして発展している場合が多く、既存の地下水利用や土地利用形態の変遷により、水循環系に変化が生じている場合がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地形的分水界が不明瞭なため、水循環系の区分も不明瞭である。 ・ 河川沿いでは、旧河道に沿った地下水流動に留意が必要である。 ・ 地下水位変化などの一次的影響の他、地盤沈下や地表変形などの二次的影響について特に留意が必要である。 ・ 既に生じている水循環系への変化と、事業の影響との関係にも留意が必要である。 ・ 沿岸部においては、水循環系における流入・流出のバランス変化に起因して、塩水浸入が発生する場合がある。

(4) 水文条件

地球上の水は、国土交通省発行の「平成 14 年度版 日本の水資源 (2003)」(表 2.2.1-4) に示すとおり、海水(97.5%)と淡水(2.5%)に大別(地表および地下水を含む)される。また、これらの全体のうち、陸水(陸域にある水。淡水および海水を含む地下水と湖沼水の合計)は 3.5%にすぎない。さらに、陸水のうち、地表水(河川や湖沼などの水量)は、1%以下であり、陸水の多くは地下水あるいは氷河などに含まれる。

表2.2.1-4 地球上の水の量(国土交通省, 2003)

水の種類※1		水量 (×1000m ³)	全水量に 対する割合(%)	全淡水量に 対する割合(%)
海水	海域水	1,338,000	96.54%	---
	地下水	12,870	0.93%	---
	湖沼水	85	0.0061%	---
淡水	地下水※2	10,830	0.78%	30.92%
	土壌水	17	0.0012%	0.05%
	氷河など	24,064	1.74%	68.70%
	湖水	91	0.0066%	0.26%
	沼地	12	0.0009%	0.03%
	河川	2	0.0001%	0.01%
	生物中	1	0.0001%	0.00%
	大気中	13	0.0009%	0.04%
海水合計		1,350,955	97.5%	---
淡水合計		35,030	2.5%	100.00%
陸水合計		47,985	3.5%	---
全水量合計		1,385,985	100.00%	---

※1 南極大陸の地下水は含まれていない

※2 永久凍土域の地下水量分(300×1000m³)を含む

しかし、これらの水体は、それぞれ独立して自然界に存在しているばかりでなく、相互に関連した循環機構を有している。図 2.2.1-6 に天然水の循環模式図を示す。図 2.2.1-6 に示すとおり、水は水圏・大気圏・地圏をわたり、絶えず循環する。その主なプロセスは、太陽放射エネルギーと重力をエネルギー源とした、降水・蒸発散・浸透・流出などである。

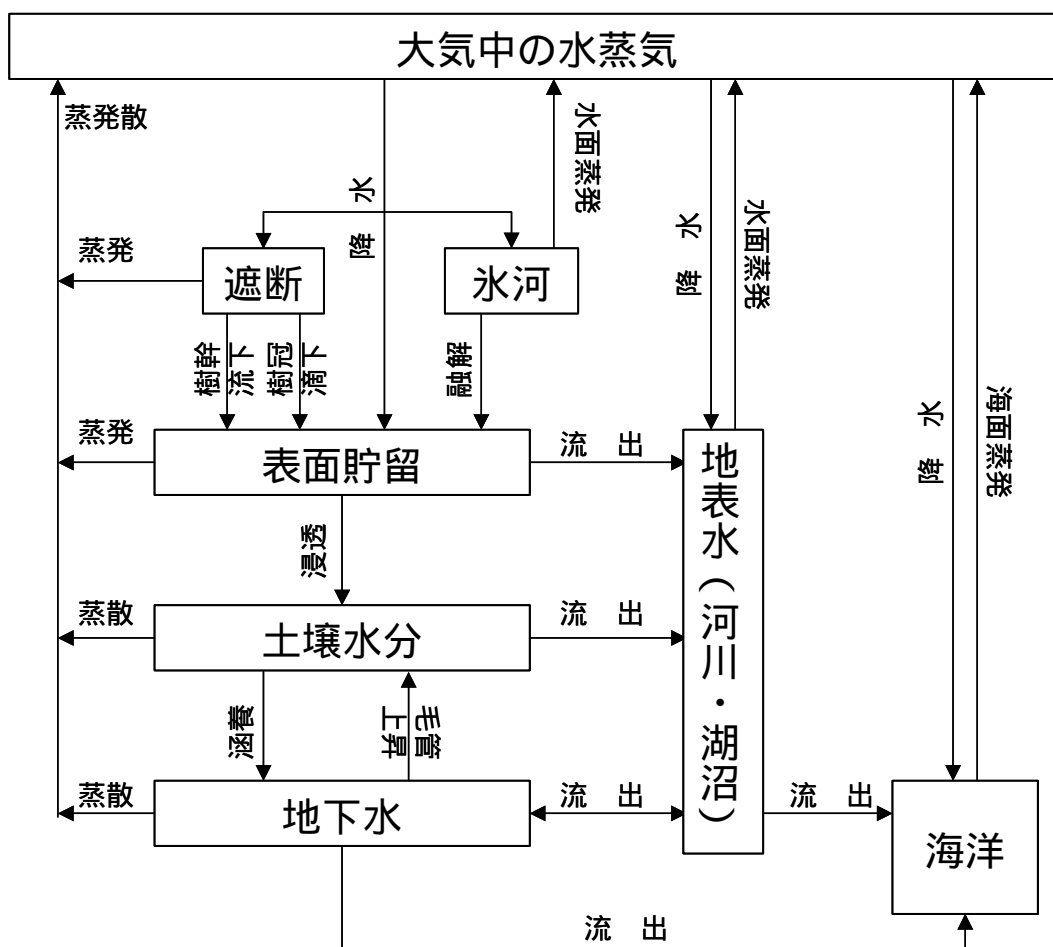


図2.2.1-6 天然水の循環

水の循環には、速さがあり、水循環速度あるいは滞留時間という指標がある。滞留時間は、水の貯留量を年間の輸送量で除することにより求められる。このため、氷河などの氷雪については輸送量が少ないため、その平均滞留時間は長く約 9,600 年程度であるといわれている。海水の場合、水量が多いが、輸送量も多いため、その平均滞留時間は約 3.200 年と短い。また、地下水の平均滞留時間が 830 年であるのに比べて、地表環境中の土壌水や河川水・大気中の水蒸気については、滞留時間が短く、十数日程度であり、年間に 30 から 40 回ほど交換するとされる。

わが国の水域について、その割合は、「平成 15 年版 土地白書（国土交通省，2003）」に示されている。ここで、国土面積が約 3,779 万 ha であるのに対して、水面・河川・水路は 135 万 ha であり、その割合は非常に少ない（約 4%程度）。なお、わが国の国土を占める割合は、森林が 2,511 万 ha と最も多く、次いで農用地が 487 万 ha となっており、これらで全国土面積の約 8 割を占めている（図 2.2.1-7）。このように、わが国の地表水環境について検討する場合には、前記の水循環について考慮するばかりでなく、割合的にも大きい周辺環境の物質循環などによる、例えば地表水環境周辺の土壌特性や植生などへの影響も考慮する必要があると考えられる。

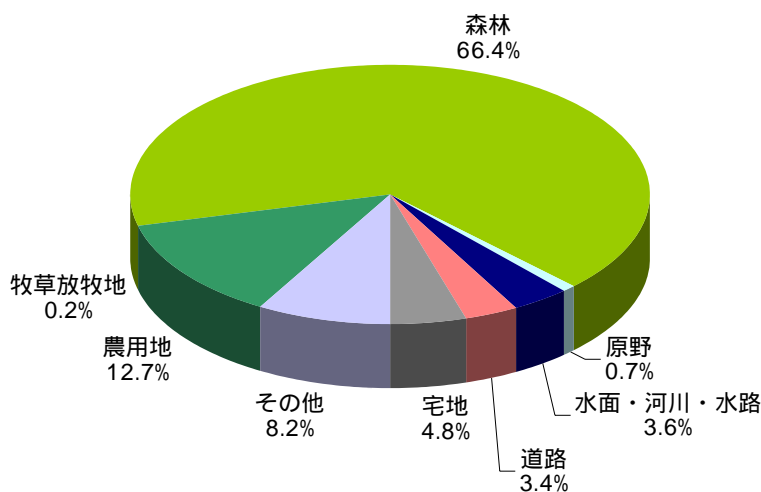


図2.2.1-7 わが国の国土利用割合（国土交通省，2003）

前述の結果から，G B I 設定を検討する場合，処分場からの汚染地下水が，地圏を通過して生物圏に至り，さらに生物圏内での循環を考慮することが肝要である。同様の考え方は，近年，環境分野においても検討されており，前記の「大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術検討会中間報告書（環境省，2002）」において，特に地下水に関して取り扱われている。同書の内容のうち，G B I 設定に関連すると考えられる部分を下記に引用した。

地下水流動は「涵養域」と「流出域」という概念で捉える必要があり，この部分で事業（注：一般事業を指す）を行うかによって，（注：環境への）影響の現れ方は異なる。また，「地下水流動」の視点からみると，その上流側と下流側とでは影響の現れ方が異なる（図 2.2.1-8）。

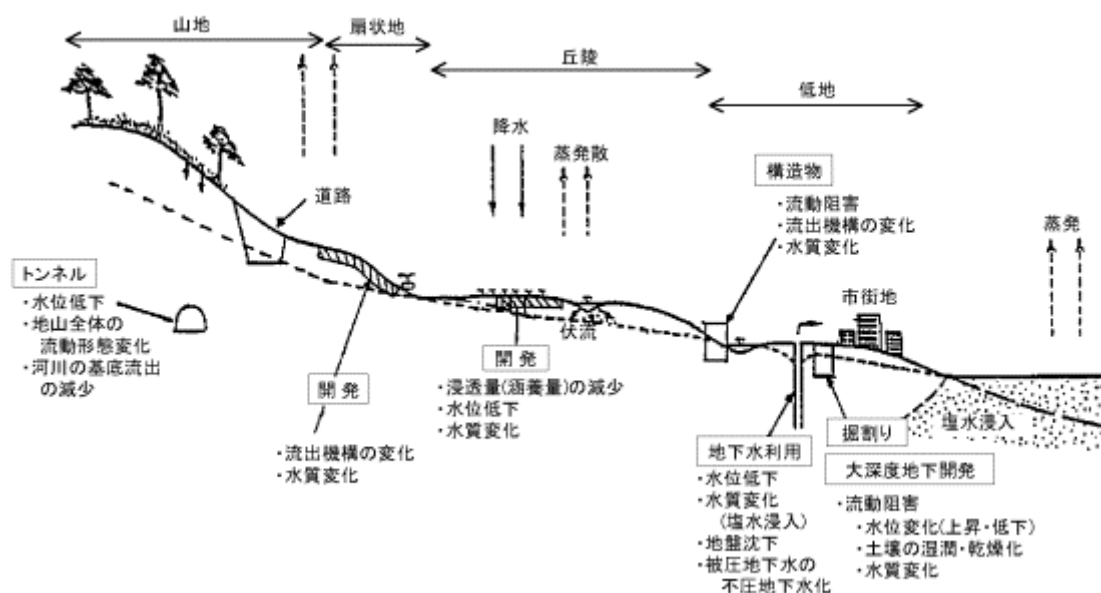


図2.2.1-8 水循環系に想定されるさまざまな影響の形態例（環境省，2002）

事業の及ぼす影響が、どのような地下水流動系（広域流動系、局地流動系、あるいは両者の中間的な流動系）に属するかによって、（注：環境への）影響の現れ方や範囲も異なる（図 2.2.1-9）。

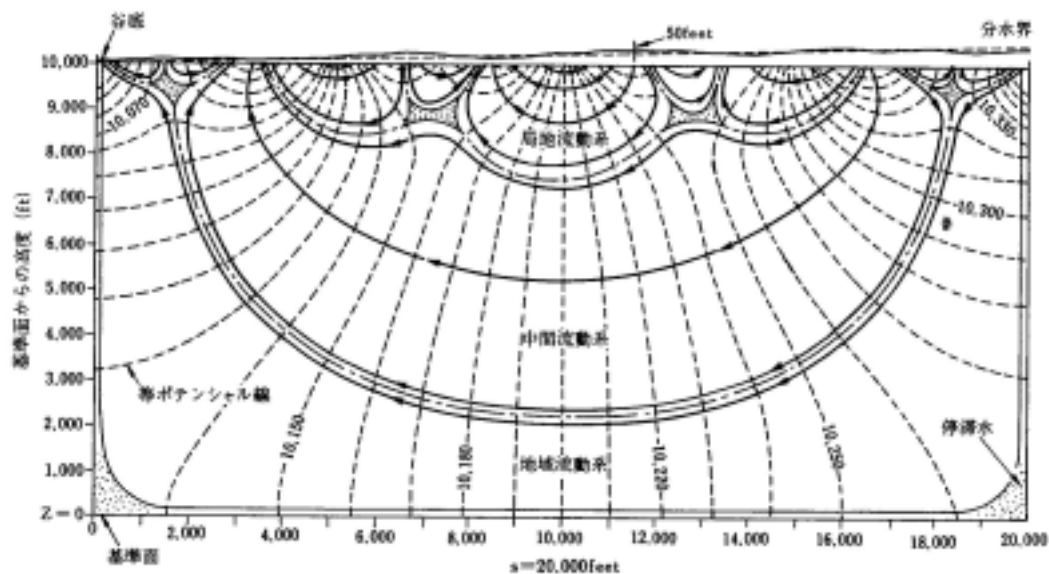


図2.2.1-9 理論的流動パターンおよび各流動系境界 (Toth, 1963)

水循環は、その構成要素である「地表水」や「地下水」、「土壌水」が互いに密接な関係にあるとともに、互いに影響し合うものであるため、単独の要素に対する（注：環境などへの）影響を考慮すると同時に、その影響が他の要素に与える間接的な影響についても考慮する必要がある。また、「3次元的な水循環」を考慮する必要がある。

水循環の構成要素は、季節変動をとまなうため、予測・評価を行う際には、それらの変動の特徴を把握する必要がある。

地盤条件は地域環境によって多様な特性を示すことから、その構成要素の一つである地下水も同様に多様な特性を持つ。

地下水などの賦存・流動を規定する「地形・地質」や、その供給源となる「降水・蒸発散の状況」などの地域環境特性は、特に水循環に対して重要な留意項目である。例えば「地形・地質」は、地下水や地表水の「いれもの」を決定する重要な要素であり、沖積低地や洪積台地、丘陵、山地などの地形区分ごとに地下水の賦存・流動状況は異なる特徴を示す（図 2.2.1-3 および表 2.2.1-2 参照）。また、地層の傾斜や透水性、岩盤の亀裂状況、地質構造などの条件に

よって賦存・流動が規定される。また、「降水・蒸発散の状況」は、地下水などの流動を考えるうえでの基準であると同時に、水循環の重要な特徴の一つである季節変動を左右する条件であり、いわゆる「豊水期」、「渇水期」を考慮するうえで不可欠な情報でもある。

表層地下水のうち、その水圧と大気圧より区分される「被圧地下水」・「不圧地下水」については、必ずしも各々が独立し明瞭な線引きができるものではないことに留意が必要である。

地表水や地下水の流域を考慮する際には、地形・地質条件によって地下水流動や地表水・地下水の流出特性が規定されること、谷次数によっても地表水・地下水の流出特性が異なることに留意が必要である。例えば、地下掘削工事にとりなう調査範囲の一例を表 2.2.1-5 に示す。また山岳トンネルの掘削にとりなう調査範囲としては、「ルートの片側 500m 以内に流域が重なる範囲を対象とする」という例がある（図 2.2.1-10）。

地下水などに係わる予測を行う場合には、一連の水循環系における地表水や地下水などの状態を把握しておくことが必要となるため、地形的分水界（水の流れる方向を分かち境界(分水線)のこと。なお、分水界になっている山脈(分水山脈)を「分水嶺」という。）だけでなく地下水の集水域にも留意して、予測地域を設定する必要がある。また、対象とする流動系のスケールや水循環系における「場」の位置づけにも考慮する必要がある。例えば、地形・地質条件によっては、水循環系の境界が必ずしも地形的分水界に一致しない場合がある。このため、対象地域の地形・地質特性に十分留意する必要がある。場合によっては、水収支計算などの手法によって地下水の集水域などを推定することも考慮する必要がある。

表2.2.1-5 地下掘削工事にともなう地下水調査範囲の例（環境省，2002）

地層	調査区域	概査区域 (m)	精査区域 (m)
関東ローム層相当の地層		200 ~ 300 以内	100 ~ 150 以内
砂礫層相当の地層		300 ~ 500 以内	150 ~ 300 以内

東京都建設局（1997）による調査例

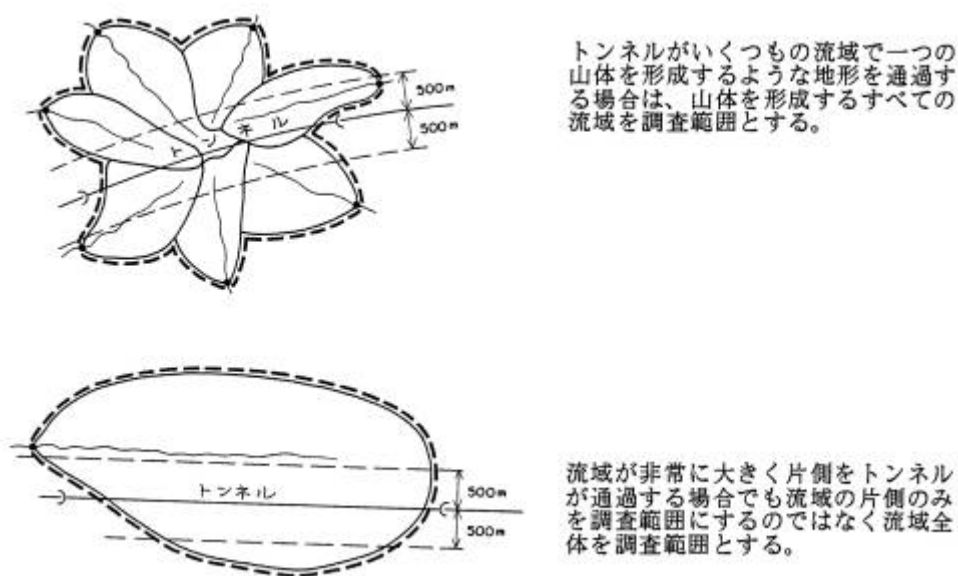


図2.2.1-10 山岳トンネル掘削に対する調査範囲の例（環境省，2002）

(5) 人間活動条件など

() 井戸利用

ここでは、地下水と人間活動とのかかわりに関して、特にわが国の井戸について概要を示す。わが国の井戸は掘削手法により大まかに2種類に分類されている。表 2.2.1-6 に井戸の種類とそれらの特徴を示す。また、図 2.2.1-11 にこれら井戸の概念図を示す。

表2.2.1-6 わが国の主要な井戸の種類と特徴 (日本水道協会, 1993)

井戸の種類	特徴
浅井戸	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表層の不圧帯水層から揚水する。 ・ 深度は8～10m程度 ・ 地表や周辺からの影響を受けやすい。 ・ わが国古来の一般的な井戸
深井戸	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中層以深の被圧帯水層から揚水する。 ・ 深度は生活用で30m程度から、100～200mに達する井戸もある。また、工業用などは500mに達する井戸もある。 ・ 地表からの影響は受け難く(図 2.2.1-11 参照)、水量や水質は安定している。 ・ 現在のわが国の主流な井戸である。

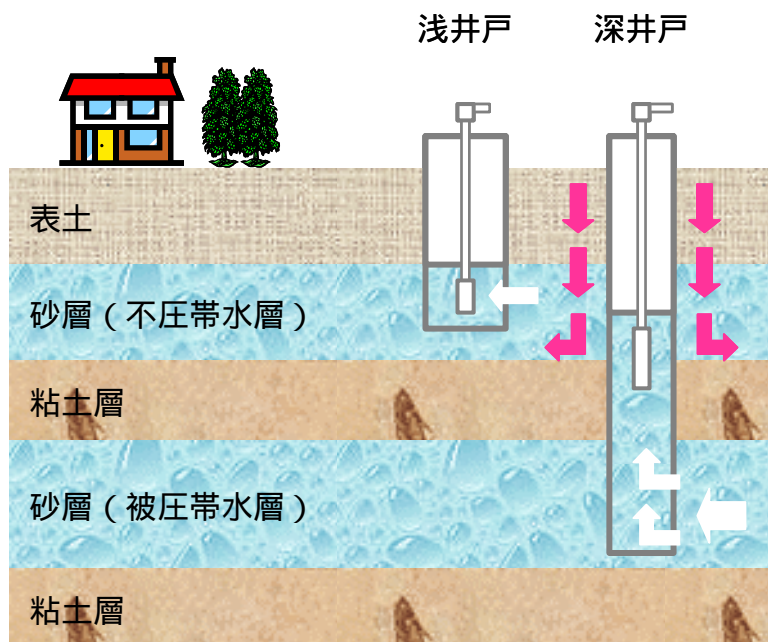


図2.2.1-11 わが国の主要な井戸の概念図

(白矢印：地下水 / 赤矢印：地表からの汚染物質)

() 対象範囲

次項の「環境パターンの設定」の準備として、検討対象範囲の設定に利用可能なわが国の自治体面積に関する情報を表 2.2.1-7 に示す。表 2.2.1-7 より、わが国の地方自治体の平均面積は約 100km²であった。

表2.2.1-7 わが国の自治体面積*

都道府県名	平均自治体面積 (平方 km)	都道府県名	平均自治体面積 (平方 km)
北海道	382.5	滋 賀	66.9
青 森	143.4	京 都	104.7
岩 手	257.6	大 阪	43.0
宮 城	102.6	兵 庫	92.1
秋 田	169.9	奈 良	78.5
山 形	211.9	和歌山	94.5
福 島	152.0	鳥 取	89.8
茨 城	69.7	島 根	112.3
栃 木	129.8	岡 山	91.1
群 馬	90.9	広 島	98.5
埼 玉	41.0	山 口	109.1
千 葉	64.4	徳 島	82.9
東 京	34.6	香 川	43.6
神奈川	65.2	愛 媛	81.1
新 潟	111.6	高 知	134.0
富 山	121.3	福 岡	51.2
石 川	102.1	佐 賀	49.8
福 井	119.7	長 崎	51.8
山 梨	69.8	熊 本	78.7
長 野	113.2	大 分	109.3
岐 阜	107.1	宮 崎	175.8
静 岡	104.2	鹿児島	95.6
愛 知	58.5	沖 縄	42.7
三 重	83.7	全国平均	103.9

* 1999年11月9日現在(日本ネットWEB:<http://www.nihon.net/jichi/index.html>)

(6) 調査結果のまとめ

次項の「環境パターンの設定」の準備として、わが国の考慮すべき環境要件を調査・整理した。なお、海外調査事例にも見られたように、G B I 設定を目的とした場合、主要な考慮事項は地下水の流れである。このため、本調査結果では、この地下水経路との関係を考慮し、表 2.2.1-8 に調査結果と次項への反映内容を示した。

- ・ 地理・地形・地質条件は地下水の流れや存在形態に影響を及ぼすことから、次項の環境パターンの設定には考慮すべき内容であるといえる。
- ・ 水文環境は、地下水への涵養および流出を考慮するうえで重要であることから、次項の環境パターンの設定には考慮すべき内容であるといえる。
- ・ 海外調査結果から、人間活動としての井戸は生物圏への地下水の卓越流路として重要である。井戸の深さは取水を行う岩盤（地質条件）により区別される。

なお、上記に示したとおり、次項のG B Iに関する試行検討では、具体的なサイトを特定せず、わが国の典型的な環境に関して可能なかぎり網羅的な設定を行うことを目的とする。このため、本項での調査結果は、あくまで試行検討対象設定の際の考慮に資する事項であり、すべての内容が必ずしも一義的に対応するものではないことに注意が必要である。

表2.2.1-8 考慮すべき要件の整理結果

考慮すべき要件	調査結果	次項への反映
地理条件	<p>明確な定義はないが、処分場設置可能性からは、下記の分類が可能である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 内陸部 ・ 沿岸部 ・ 島嶼部 	<p>処分場位置は内陸部、沿岸部および島嶼部の 3 パターンを考慮する。</p>
地形条件	<p>明確な定義はないが、下記の分類が可能である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 山地 ・ 丘陵 ・ 台地 ・ 低地 	<p>地下水理(地下水量や地下水の存在形態)から、山地、丘陵(台地を含める)および低地(平野)を考慮する。さらに地理条件から島嶼を含める。</p>
地質条件	<p>深部の地質条件としては下記のように二分される。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 堆積岩 ・ 火成岩 <p>地質条件と地下水との関係は多様ではあるが、ある程度の分類は可能である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 山地: 亀裂性岩盤の露頭部分が多い; 深層地下水が主流 ・ 丘陵: 第三～第四紀の未固結堆積層主体; 表流水や地表浸透水が主流 ・ 平野: 沖積層が主体; 不圧・被圧地下水が主流 	<p>本件ではサイトを特定しない検討である。このため、次項では例えば地形条件ごとに詳細な地質条件を設定することはせずに、可能なかぎり多くの場合を想定した合理的な検討が可能となるような設定を行う。</p>
水文条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 一般的な水分布から、わが国の水域は下記の分類が可能である。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 地表水(主に湖沼水, 河川水, 海水) ・ 地下水(海水系/淡水系) ・ 土壌水 ・ 地表水環境は複雑であり、周辺環境の物質循環を考慮する必要がある。また、集水域などの推定は水収支計算などの手法により考慮する必要がある。 ・ 表層地下水については、不圧地下水と被圧地下水があるが、明確な区分は困難である。 	<p>本件ではサイトを特定しない検討である。このため、次項では例えば地形条件ごとに詳細な水文条件を設定することはせずに、可能なかぎり多くの場合を想定した合理的な検討が可能となるような設定を行う。</p>
人間活動条件など	<ul style="list-style-type: none"> ・ わが国の井戸は、下記の分類が可能である。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 浅井戸 ・ 深井戸 ・ 全国の地方自治体の平均面積は約 100km² である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 井戸は生物圏への卓越流路となることから考慮する。なお、地質条件による区別が可能である。 ・ 対象範囲は 100km² 程度とする。

2.2.2 環境パターンの設定

前項では、環境パターンの設定の際に考慮すべき要件を整理した。この検討より、地下水の流れは、深度によって、かなり離れた地点に流出する可能性があり、連続的な地理条件の把握が必要となる。このため本項では、広域の仮想的なサイト環境モデル（以下「仮想サイト環境モデル」という。）を設定した（「（１）調査結果にもとづくサイト環境モデルの設定」）。さらに、これらの処分場の設置位置を含むサイト周辺環境を環境パターンとして複数設定した（「（２）G B I 設定検討に資する環境パターンの設定」）。

なお、本項のG B Iに関する試行検討では、具体的なサイトを特定せず、わが国の典型的な環境に関して可能なかぎり多くの可能性を想定した合理的な設定を行った。このため、下記の仮想サイト環境モデルあるいは環境パターンは、わが国のすべてのサイト地質環境を包含していないことに留意する必要がある。

（１）調査結果にもとづく仮想サイト環境モデルの設定

前項までの諸外国の調査やわが国の地形・地質条件などを勘案し、G B I 設定検討に資する広域の仮想サイト環境モデルを設定した（表 2.2.2-1）。設定にあたっては、地理および地形条件による分類を考慮しながら、平面では、わが国の自治体平均面積である 100km² 相当、鉛直方向には深度 1000m 程度の広領域を想定した。さらに、深部の地質条件として、わが国の代表的な花崗岩（火成岩系）サイトと砂質および泥質岩層からなる堆積岩サイトの二種類を想定し、仮想的なサイト環境モデル（以下「仮想サイト環境モデル」という。）を設定した。なお、いずれのモデルも丘陵から沿岸部に至るまでに数本の大規模な亀裂が走るものと仮定した。

各仮想サイト環境モデルの表層地質条件として、花崗岩サイトの場合には、山地、丘陵地では、100～300m 程度の透水性の高い岩盤風化堆積物で覆われているものとし、低地（盆地や沿岸部）は河成あるいは海成性の透水性の高い未固結の第四紀堆積物（礫、砂など）が 50～100m 程度、覆っているものとした。一方、堆積岩サイトの場合には、山地、丘陵地あるいは島嶼部は第三紀系の比較的硬質堆積岩が露頭しているのに対して、低地（盆地や沿岸部）では、花崗岩サイトと同じく、透水性の高い

未固結の第四紀堆積物が約 100m 程度覆うものとした。

水文水理条件は、いずれの仮想サイト環境モデルについても、山地から低地に至る河川、丘陵の辺縁に湖沼を想定し、盆地や低地に湧水域を想定した。また、海洋は比較的遠浅の海域を想定した。さらに、飲用の井戸は、岩種（地質条件）ごとに深井戸と浅井戸を設定し、花崗岩サイトでは、平野部および島嶼に岩盤亀裂状の帯水層から直接取水する浅井戸、堆積岩サイトでは、平野部および島嶼の低透水性の泥質岩により被圧帯水層となっている砂質層から取水する深井戸を想定した。

図 2.2.2-1 および図 2.2.2-2 に設定した仮想サイト環境モデルを示す。各仮想サイト環境モデルは下記の特徴を有しているものとする。

表2.2.2-1 設定した仮想サイト環境モデル

	仮想サイト環境モデルⅠ (図 2.2.2-1)	仮想サイト環境モデルⅡ (図 2.2.2-2)
対象スケール	面積は約 100km ² 程度を想定	
地理条件	内陸部, 沿岸部, 島嶼部(沖合数 km 程度を想定)	
地形条件	山地, 丘陵, 平野および山地と丘陵に挟まれた盆地, 海域の島	
地質条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大規模な花崗岩体が分布する地域。 ・ 表層は花崗岩体の風化層が高地(山地, 丘陵, 島)では約 100~300m 程度分布。低地(平野あるいは盆地)では未固結の第四紀層が 50~100m 堆積する。 ・ 丘陵から沿岸部にかけて大規模な亀裂が数本走ると仮定。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基盤岩上層に第三紀の砂質と泥質による被圧・不圧堆積層が分布する地域。 ・ 表層は山地・丘陵などは堆積岩が露頭, 低地(盆地や沿岸部)では主に 100m 程度の未固結の第四紀堆積物が分布する。 ・ 丘陵から沿岸部にかけて大規模な亀裂が数本走ると仮定。
水文水理条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 山間・丘陵部から低地にかけて河川, ・ 丘陵の辺縁に湖沼 ・ 盆地や低地に湧水域 ・ 遠浅の海域 ・ 平野および島嶼に浅井戸 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 山間・丘陵部から低地にかけて河川, ・ 丘陵の辺縁に湖沼 ・ 盆地や低地に湧水域 ・ 遠浅の海域 ・ 平野および島嶼の被圧帯水層(砂質)に深井戸

(2) G B I 設定検討に資する環境パターンの設定

図 2.2.2-1 および図 2.2.2-2 のうち, より詳細に G B I 設定検討に利用するため, 2 種類の仮想サイト環境モデルについて, 範囲をさらに絞り込み, 例示的に複数の環境パターンを設定した。なお, 環境パターンの設定にあたっては, 「処分場の概要(原子力発電環境整備機構, 2002)」を参考にして, 処分場の設置が可能な環境を考慮しつつ, 地形条件や水理条件から G B I 設定に関する検討内容に差異が出せるような設定を行った。G B I 設定検討に利用する環境パターン断面図を図 2.2.2-3 および図 2.2.2-4 に示す。以降に, 各環境パターンについてその概要を説明し, 表 2.2.2-2 に設計結果をまとめた。

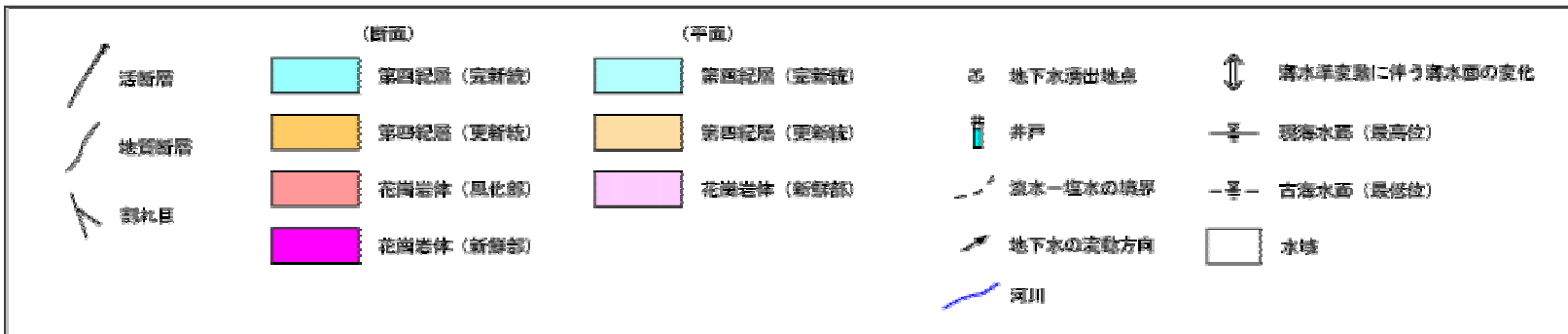
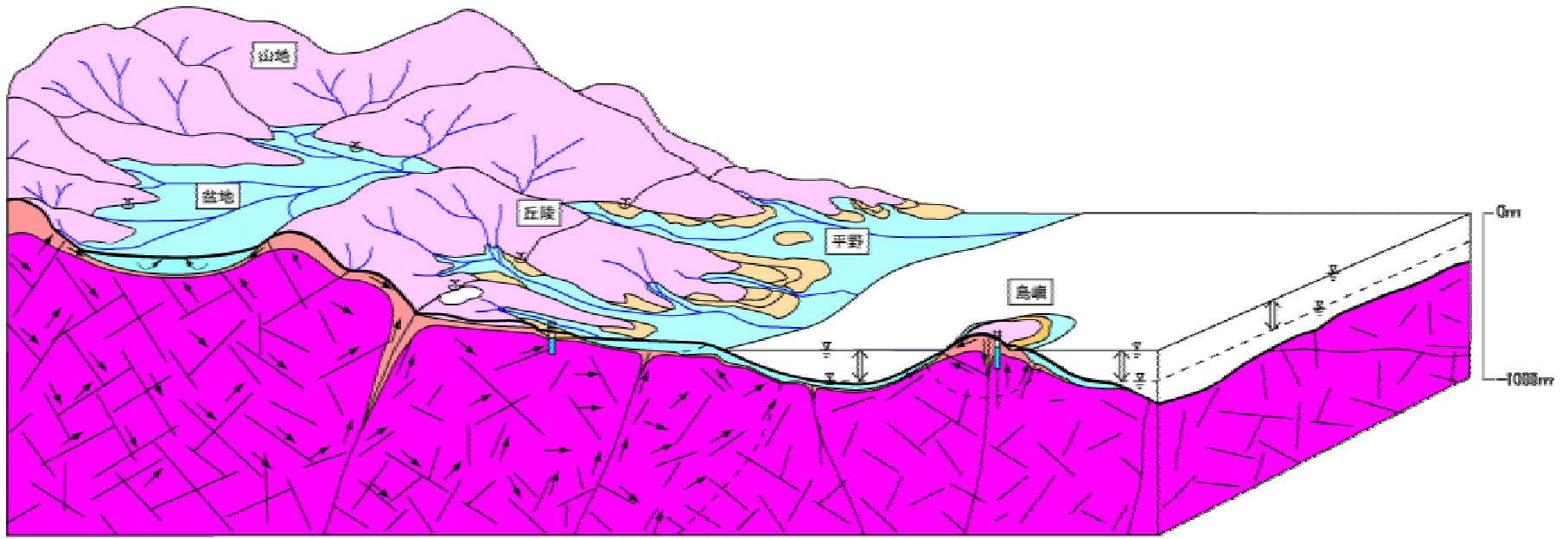


図2.2.2-1 仮想サイト環境モデル

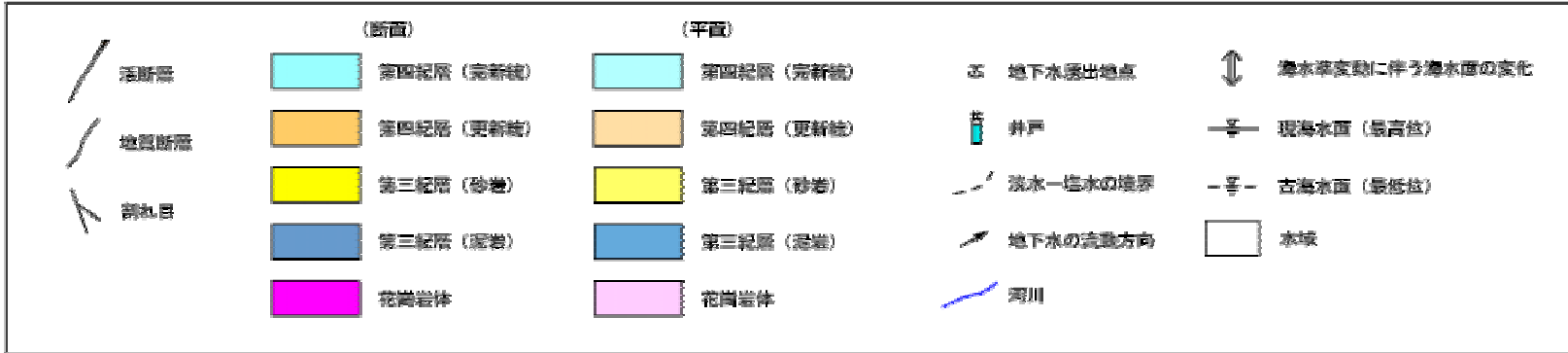
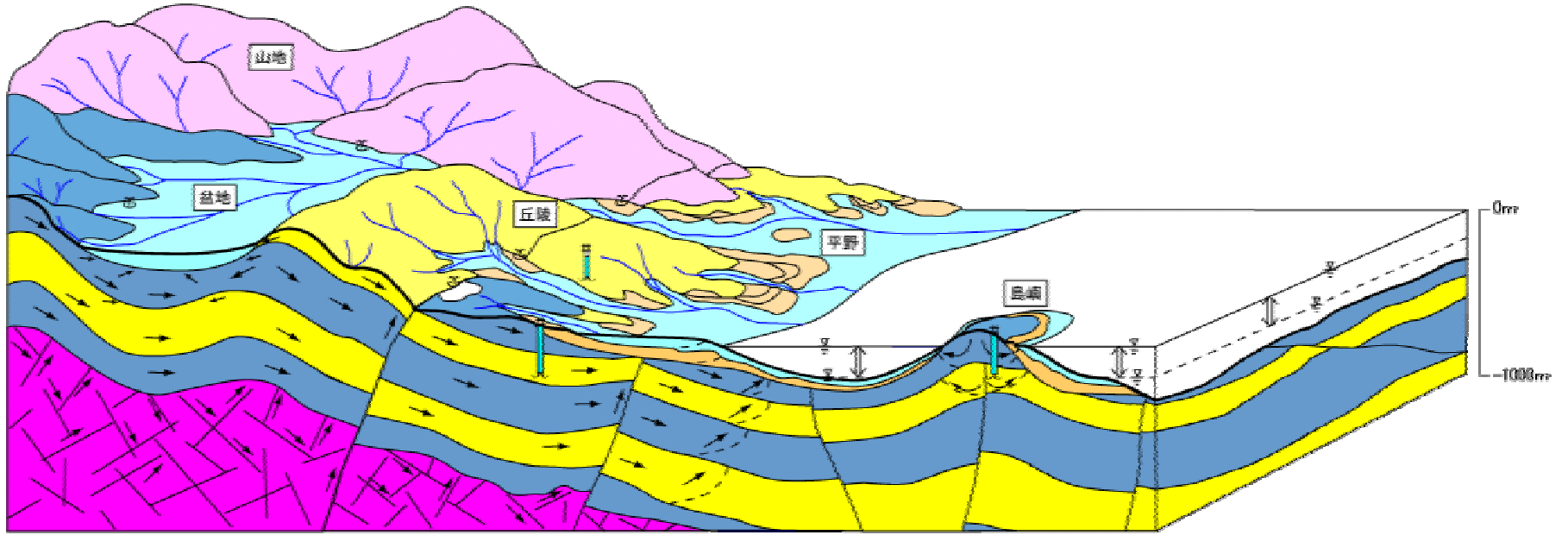


図2.2.2-2 仮想サイト環境モデル

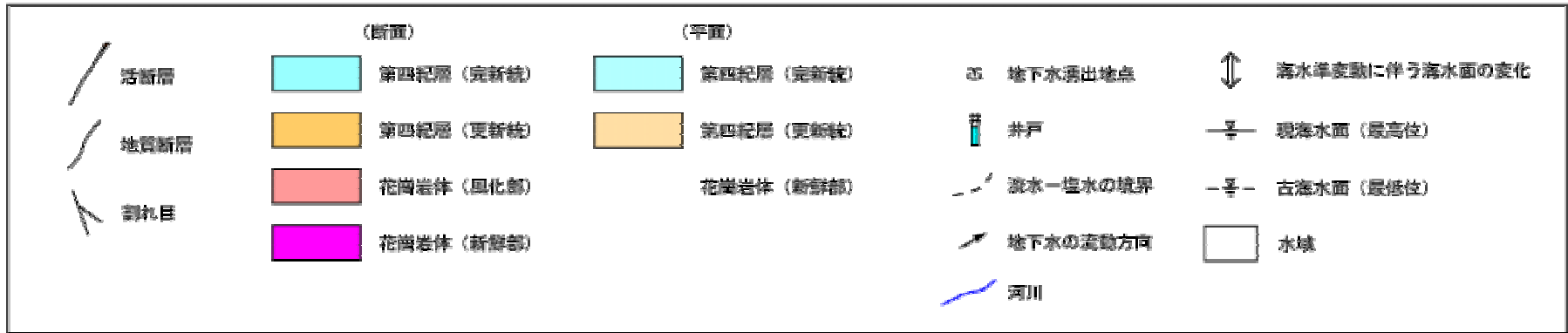
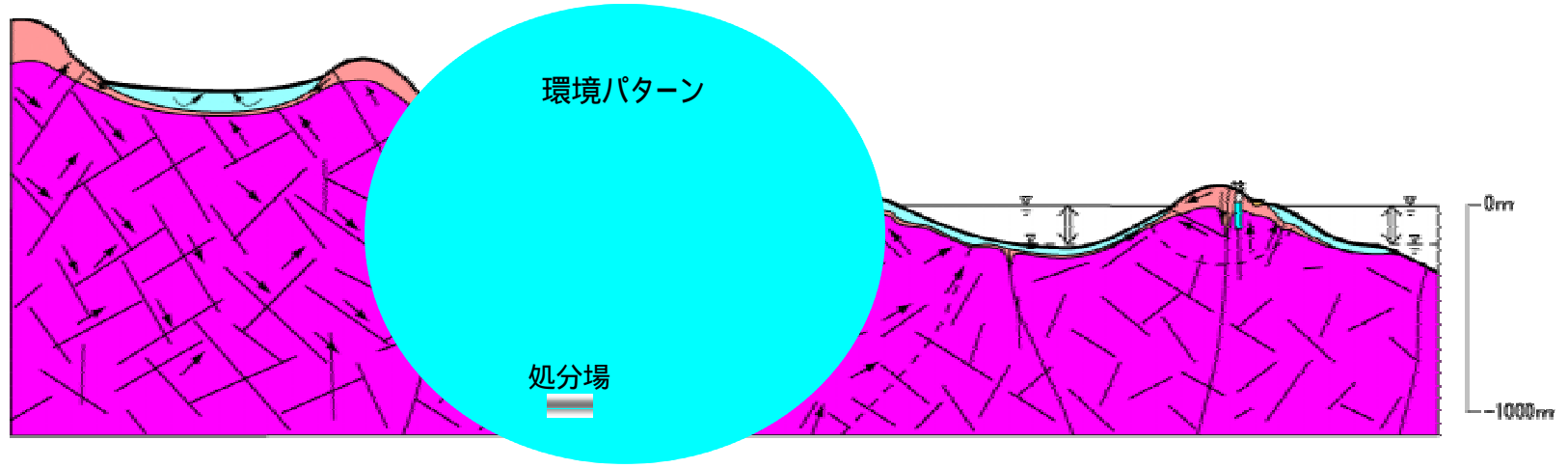


図2.2.2-3 仮想サイト環境モデル (断面図) および環境パターンとして設定した領域

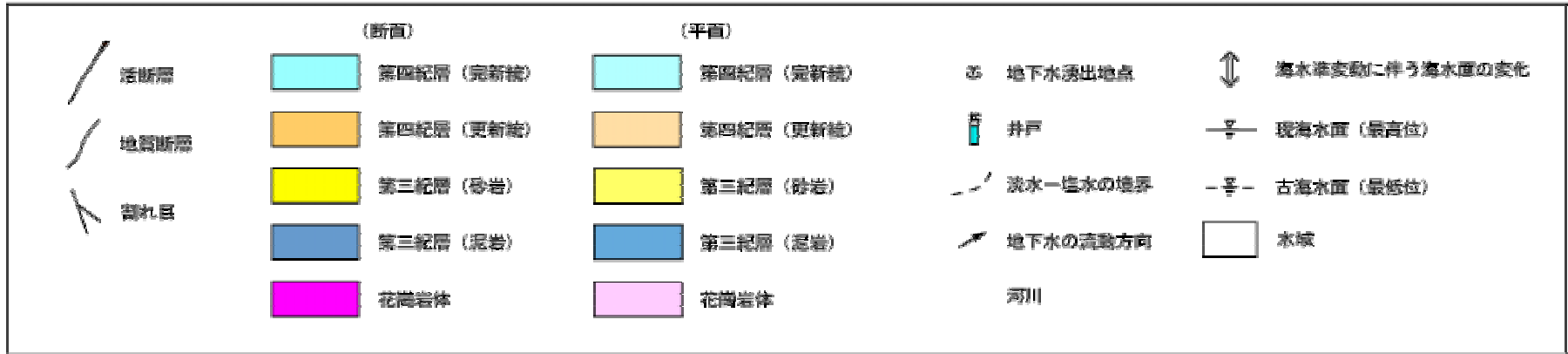
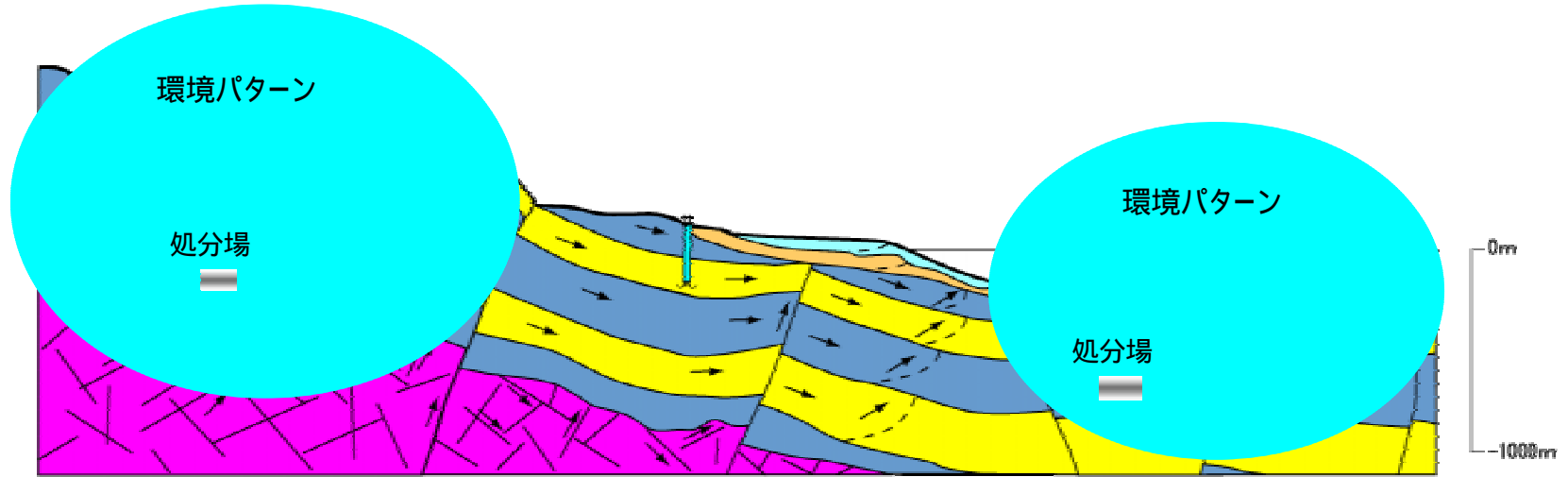


図2.2.2-4 仮想サイト環境モデル (断面図)および環境パターンとして設定した領域

() 環境パターン

環境パターン（図 2.2.2-3）は、設定した花崗岩系サイトの仮想サイト環境モデル（図 2.2.1-1）のうち、丘陵地から沿岸部の間にある大規模な地質断層に挟まれた地下 1000m 付近に処分場が設置されると想定し、その周辺領域を対象地域とした（図 2.2.2-5）。

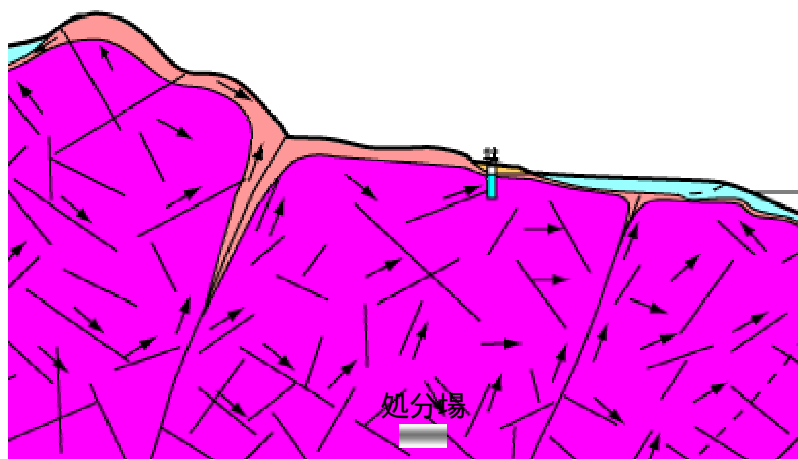


図2.2.2-5 環境パターン の断面図

図 2.2.2-5 より、環境パターン の地形は、海拔数百 m 程度の丘陵地から沿岸部まで緩やかな起伏を有する範囲である。このため地下水の流れは地形の動水勾配に依存すると考えられる。また、地質条件は、深部が透水性の低い亀裂性の花崗岩であることから、大規模亀裂部以外は地下水の流れも非常に遅いと考えられる。一方、表層部については、丘陵部では、地表から 100m 程度までは基盤岩である花崗岩の風化堆積物で覆われており、平野部では風化堆積物と第四紀堆積物により覆われており、いずれの場合も高透水性であり、層状の帯水層が広がる可能性がある。

環境パターン の水文条件としては、丘陵地と平野との縁部付近には、大規模な地質断層があり、断層付近には湖沼が分布している。また、丘陵から沿岸部にかけては河川が広がっており、海洋に繋がる。さらに、表層付近の亀裂から水をくみ上げる浅井戸が掘削される。

わが国の一般的な生活を想定して、環境パターン では、主に湖沼周辺と平野に人口が密集しているとし、湖沼周辺では湖沼水を、平野部では河川水と浅井戸による井戸水を飲用すると仮定する。また、これまでの生物圏研究と同様に、人間活動については、湖沼周辺では淡水漁業と農畜産業、内陸平野部では河川を利用した淡水漁業と農業、沿岸部では河川を利用した淡水漁業と主に稲作を中心とした農業および沿岸漁業が中心であるとする。

() 環境パターン

環境パターン (図 2.2.2-4) は、地形および地質条件に関して環境パターンと区別することを目的として、設定した堆積岩系サイトの仮想サイト環境モデル (図 2.2.2-2) のうち、山地と丘陵に挟まれた堆積性盆地の地下 500m 付近に処分場が設置されると想定し、その周辺領域を対象地域とした (図 2.2.2-6)。環境パターン にみられるような、十分な厚さの処分場の母岩に適した堆積層を含む堆積性盆地は、さまざまな国のサイト選定プログラムで検討されている。これは、処分場が設置される堆積層は低透水性であるため、汚染物質が地表に到達するまで非常に長い期間を要することによる。

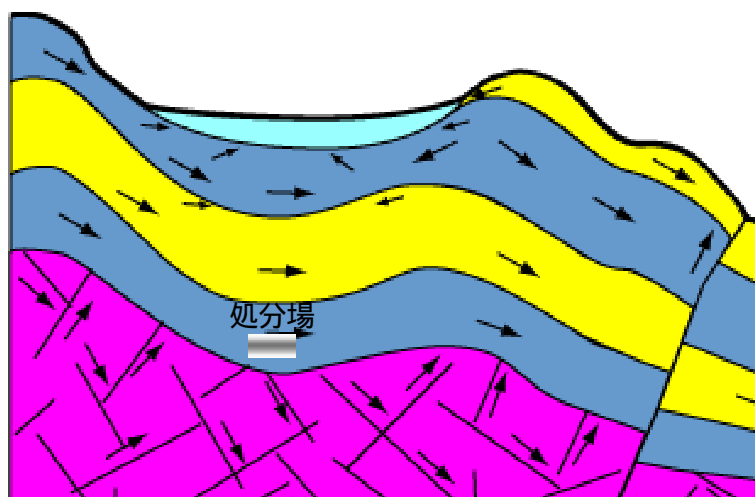


図2.2.2-6 環境パターン の断面図

図 2.2.2-6 より、環境パターン の地質条件は、地下 700 ~ 1000m に環境パターン と同様の花崗岩が分布している。処分場が設置される堆積岩は、基盤岩上部

200m 程度の第三紀の低透水性泥質岩層であり，その上部には同じく第三紀の被圧帯水層となりうる高透水性の砂質岩層およびさらに上部は泥質岩層で構成されている。一方，表層部については，堆積性盆地は，厚さ 100m 程度の未固結の第四紀堆積層が分布しており，帯水層を含む可能性がある。また，山地および丘陵部は第三紀の硬質系の堆積岩が露頭しているとした。さらに，環境パターン では，非常になだらかではあるものの，沿岸部に向かい若干の傾斜がみられることから，地下水は局所的には盆地の中心に向かうものの，多くは丘陵地を越えることが予想されることから，環境パターン と同様に，大規模な亀裂を含めることとした。

環境パターン の水文条件としては周辺の山地からの河川，あるいは丘陵地と平野との縁部付近にある，大規模な地質断層付近に湖沼が分布しているとした。さらに丘陵を越えた平野部には被圧帯水層に掘削された深井戸がある。

環境パターン では，盆地内の特に河川周辺に人口が集中していると仮定し，河川水を飲用とするものとする。また，上記のように地形条件から，丘陵を越える可能性があるため，丘陵辺縁部に広がる湖沼やさらに沿岸部の深井戸も流出域となりうる。なお，人間活動については，河川および湖沼を利用した淡水漁業と農業が中心であるとする。

() 環境パターン

島嶼部が比較的多い，わが国の国土を考慮して，環境パターン では，陸地から数百メートル程度離れた沿岸部にある島嶼地域を想定した（図 2.2.2-7）。

環境パターン の地質条件は，わが国の代表的な地質条件を考慮して堆積岩系であるとし，処分場は，地表から約 500m 付近に広がる第三紀の泥質岩層に設置されると想定した。泥質岩層の上層は第三紀の砂岩および泥岩層からなる。また沿岸域の表層部は第四紀堆積層で 100m 程度の厚さがあるとし，内陸部は泥質の硬質堆積層が露頭しているとした。なお，地下水の移動を生じさせる大規模な亀裂が，島嶼の中心および処分場をへだてた沿岸域に走っているとした。

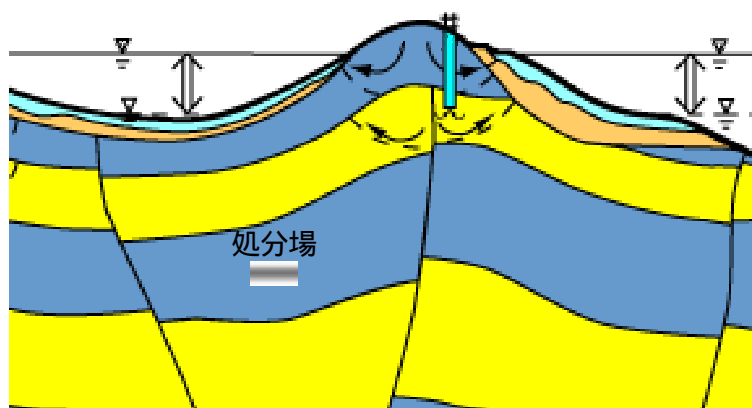


図2.2.2-7 環境パターン の断面図

環境パターン の水文条件としては、周辺の沿岸海域と、処分場が設置される泥質堆積層の上部にある被圧帯水層（砂質層）からの掘削井戸（深井戸）がある。

環境パターン では、主に沿岸部に人口が密集していると仮定する。飲料水は泥質岩層に挟まれた被圧帯水層となりうる砂層からの深井戸水を飲用とするものとする。また、人間活動としては、農業および海洋漁業が中心であるとする。

表2.2.2-2 環境パターンの設定結果 (1 / 2)

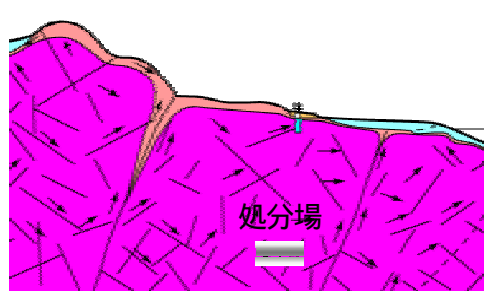
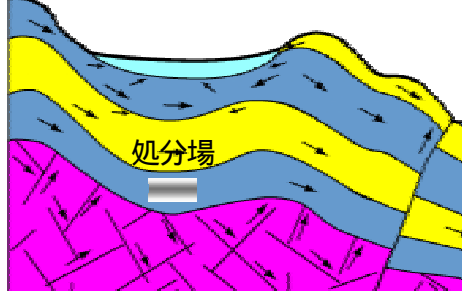
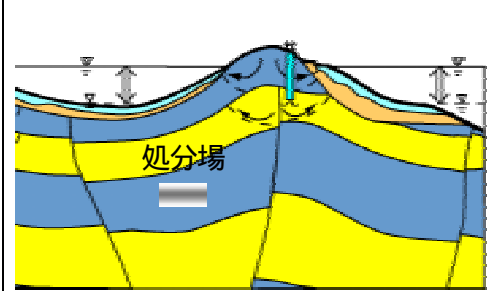
環境パターン		環境パターン	環境パターン	環境パターン
概念図				
G B I 設定 検討におけ るパターン 間の差異	処分場設置 母岩	花崗岩系サイト	堆積岩系サイト	堆積岩系サイト
	地形条件	丘陵地から沿岸部まで緩やかな起伏	山地と丘陵に挟まれた堆積性盆地 / 沿岸部に向かって若干の起伏	島嶼
	水理条件	亀裂中の移流移行	処分場設置泥質岩層は主に拡散移行 / それ以外の堆積層は移流移行	処分場設置泥質岩層は主に拡散移行 / それ以外の堆積層は移流移行 / 塩淡水境界
	生活環境条件	亀裂に直結した浅井戸	盆地内には井戸は設定せず	砂質層からの深井戸
仮想サイト環境モデル		仮想サイト環境モデル (図 2.2.2-1)	仮想サイト環境モデル (図 2.2.2-2)	仮想サイト環境モデル (図 2.2.2-2)
処分場位置・サイト岩種		1000m 付近の花崗岩サイト	500m 付近の低透水性泥質岩サイト	500m 付近の低透水性泥質岩サイト
地形条件		丘陵から沿岸部に至る数百mの起伏を有する地形	山地から丘陵に広がる堆積性盆地。広域的には、なだらかではあるが傾斜がある。	陸地から数百m程度離れた沿岸部にある島嶼。

表2.2.2-2 環境パターンの設定結果 (2 / 2)

環境パターン	環境パターン	環境パターン	環境パターン
地質条件	<ul style="list-style-type: none"> 深部は低透水性の花崗岩であり、地下水の流れは亀裂による。 表層は丘陵部周辺で深部岩盤の風化堆積物、沿岸部は風化堆積物と第四紀堆積物により覆われており層状の帯水層が広がっている可能性がある。 丘陵部に大規模な亀裂が走っている。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分場設置位置より深部は低透水性の花崗岩である。 地下 100m から 500m 程度は、処分場母岩である低透水性の泥質岩と高透水性の砂質岩からなる堆積層 盆地の表層は高透水性の未固結の第四紀堆積層により覆われている。また、山地および丘陵は硬質系の堆積岩が露頭している。 丘陵部に大規模な亀裂が走っている。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下 100m 以深は、処分場母岩である低透水性の泥質岩と高透水性の砂質岩からなる堆積層 沿岸域の表層は高透水性の未固結の第四紀堆積層により覆われている。また、内陸部は硬質系の堆積岩が露頭している。
水文条件	<ul style="list-style-type: none"> 湖沼（亀裂からの湧水を含む） 河川 沿岸海洋 浅井戸 	<ul style="list-style-type: none"> 湖沼（亀裂からの湧水を含む） 河川 深井戸 	<ul style="list-style-type: none"> 沿岸海洋 深井戸
人間活動	<ul style="list-style-type: none"> 多くの人間活動は、丘陵辺縁の湖沼周辺と沿岸の平野とする。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 淡水漁業（湖沼・河川） ➢ 農畜産業（湖沼・平野） ➢ 沿岸漁業（河口・海洋） 水の飲用は湖沼、河川および井戸水とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 多くの人間活動は、盆地および丘陵辺縁の湖沼周辺とする。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 淡水漁業（湖沼・河川） ➢ 農畜産業（湖沼・平野） 水の飲用は湖沼、河川および井戸とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 多くの人間活動は、沿岸部とする。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 沿岸漁業（海洋） ➢ 農畜産業（沿岸） 水の飲用は深井戸とする。

2.3 予備的G B I設定フローによる試行検討

予備的G B I設定フローを図2.3-1に示す。図2.3-1よりG B I設定の手順は下記のとおりであった。

流出域の概要把握

G B I 候補の抽出

被ばくグループ / 被ばく経路の設定

評価モデルの構築 (地表付近の水収支・物質収支を含む)

線量への換算係数の算定

決定グループ / G B I の選定

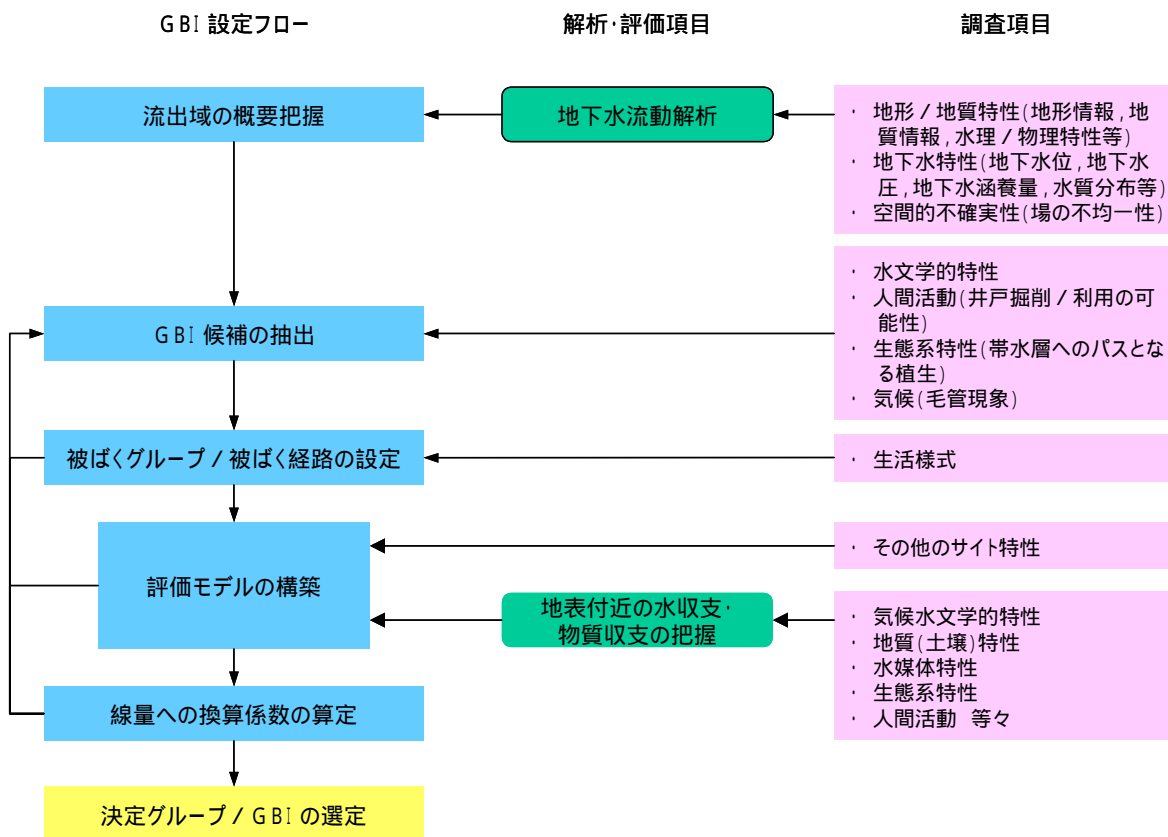


図2.3-1 予備的G B I設定フロー (三木他, 2003)

G B I 設定手法の高度化に資するための問題点や課題を抽出することを目的として、三木他（2003）の予備的G B I 設定フローの内容を整理するとともに、前節までの調査検討内容にもとづき、試行検討を行った。表 2.3.1-1 に各環境パターンに関し、予備的G B I 設定フローの内容ごとに下記内容をまとめた。

想定される行為

調査内容

生物圏評価に資する入手可能情報

問題点・課題

なお、上記 ～ に関しては、昨年度の検討（三木他，2003）や調査事例を参考にG B I 設定（すなわち生物圏評価）に必要な手法・情報を網羅的に示したものであり、すべてをG B I 設定のためだけに調査を実施したり、解析を行ったりするものではない。実際には、サイト適性把握のための調査や環境影響調査項目などが多く含まれており、それらを適宜利用することで十分対応可能であると考えられる。

2.3.1 流出域の概要把握

予備的G B I 設定フローでは、地下水流動解析およびパーティクルトラッキングにより、地下深部での地下水流動・物質移行の概略の把握が行われるとされている。また、地下水流動解析には、地形・地質条件、地下水特性および場の不均質性についての調査結果が利用されるとしている。評価の前提条件にもよるが、より現実的な評価を実施するためには、より確からしい流出域を把握することが必要であるとされている（三木他，2003）。

海外調査結果から、例えば、米国のようにさまざまなスケールにより、大まかな地下水の流れは把握されるものの、地下水と生物圏とのリンクは井戸による汲み上げによるものとされ、自然流出に関しては取り上げられていない。また、スウェーデンの性能評価では、地下 20m 程度までの亀裂製岩盤内の核種移行経路の把握は、調査結果にもとづく解析により実施されてはいるが、その後の表層水理環境（未固結の第四紀堆積層）から地表への移行および流出域は特定されない（ただし、近年、この不整合性を克服し、より現実的な評価を行うことを目的として、地下水移行経路結果と地

表の流出域との間の表層環境中の移行パスを考慮した解析検討が実施されてきている)。一方、堆積岩系の例では、スイスのように地質、水文および水理結果などより表層水理環境（第四紀砂礫層）を含めた地下水移行メカニズムを推定し、可能性のある自然流出域を把握している場合もある。なお、いずれの国の場合でも、井戸からの地下水の汲み上げは地下と生物圏との保守的なリンクであり流出域として含まれている。なお、表 2.3.1-1 に示すとおり、流出域の概要把握では、環境パターンにかかわらず、利用すべき情報は同様であると考えられた。以下では、これらの情報にもとづき各環境パターンについて具体的な試行検討結果を示した。

(1) 環境パターン

環境パターン では、地形条件や水理地質調査にもとづき、別途実施されると考えられる、深部の地下水移行解析結果やパーティクルトラッキングによる解析結果や沿岸部の塩淡境界域の把握結果を利用して概略の地下水理の把握を行うことが可能であると考えられる。下記に想定される移行パスを示す。

主に平野部の亀裂を經由して風化物層および未固結の第四紀堆積層へ移行
 亀裂の方向性によって丘陵側の亀裂を經由し風化物層へ移行
 亀裂の方向性によって処分場直上の浅井戸へ移行
 亀裂の方向性によって塩淡境界より沿岸部へ移行。一部は風化物層へ移行

しかしながら、予備的 G B I 設定フローに示した地下水流動解析では、そもそも解析モデル開発の段階でのスケールの違いから、上記の厚さ 100m 程度と設定した表層水理環境である風化物層や第四紀堆積層内での地下水移行の詳細な把握までは含まれないと考えられる（図 2.3.1-1 参照）。すなわち、一般の水理地質構造モデルを構築する場合であれば、その対象エリアは数 10km ~ 数 km、対象深度は数 1000m であり、さらに解析の主眼は、いわゆる岩盤といわれる部分、すなわち新第三紀以前の地層や岩石になるため、地表付近の風化層や第四紀層（特に薄い場合）などは詳細に区分されることはなく、正確な地下水流出域の把握は困難であると考えられる。予備的 G B I 設定フローの考え方は、スウェーデンの性能評価事例(SR-97)と同様であり、生物圏評価の視点からは、近年 SSI が検討を行っているような第四紀未固結堆積層中の地下水挙動把握のための検討が課題としてあげられる。

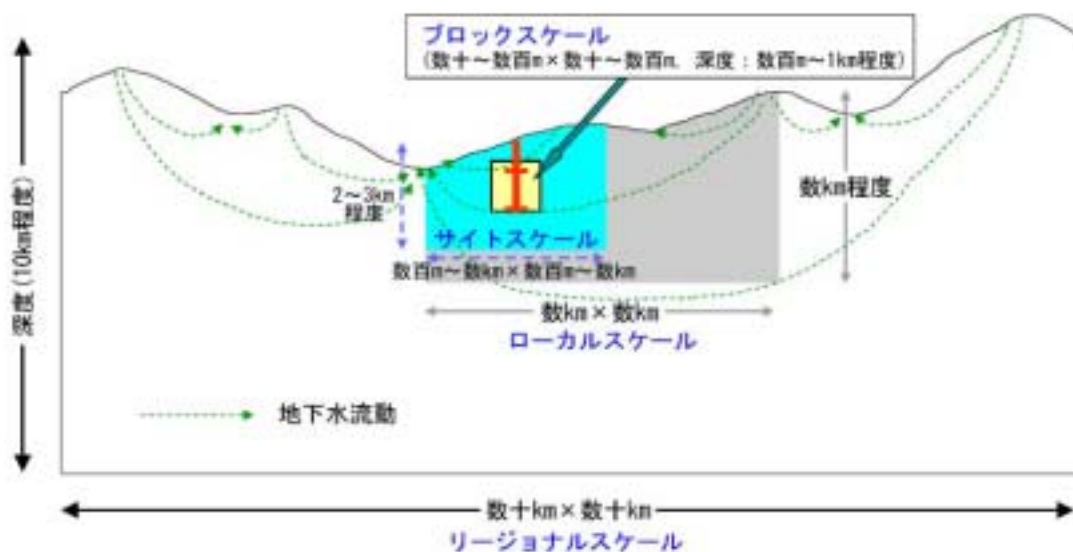


図2.3.1-1 スケールの概念例（核燃料サイクル開発機構, 2003）

(2) 環境パターン

環境パターン のような堆積性岩盤について、同様のスイスの事例では、長期間のサイト調査によって、地下水は低透水性の処分場母岩より上下の高透水性の帯水層へ移行した後、数～数十 km 離れたライン川の第四紀礫層に流入するとしている。このように地質学的な調査や解析により、堆積層の特性を把握し、単純化することで、地下水移行パスの把握は可能であると考えられる（図 2.3.1-2）。

環境パターン の場合、その核種移行パスは、環境パターン と同様の手法により把握されると考えられる。下記に想定される移行パスを示す。

地形の傾斜により、主に丘陵地の亀裂を經由して辺縁部周辺に移行。なお、亀裂にいたる移行パスは下記の可能性があげられる。

- ・ 処分場設置泥質岩層を拡散し亀裂へ移行
- ・ 処分場設置泥質岩層から上部へ拡散し砂質層より亀裂へ移行
- ・ 処分場設置泥質岩層から下部へ拡散し花崗岩体より亀裂へ移行

丘陵地の亀裂を越えて透水性の高い砂質層内を移行し、塩淡水境界より沿岸部へ移行。一部は第四紀堆積層へ移行

ごく一部ではあるが、処分場直上に向かい盆地の第四紀堆積層へ移行

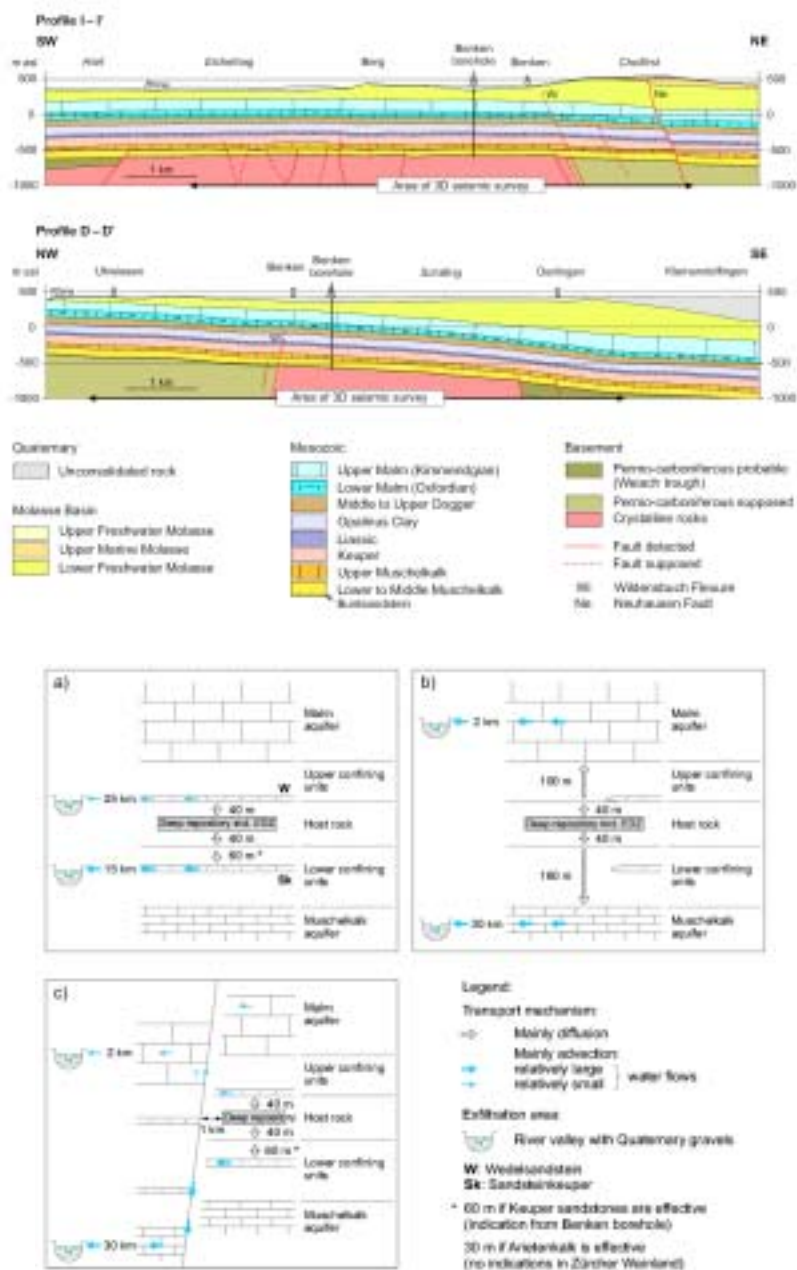


図2.3.1-2 オパリナス粘土からの地下水移行経路の可能性 (Nagra, 2003)

生物圏評価の視点からは、環境パターン の場合と同様、例えば の堆積性盆地を構成する第四紀堆積層における水理特性（例えば帯水層）などは、生物圏評価の視点から重要な事項であるが、一般の水理解析では把握されない可能性もあることから、課題点として挙げられる。

さらに、処分場設置泥質岩を下方に拡散し、地下深部の花崗岩体を通じて山地の反

対側に移行する可能性も想定される。しかしながら、例えば Chapman (1986) による、環境パターン に類似した盆状地形における地下水フラックスについての検討では、その可能性が否定されている。すなわち、深部の結晶質岩系基盤は、地下水の流れが遅く、気候変動による涵養量の影響は受け難いとされ、むしろ山地を含む地形による影響（起伏が高いことにより局所的な移行経路が形成される可能性）が顕著であると考えられている。このような事例を参考にすれば、環境パターン のような地形の場合、流出域調査が広範囲をカバーする必要性は高くなく、むしろ調査の主眼は、上部堆積物の分布・組成に注目すべきであるとしている。以上のことから、環境条件により多少の差異はあるものの、上記想定の可能性は低いと考えている。

(3) 環境パターン

環境パターン の場合、前述のパターン と同様に地質調査などによる堆積層の把握に加えて塩淡境界に関する情報を入手し、これらを利用した地下水流動解析が実施されると想定される。移行パスとしては、環境パターン と同様、下記を想定した。

大規模な亀裂を經由して海洋底部の第四紀堆積層に移行。なお、亀裂にいたる移行パスは下記の可能性があげられる。

- ・ 処分場設置泥質岩層を拡散し亀裂へ移行
- ・ 処分場設置泥質岩層から上下部へ拡散し砂質層より亀裂へ移行

塩淡境界に沿って海洋底部の第四紀堆積層に移行

ごく一部であるが、塩淡境界を越え、深井戸の掘削された被圧帯水層（砂質層）へ移行

このうち、生物圏評価の視点から留意すべき内容としては、塩淡境界によっては流出した核種が透水性の高い堆積層中を移行する可能性があげられる。また、将来の気候変動により海水準の変動による海域の陸化が生じた場合、塩淡境界が変化するため核種の流出域は変化する可能性もあり、これらに関しては今後の検討が必要となると考えられる。

2.3.2 GBI 候補の抽出

把握された流出域から、GBI 候補を抽出する。予備的 GBI 設定フローでは、G

B I 候補となる表層水（河川，湖沼あるいは海洋など）やその堆積層，井戸，土壤などの不確実性により，G B I の可能性があるものについては，網羅的に抽出すること，ただし，より現実的な評価を実施するためには，最も確からしいG B I が何であるかを明確にしておく必要があるとされている。なお，G B I 候補の抽出に利用される調査項目としては，水文学的特性，井戸にかかわる人間活動の内容，水収支にかかわる植生に関する特性や毛管現象にかかわる気候条件があげられる（三木他，2003）。

表 2.3.1-1 に示すとおり，G B I 候補の抽出では，すべての環境パターンについてG B I 候補としては，天然の水域（河川，湖沼など）と人工的に掘削された井戸があげられる。なお，環境パターンにかかわらず，利用すべき情報は同様であると考えられる。以下では，これらの情報にもとづき各環境パターンについて具体的な試行検討結果を示した。

（１）環境パターン

環境パターン のG B I 候補としては下記が抽出される。

湖沼およびその堆積層

浅井戸

表面土壌（平野部）

河川およびその堆積層

沿岸海洋およびその堆積層

処分場母岩である結晶質岩の亀裂や地下水流動の把握，あるいは地形条件等に関する環境調査によって，地下水の卓越流路である大規模亀裂に連結する「湖沼（およびその堆積層）」が，有力なG B I 候補として抽出されると考えられる。さらに，岩盤亀裂より直接取水すると仮定した「浅井戸」は，被ばく評価上重要であり，G B I 候補として含めることが望ましいと考えられる。

一方，その他のG B I 候補は，亀裂に直結しておらず，亀裂を經由した地下水が未固結の第四紀層あるいは風化層内を移行し，その後に流出する可能性を有する媒体である。本試行検討では，スウェーデン SKB の生物圏評価（SR-97）のように，水理

解析結果と地表環境の観察結果を利用して、可能性のあるG B I候補を抽出した。しかしながら、この場合、可能性の程度に関わらず網羅的な抽出は可能であるが、表層環境中での移行パスは考慮されないため、詳細かつ確度の高いG B Iの抽出は困難となる。対して、英国の事例のように、大まかな地下水流動方向に加えて表層環境の特性を把握することにより、確度の高いG B I候補を絞り込むことが可能となると考えられる。

(2) 環境パターン

環境パターン のG B I候補としては下記が抽出される。

湖沼およびその堆積層

深井戸

表面土壌(平野部)

河川およびその堆積層(平野部)

沿岸海洋およびその堆積層

盆地内の媒体(液相・固相)

環境パターン についても、環境パターン と同様に、流出域の概要把握や環境調査結果から、大規模亀裂に連結している「湖沼およびその堆積層」が有力なG B Iとなると考えられる。一方、環境パターン は、環境パターン と異なり、岩盤亀裂が泥質岩層と砂質層からなる堆積岩層を通過していることから、亀裂から透水性の高い砂質層への移行も想定される。さらに丘陵地から平野にかけて、透水性の低い泥質岩層に挟まれた被圧帯水層(砂質層)に深井戸が掘削されており、環境パターン と同様の理由から重要なG B I候補となる可能性がある。なお、スイスの事例のように、この被圧帯水層(砂質層)にどの程度地下水が流れているのか、地下水流動解析結果などを利用して把握することが可能であれば、G B I候補についてより確度の高い選定が可能となる。また、一部の核種は、処分場設置泥質岩層を拡散移行し、盆地内の媒体がG B I候補となる可能性も想定されるが、盆地内のどこに流出するかを決定するには、表層環境の詳細な把握が必要となる。この場合には、環境パターン と同様、通常、流動解析では評価スケールの違いから、この領域について詳細には把握されない可能性もあるため、この点が、確度が高いG B I候補の選定を行う際には課題とな

りうる。

(3) 環境パターン

環境パターン の G B I 候補としては下記が抽出される。

沿岸海洋およびその堆積層

深井戸

上記のように、環境パターン は、流出域の概要把握や塩淡境界、あるいは環境調査結果から、G B I 候補としては、沿岸海洋および深井戸が選定されると考えられる。ただし、前項の「流出域の概要把握」で示したとおり、塩淡境界によっては沿岸地域に流出した核種が透水性の高い第四紀層に分類される海洋堆積層中を移行する可能性があり、より詳細な G B I 候補（海洋堆積層中のどこに流出するか？）の選定を行うには、この特性を把握することが重要となる。また、将来の気候変動による海域の陸化によって、塩淡境界の移動により、陸域が G B I 候補となる可能性も想定されることから、これらの地質環境特性も有用な情報となりうる。

2.3.3 被ばくグループ/被ばく経路の設定

予備的 G B I 設定フローでは、被ばくグループ（決定グループの候補）および被ばく経路の設定は、前項で抽出された G B I に対して、より保守的な評価を実施する場合の生活様式を考慮した適切な被ばくグループおよび被ばく経路を設定することとされている（三木他，2003）。

予備的 G B I 設定フローにしたがえば、前項のように G B I を網羅的に抽出しているために、本件の環境パターンの場合、被ばくグループや被ばく経路に大きな差異はなく、ほとんどすべての可能性が該当すると考えられる。ただし、予備的 G B I 設定フローでは、表層水理環境について明確な設定が示されていないために、当該環境中の核種移行や蓄積に関する被ばく経路を特定することは困難となっている。

スウェーデンの SSI による検討事例では、表層環境中での地下水移行を検討した結果、これまでの保守性を勘案した評価と比べて、被ばくグループや被ばく経路に影

響が見られる結果が得られている。この結果からも、表層環境特性の詳細な把握を行うことで、より現実的な被ばく影響も見積もることが可能となる。

2.3.4 評価モデルの構築（地表付近の水収支・物質収支の把握）

予備的G B I設定フローでは、レファレンスバイオスフィア手法を適用し、前項にて設定した被ばくグループ/被ばく経路に対する評価モデルを構築するとされている。ここではモデル構築の際に必要な種々のサイト特性が利用されるとともに、核種移行にかかわる水収支や物質収支の把握が必要であるとされている。水収支や物質収支の把握について、対象地域の水循環を把握するためには、同地域を対象とした地形・地質および水文学的調査を実施し、関連データを取得する必要がある。ただし、水文学的なデータには、季節変動、年変動があるため、数年間にわたる継続的な調査が望まれる。さらに、気候の変動などによる長期的な水循環の変動を考慮すると、得られた結果に対しては、ある程度の変動幅を配慮した評価が必要であるとされている（三木他，2003）。

本項では、前項で設定された被ばくグループ/被ばく経路に対する評価モデルが構築される。2.3.3項同様、予備的G B I設定フローは、表層水理環境については触れられていないため、この環境を考慮したモデル構築検討を実施することにより、より詳細で確度の高いG B I設定が可能となると考えられる。なお、モデル構築に際しては、スウェーデン SSI による検討事例は参考となると考えられる。また、予備的G B I設定フローでは、ここで、気候の変動などによる長期的な水循環の変動が考慮される。

2.3.5 線量への換算係数の算定

予備的G B I設定フローでは、前項までの検討によって、被ばくグループに対する線量への換算係数を算出するとされている（三木他，2003）。

2.3.6 決定グループ/G B Iの選定

予備的G B I設定フローでは、線量換算係数の算定結果をもとに決定グループおよび対応するG B Iを設定するとされている（三木他，2003）。

表2.3.1-1 想定環境パターンごとのG B I設定の考え方 (1 / 5)

環境パターン	環境パターン1	環境パターン2	環境パターン3
処分場設置岩種/深度	結晶質岩/1000m	堆積岩/500m	堆積岩/500m
地形条件	内陸部～沿岸部, 河川あり	内陸部, 集水域あり	島嶼部
地理条件	山間部～低地部で比較的起伏あり	盆地(低地)で起伏が小さい	島中央部～沿岸部まで起伏あり
表層地質条件	結晶質岩風化層/河川流域に第四紀層	第四紀層(複数の層相)	堆積岩/沿岸部に第四紀層
予備的G B I設定フローの内容			
深部での地下水流動・物質移行の概略の把握			
想定される行為	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 現地調査 調査データにもとづく水理解析(さまざまなスケール) 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 現地調査 調査データにもとづく水理解析(さまざまなスケール) 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 現地調査 調査データにもとづく水理解析(さまざまなスケール)
想定される調査内容	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 地質調査(地史, リニアメント, 地形図, 地表地質, 岩芯観察, 室内試験) 試錐掘削調査(掘削水モニタリング) 地球物理調査(弾性波探査, 電気探査, VSP 探査, ボアホールレーダ, BTV, 物理検層, トモグラフィ) 水理学的調査(水文調査, 気象観測, 流体検層, 単孔式水理試験, 孔間水理試験, 長期揚水試験) 地下水化学調査(降水/地表水の採水, 地下水の採水・分析) 室内岩石試験 長期モニタリング(地下水位, 地下水圧, 水収支バランス, 地下水地球化学) 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 地質調査(地史, リニアメント, 地形図, 地表地質, 岩芯観察, 室内試験) 試錐掘削調査(掘削水モニタリング) 地球物理調査(弾性波探査, 電気探査, VSP 探査, ボアホールレーダ, BTV, 物理検層, トモグラフィ) 水理学的調査(水文調査, 気象観測, 流体検層, 単孔式水理試験, 孔間水理試験, 長期揚水試験) 地下水化学調査(降水/地表水の採水, 地下水の採水・分析) 室内岩石試験 長期モニタリング(地下水位, 地下水圧, 水収支バランス, 地下水地球化学) 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 地質調査(地史, リニアメント, 地形図, 地表地質, 岩芯観察, 室内試験) 試錐掘削調査(掘削水モニタリング) 地球物理調査(弾性波探査, 電気探査, VSP 探査, ボアホールレーダ, BTV, 物理検層, トモグラフィ) 水理学的調査(水文調査, 気象観測, 流体検層, 単孔式水理試験, 孔間水理試験, 長期揚水試験) 地下水化学調査(降水/地表水の採水, 地下水の採水・分析) 室内岩石試験 長期モニタリング(地下水位, 地下水圧, 水収支バランス, 地下水地球化学)
想定される行為による生物圏評価に資する入手可能情報	<ul style="list-style-type: none"> 地下水の概念モデル 高透水性部の幾何学/鉱物学的特性 地下水流量 地下水の移行経路 移行経路長 地下水の流入/流出域 移行経路における流速 移行時間 透水量係数 動水勾配 深部高透水性部の収着/拡散特性 地下水の地球化学特性 塩淡水境界に関する情報 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水の概念モデル 高透水性部の幾何学/鉱物学的特性 地下水流量 地下水の移行経路 移行経路長 地下水の流入/流出域 移行経路における流速 移行時間 透水量係数 動水勾配 深部高透水性部の収着/拡散特性 地下水の地球化学特性 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水の概念モデル 高透水性部の幾何学/鉱物学的特性 地下水流量 地下水の移行経路 移行経路長 地下水の流入/流出域 移行経路における流速 移行時間 透水量係数 動水勾配 深部高透水性部の収着/拡散特性 地下水の地球化学特性 塩淡水境界に関する情報

表 2.3.1-1 想定環境パターンごとのG B I設定の考え方(2/5)

環境パターン	環境パターン1	環境パターン2	環境パターン3
処分場設置岩種/深度	結晶質岩/1000m	堆積岩/500m	堆積岩/500m
地形条件	内陸部～沿岸部, 河川あり	内陸部, 集水域あり	島嶼部
地理条件	山間部～低地部で比較的起伏あり	盆地(低地)で起伏が小さい	島中央部～沿岸部まで起伏あり
表層地質条件	結晶質岩風化層/河川流域に第四紀層	第四紀層(複数の層相)	堆積岩/沿岸域に第四紀層
予備的G B I設定フローの内容			
深部での地下水流動・物質移行の概略の把握			
試行検討結果	<ul style="list-style-type: none"> 別途実施される地下水流動解析やパーティクルトラッキングによる地下水流出の概要把握結果を利用することが可能 想定された移行パスは下記の通り。結晶質岩の場合、亀裂に関する情報が重要となる ① 主に平野部の亀裂を経由して風化物層および未固結の第四紀堆積層へ移行 ② 亀裂の方向性によって丘陵側の亀裂を経由し風化物層へ移行 ③ 亀裂の方向性によって処分場直上の浅井戸へ移行 ④ 亀裂の方向性によって塩淡水境界より沿岸部へ移行。一部は風化物層へ移行 	<ul style="list-style-type: none"> 別途実施される地下水流動解析やパーティクルトラッキングによる地下水流出の概要把握結果を利用することが可能 想定された移行パスは下記の通り。堆積岩の場合、各層の特性に関する情報が重要となる。 ① 地形の傾斜により、主に丘陵地の亀裂を経由して辺縁部周辺に移行。なお、亀裂のいたる移行パスは下記の可能性があげられる。 <ul style="list-style-type: none"> 処分場設置泥質岩層を拡散し亀裂へ移行 処分場設置泥質岩層から上部へ拡散し砂質層より亀裂へ移行 処分場設置泥質岩層から下部へ拡散し花崗岩体より亀裂へ移行 ② 丘陵地の亀裂を越えて透水性の高い砂質層内を移行し、塩淡水境界より沿岸部へ移行。一部は第四紀堆積層へ移行 ③ ごく一部ではあるが、処分場直上に向かい盆地の第四紀堆積層へ移行 	<ul style="list-style-type: none"> 別途実施される地下水流動解析やパーティクルトラッキングあるいは塩淡水境界の把握結果による地下水流出の概要把握結果を利用することが可能 想定された移行パスは下記の通り。堆積岩の場合、各層の特性に関する情報が重要となる。また島嶼部であるため塩淡水境界についての情報も有用となる。 ① 大規模な亀裂を経由して海洋底部の第四紀堆積層に移行。なお、亀裂のいたる移行パスは下記の可能性があげられる。 <ul style="list-style-type: none"> 処分場設置泥質岩層を拡散し亀裂へ移行 処分場設置泥質岩層から上下部へ拡散し砂質層より亀裂へ移行 ② 塩淡水境界に沿って海洋底部の第四紀堆積層に移行 ③ ごく一部ではあるが、塩淡水境界を越え、深井戸の掘削された被圧帯水層(砂質層)へ移行
問題点・課題	<ul style="list-style-type: none"> 通常の水理解析のスケールでは、表層の水理について生物圏評価で利用することが可能な詳細度では解析が実施されない可能性があり、今後把握のための検討が必要となる。 表層環境の特性把握が可能であれば、より詳細な移行パスの把握が可能となる 	<ul style="list-style-type: none"> 堆積層の状況による(例えば卓越流路となる堆積層中の地下水移行経路が十分把握されていない場合など)が、表層水理特性は有用な情報となる。 通常の水理解析のスケールでは、表層の水理について生物圏評価で利用することが可能な詳細度では解析が実施されない可能性がある。 表層環境の特性把握が可能であれば、より詳細な移行パスの把握が可能となる 	<ul style="list-style-type: none"> 沿岸部の表層環境特性についての情報は有用である。 海域の地質について把握すれば、将来の陸化による影響(移行パスの変化)について対応が可能となる。 通常の水理解析のスケールでは、表層水理について生物圏評価で利用することが可能な詳細度では解析が実施されない可能性がある。 表層環境の特性把握が可能であれば、より詳細な移行パスの把握が可能となる

表2.3.1-1 想定環境パターンごとのG B I設定の考え方 (3 / 5)

環境パターン	環境パターン1	環境パターン2	環境パターン3
処分場設置岩種/深度	結晶質岩/1000m	堆積岩/500m	堆積岩/500m
地形条件	内陸部～沿岸部, 河川あり	内陸部, 集水域あり	島嶼部
地理条件	山間部～低地部で比較的起伏あり	盆地(低地)で起伏は少ない	島中央部～沿岸部まで起伏あり
表層地質条件	結晶質岩風化層/河川流域に第四紀層	第四紀層(複数の層相)	堆積岩/沿岸部に第四紀層
予備的G B I設定フローの内容			
G B I候補の抽出			
想定される行為	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 現地調査(集水域/井戸) 調査データにもとづく表層水理解析 保守的なG B I候補の抽出 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 現地調査(集水域/井戸) 調査データにもとづく表層水理解析 保守的なG B I候補の抽出 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 現地調査(集水域/井戸) 調査データにもとづく表層水理解析 保守的なG B I候補の抽出
想定される調査内容	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 表層地質調査 表層試験掘削調査 表層地球物理調査 水理的調査(表層水理調査, 気象観測, 流体検層, 単孔式水理試験, 孔間水理試験, 長期揚水試験) 地下水化学調査(降水/地表水の採水, 地下水の採水・分析) 岩盤力学調査(原位置試験, 室内試験) 長期モニタリング(地下水位, 地下水圧, 水収支バランス, 地下水地球化学) 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 表層地質調査 表層試験掘削調査 表層地球物理調査 水理的調査(表層水理調査, 気象観測, 流体検層, 単孔式水理試験, 孔間水理試験, 長期揚水試験) 地下水化学調査(降水/地表水の採水, 地下水の採水・分析) 岩盤力学調査(原位置試験, 室内試験) 長期モニタリング(地下水位, 地下水圧, 水収支バランス, 地下水地球化学) 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 表層地質調査 表層試験掘削調査 表層地球物理調査 水理的調査(表層水理調査, 気象観測, 流体検層, 単孔式水理試験, 孔間水理試験, 長期揚水試験) 地下水化学調査(降水/地表水の採水, 地下水の採水・分析) 岩盤力学調査(原位置試験, 室内試験) 長期モニタリング(地下水位, 地下水圧, 水収支バランス, 地下水地球化学) 塩淡水境界に関する情報
試行検討結果	<ul style="list-style-type: none"> 抽出されたG B I候補 ① 湖沼およびその堆積層 ② 浅井戸 ③ 表面土壌(平野部) ④ 河川およびその堆積層 ④ 沿岸海洋およびその堆積層 試行検討に係る考察 別途実施される水理解析や環境調査結果を利用して, ある程度のG B I候補の抽出は可能 	<ul style="list-style-type: none"> 抽出されたG B I候補 ① 湖沼およびその堆積層 ② 深井戸 ③ 表面土壌(平野部) ④ 河川およびその堆積層 ⑤ 沿岸海洋およびその堆積層 ⑥ 盆地内の媒体(液相/固相) 試行検討に係る考察 別途実施される水理解析や環境調査結果を利用して, ある程度のG B I候補の抽出は可能 	<ul style="list-style-type: none"> 抽出されたG B I候補 ① 沿岸海洋およびその堆積層 ② 深井戸 試行検討に係る考察 別途実施される水理解析や塩淡水境界の把握あるいは環境調査結果を利用して, ある程度のG B I候補の抽出は可能
問題点・課題	<ul style="list-style-type: none"> 表層環境中の移行を考慮したより具体的なG B I候補は抽出することは困難 表層風化層の地質特性(例えば水理や風化の状態など)を把握することが可能であれば, 確度の高いG B I候補の抽出が可能となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 盆地内では, G B I候補は抽出することは困難。その他のG B I候補についても表層環境中の移行を考慮した詳細な抽出は困難 表層風化層の地質特性(例えば水理や風化の状態など)を把握することが可能であれば, 確度の高いG B I候補の抽出が可能となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 表層環境中の移行を考慮したより具体的なG B I候補は抽出することは困難 現在の条件による設定であるため, 将来の状況を考慮したG B I候補の抽出は困難 表層風化層の地質特性(例えば水理や風化の状態など)を把握することが可能であれば, 確度の高いG B I候補の抽出が可能となる。 将来の淡水化に関する検討は, 気候変動により海水準が変化した場合のG B I候補の選定に有益な情報となる。

表2.3.1-1 想定環境パターンごとのG B I設定の考え方(4/5)

環境パターン	環境パターン1	環境パターン2	環境パターン3
処分場設置岩種/深度	結晶質岩/1000m	堆積岩/500m	堆積岩/500m
地形条件	内陸部～沿岸部, 河川あり	内陸部, 集水域あり	島嶼部
地理条件	山間部～低地部で比較的起伏あり	盆地(低地)で起伏が小さい	島中央部～沿岸部まで起伏あり
表層地質条件	結晶質岩風化層/河川流域に第四紀層	第四紀層(複数の層相)	堆積岩/沿岸域に第四紀層
予備的G B I設定フローの内容			
被ばくグループおよび被ばく経路の設定			
想定される行為	・各GBIに対し適切な被ばくグループ/被ばく経路の設定	・各GBIに対し適切な被ばくグループ/被ばく経路の設定	・各GBIに対し適切な被ばくグループ/被ばく経路の設定
想定される調査内容	・生活様式	・生活様式	・生活様式
試行検討結果	<ul style="list-style-type: none"> 抽出されたGBIに関する被ばくグループを保守的に設定 <ul style="list-style-type: none"> 農業 淡水漁業 海洋漁業 被ばく経路に関しても保守的な設定を行うが, 表層中の移行に関連した経路は設定することが困難(スウェーデン SSI の事例) 	<ul style="list-style-type: none"> 抽出されたGBIに関する被ばくグループを保守的に設定 <ul style="list-style-type: none"> 農業 淡水漁業 海洋漁業 被ばく経路に関しても保守的な設定を行うが, 表層中の移行に関連した経路は設定することが困難(スウェーデン SSI の事例) 	<ul style="list-style-type: none"> 抽出されたGBIに関する被ばくグループを保守的に設定 <ul style="list-style-type: none"> 農業 海洋漁業 被ばく経路に関しても保守的な設定を行うが, 表層中の移行に関連した経路は設定することが困難(スウェーデン SSI の事例)
問題点・課題	・表層環境を考慮することで, 表層風化層および第四紀層内での地下水移行に関連した被ばく経路についての検討が加わる。	・第四紀層内での地下水移行の複雑さより, 保守性を勘案した被ばく経路の設定が加わる。	・表層環境を考慮することで, 第四紀層内での地下水移行に関連した被ばく経路についての検討が加わる。
地表付近の水収支・物質収支			
想定される行為	<ul style="list-style-type: none"> 評価モデルの構築にあたり, 地表環境中の特性の把握を行う 地表付近の核種移行にかかわる水収支や生態系などの把握 	<ul style="list-style-type: none"> 評価モデルの構築にあたり, 地表環境中の特性の把握を行う 地表付近の核種移行にかかわる水収支や生態系などの把握 	<ul style="list-style-type: none"> 評価モデルの構築にあたり, 地表環境中の特性の把握を行う 地表付近の核種移行にかかわる水収支や生態系などの把握
想定される調査内容	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 表層地質調査 水文学的調査(表流水調査, 気象観測, 土壌水分調査, 浸透量調査, 蒸発散量調査, 水質分析) 水利用実態調査 土地利用状況調査 生態系調査 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 表層地質調査 水文学的調査(表流水調査, 気象観測, 土壌水分調査, 浸透量調査, 蒸発散量調査, 水質分析) 水利用実態調査 土地利用状況調査 生態系調査 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査 表層地質調査 水文学的調査(表流水調査, 気象観測, 土壌水分調査, 浸透量調査, 蒸発散量調査, 水質分析) 水利用実態調査 土地利用状況調査 生態系調査
問題点・課題	<ul style="list-style-type: none"> 表層環境中での水収支の評価の実施 気候変動による影響把握 <ul style="list-style-type: none"> 降水量や気温変化による, 表層環境の水収支変化や, 地下水質の変化 植生の変化により食物連鎖に変化が生じ, 核種移行プロセスや被ばくグループについても別途考慮 海水準が変動した場合, 塩淡境界が移動するため, GBIへの核種の移行量に変化が生じる可能性 海水準の変動による侵食ポテンシャルの増加により, 処分場と生物圏との距離が接近し, 核種移行距離の短縮により生物圏への核種移行量が多くなる可能性 	<ul style="list-style-type: none"> 表層環境中での水収支の評価の実施 気候変動による影響把握 <ul style="list-style-type: none"> 降水量や気温変化による, 表層環境の水収支変化や, 地下水質の変化, 被ばくグループの分布状況の変化 植生の変化により食物連鎖に変化が生じ, 核種移行プロセスや被ばくグループについても別途考慮 海水準が変動した場合, 塩淡境界が移動するため, 帯水層からGBIへの核種の移行量に変化が生じる可能性 海水準の変動による侵食ポテンシャルの増加により, 処分場と生物圏との距離が接近し, 核種移行距離の短縮により生物圏への核種移行量が多くなる可能性 	<ul style="list-style-type: none"> 表層環境中での水収支の評価の実施 気候変動による影響把握 <ul style="list-style-type: none"> 降水量や気温変化による, 表層環境の水収支変化や, 地下水質の変化, 帯水層の分布状況の変化 植生の変化により食物連鎖に変化が生じ, 核種移行プロセスや被ばくグループについても別途考慮 海水準が変動した場合, 塩淡境界が移動するため, 帯水層からGBIへの核種の移行量に変化が生じる可能性 海水準の変動による侵食ポテンシャルの増加により, 処分場と生物圏との距離が接近し, 核種移行距離の短縮により生物圏への核種移行量が多くなる可能性

表2.3.1-1 想定環境パターンごとのG B I設定の考え方 (5 / 5)

環境パターン	環境パターン1	環境パターン2	環境パターン3
処分場設置岩種/深度	結晶質岩/1000m	堆積岩/500m	堆積岩/500m
地形条件	内陸部～沿岸部, 河川あり	内陸部, 集水域あり	島嶼部
地理条件	山間部～低地部で比較的起伏あり	盆地(低地)で起伏は少ない	島中央部～沿岸部まで起伏あり
表層地質条件	結晶質岩風化層/河川流域に第四紀層	第四紀層(複数の層相)	堆積岩/沿岸域に第四紀層
予備的G B I設定フローの内容			
評価モデルの構築			
想定される行為	・レファレンスバイオスフィア手法を適用した評価モデルの構築	・レファレンスバイオスフィア手法を適用した評価モデルの構築	・レファレンスバイオスフィア手法を適用した評価モデルの構築
想定される調査内容	特になし	特になし	特になし
問題点・課題	<ul style="list-style-type: none"> 表層環境に関するコンパートメントの追加検討 コンパートメント間の移行メカニズムの解明検討 表層水理環境中の核種移行経路と希釈効果を考慮 G B Iごとの核種移行と被ばくグループの受ける線量を求めるだけでは不十分で, 生物圏全体の物質収支を考慮した検討 気候変動による影響を考慮する場合, レファレンスケースとは別に変動ケースの検討 	<ul style="list-style-type: none"> 表層環境に関する複数のコンパートメントの追加検討 コンパートメント間の移行メカニズムの解明検討 表層水理環境中の核種移行経路と希釈効果を考慮 G B Iごとの核種移行と被ばくグループの受ける線量を求めるだけでは不十分で, 生物圏全体の物質収支を考慮した検討 気候変動による影響を考慮する場合, レファレンスケースとは別に変動ケースの検討 	<ul style="list-style-type: none"> 表層環境に関する複数のコンパートメントの追加検討 コンパートメント間の移行メカニズムの解明検討 表層水理環境中の核種の移行経路と希釈効果を考慮 G B Iごとの核種移行と被ばくグループの受ける線量を求めるだけでは不十分で, 生物圏全体の物質収支を考慮した検討 気候変動による影響を考慮する場合, レファレンスケースとは別に変動ケースの検討

2.4 GBI設定手法への反映検討

GBI設定手法の高度化に資することを目的とした前節の試行検討結果より得られた問題点・課題点を以下にまとめる。

2.4.1 流出域の概要把握

前節より、現実的な核種の流出域を把握するためには、表層環境特性を考慮することが有用であるとした。一般に生物圏での流入域の把握を行う際には、サイト周辺の地下水理環境を把握するために、複数のスケールモデルを利用し、地下水流動解析やパーティクルトラッキングが実施されると考えられる。しかしながら、これらの対象領域は、数10km～数km、対象深度は約1000m程度の岩石部、すなわち固結した新第三紀以前の地層に主眼が置かれており、これらのスケールに比べて、薄い表層水理に影響を及ぼす基盤岩の表層風化物や未固結の第四紀堆積物などを詳細に区分した解析はなされないことが予想されるためである。

海外事例調査でもみられるように、このような表層水理を考慮した場合、生物圏評価結果に影響を及ぼすことが明らかとなっており、わが国においてもサイトの状況によっては核種移行や希釈効果の視点から重要となる可能性がある。

本検討では、一連のGBI設定を具体的に試行検討し、課題や問題点を抽出することを目的とした。このため、まずは処分場深度から地表環境までの巨視的なスケールでサイト環境を設定することとした。このため、表層環境については薄く、単純な設定（単層で表現している）となっている。しかしながら、表層環境のみに着目した場合、実際には、複層で構成されていることが多く、さらに地質特性（例えば空隙率など）によっては、地下水の移行パスに影響を及ぼす可能性がある。今後は、表層環境について、仮想的ではあるが、より詳細な設定を行うことで、より現実的なGBI設定についての検討が可能となると考えられる。

表層環境の特性については、わが国の環境影響評価における現況把握を目的とした調査によって取得されることが想定される。よって、その成果の一部はGBI設定にも利用が可能であると考えられる。しかしながら、これらの調査内容を利用する場合、

表層環境の長期変化に関する不確実性について留意しておくことが肝要である。この問題に関して、現在スウェーデンの SKB や生物圏に関する国際共同研究（例えば BIOPROTA）において、将来の環境条件の変化に関する検討が開始されつつあり、今後の動向に注目しておく必要があると考えられる（図 2.4.1-1）。

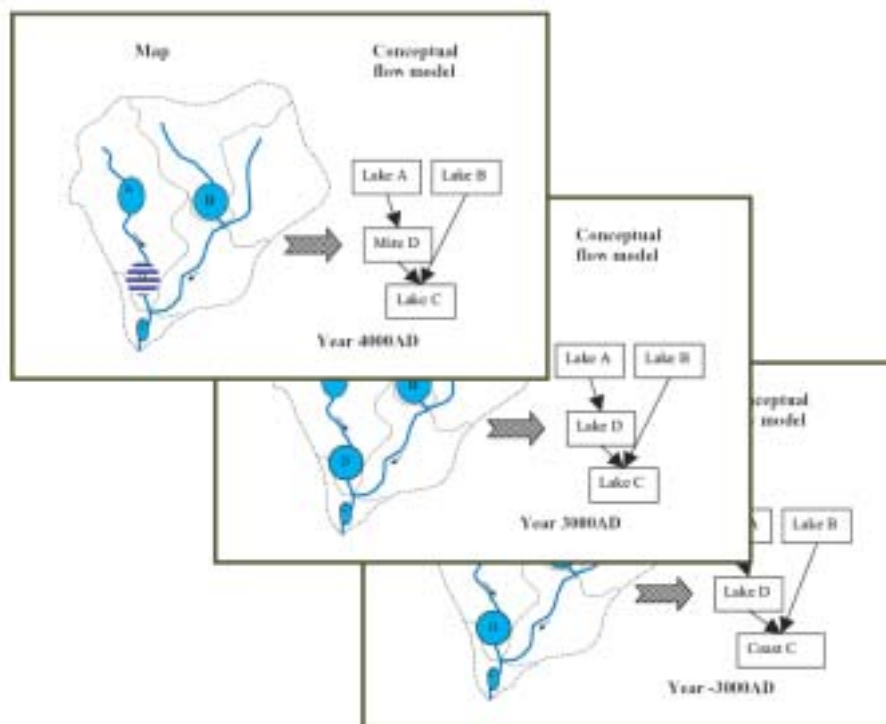


図2.4.1-1 さまざまな段階における生物圏の変遷（SKB，2003a）

2.4.2 GBI候補の抽出

前項の流出域の概要把握は、処分の成立性を考慮した現在の安全評価体系（図 2.4.2-1）での考え方と類似しており、地下水移行解析の流出点から生物圏の流入域に至るまでの詳細な表層水理環境（図 2.4.2-1 の帯水層から地表環境までの部分）については考慮されない。このため、複数選定した GBI 候補のうちどこに地下水が流出するかを決定することは困難である。

わが国の表層地質環境は、環境パターン設定の際の環境要件から、非常に複雑であることがわかっているが（図 2.2.1-5）、例えば英国の S H E T R A N モデルによる解析を実施するための表層環境の水収支や地質調査を行っていくことで、地下深部とのリンクを持たない表層水システムの把握が可能となれば、GBI 候補抽出の際の不

確実性低減に寄与すると考えられる。さらに、スウェーデンの調査事例のように、表層環境の水理について調査検討結果にもとづいた物質移行あるいは被ばくモデル構築を行うことで、生物圏評価全体の不確実性低減や、環境面からより具体的な説明も可能となると考えられる。

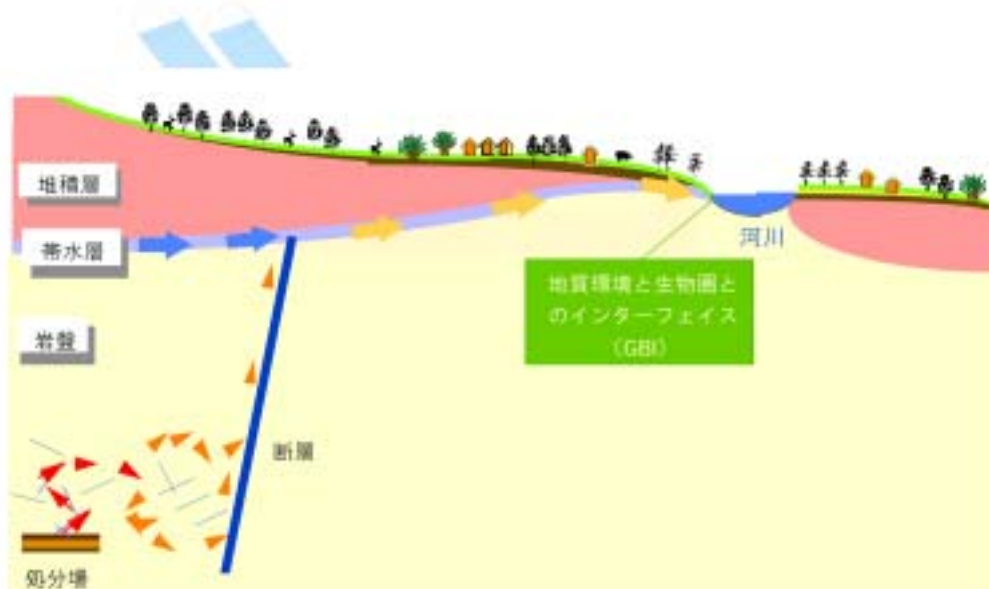


図2.4.2-1 現在の安全評価におけるG B Iの考え方(JNC, 1999)

現在の安全評価体系では、上図の帯水層中の核種移行プロセス（図中オレンジの矢印）については考慮されない保守的な評価が行われている。

2.4.3 被ばくグループ/被ばく経路の設定

処分場の成立性を示すことを目的とした現在の保守的なG B I設定では、表層環境を考慮せずに得られたG B Iに対して、被ばくグループ/被ばく経路を設定している。しかしながら、スウェーデンの事例（2.1.2(1)項）にみられるように、表層環境を考慮することにより、表層環境と生物環境との相互作用を考慮、すなわち考慮すべき被ばく経路や被ばくグループを追加し、検討することが必要となると考えられる。

2.4.4 評価モデルの構築

上述までの検討を勘案すれば、結晶質岩系上部の表層堆積物における地下水移行を評価に含めることが必要であると考えられる。これらを考慮した核種移行モデル例として、例えば Miller et al. (2002) による表層環境中での天然フラックスに関する検

討で利用したコンパートメントモデル（図 2.4.4-1）や，SKB で検討中の第四紀堆積層に関する検討（図 2.4.4-2）がある。今後，表層環境中での移行プロセスを考慮したより具体的な G B I 設定や生物圏評価モデルの開発の際に参考となると考えられる。

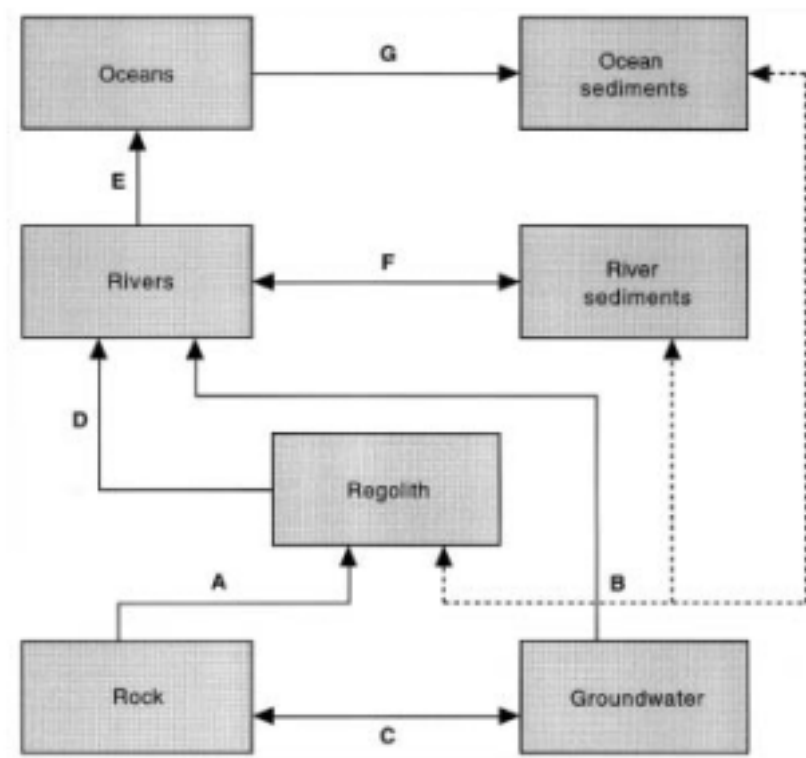


図2.4.4-1 表層環境中の元素フラックスを表すコンパートメントモデル
 (Miller et al. , 2002)

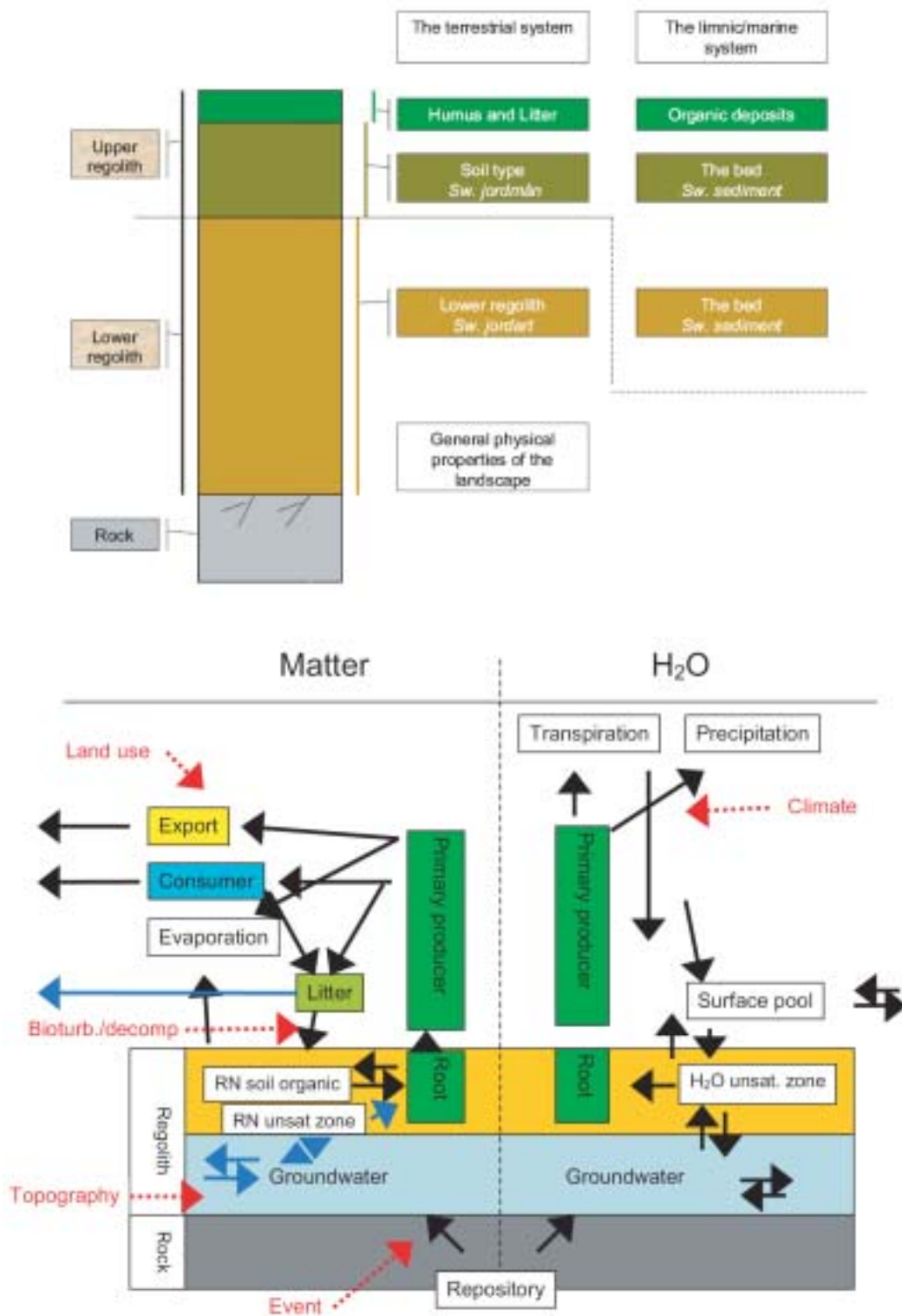


図2.4.4-2 環境システムで想定される第四紀堆積層 (SKB, 2003b)

2.5 検討のまとめ

2.5.1 諸外国における G B I 設定に関する調査および整理

本件のように、一般的な環境についての検討の参考に資することを目的として、複数の諸外国の文書について調査を行い、下記の観点に留意しながら G B I 設定方法を整理した。

各国の環境条件（地形・地質・水文など）

地下水流出域の概要把握（流出域・考え方・解決方法・調査手法など）

G B I 候補の選定（選定 G B I・考え方・解決方法・調査手法など）

さらに、近年、諸外国では、これまでの保守的な設定がなされていた地質環境と生物圏との間の表層水理に関して、より具体的な知見を評価に取り入れることが試みられている。このため、これらに関する文書についてもその内容をまとめた。以下に各国ごとにその概要を示す。

(1) 米国ユッカマウンテンプロジェクト

米国 Yucca Mountain では、地質環境特性の把握により天然の地下水湧水域がないため、G B I の設定にあたっては、将来の農業集団が給水のために地下水を揚水することで生じるとしている。その決定グループは、処分場候補地から 20 km 南方の地点にある Amargosa Valley に位置する農業共同体に居住する人間としている。なお、この処分場候補地からの距離に関しては他の地域との相対的な居住者の数によるものである。本調査による G B I 設定方法を図 2.5.1-1 に示す。図 2.5.1-1 より、Yucca Mountain ではその特異な環境に応じた設定方法が採用されており、わが国では、その方法を利用することは困難であると思われる。なお、環境把握の手法は参考となると考えられる。

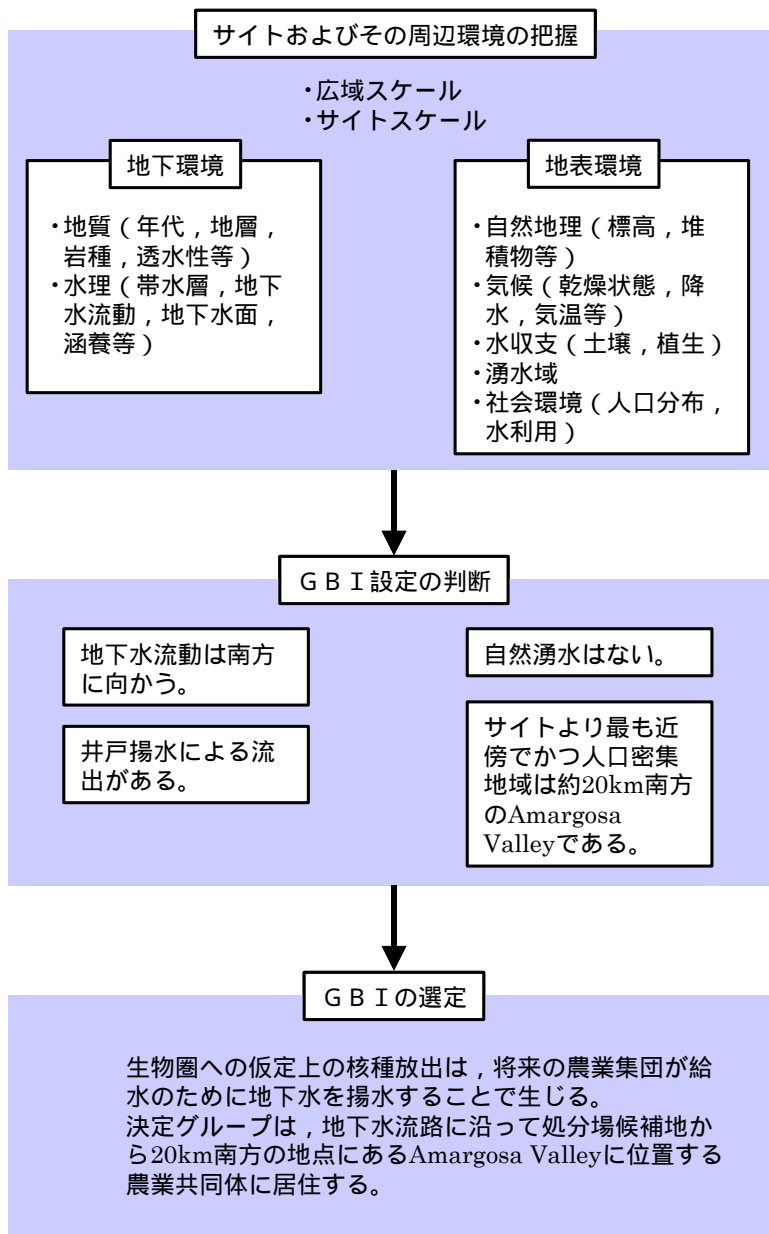


図2.5.1-1 米国ユッカマウンテンプロジェクトでのG B I 設定の流れ（前図2.1.1-13）

（2）スウェーデン

スウェーデンの性能評価書である SR-97 では，3ヶ所の仮想的な処分場サイトを，250m × 250m の小領域に分割し，分割した各領域に対して，その領域での地図に関する環境情報や井戸についてのスウェーデン地質調査所の公文書を基にして，各モジュール（井戸，湖，小川，湾，外洋，土壌，泥炭地）を設定している。そして，地下水流動解析で得られた核種の流出点を基に G B I となるモジュールを選択している。

G B Iでの核種の移行および再分配は非常に複雑なプロセスに支配されているものの、近年スウェーデンで実施されている放射性廃棄物管理プログラムにおける解析では、非常に簡単な方法で取り扱われている。核種の流出点を把握するためには、地質環境およびG B Iでの核種の移行、第四紀堆積層での核種の移行、および地表水文特性が必要である。しかしながら、結晶質母岩から放出された核種は、母岩と母岩を覆っている第四紀堆積層との相互作用を考慮することなく直接沿岸生態系へと流れていくものと仮定している。

現在、SSI を中心に地質環境から生物圏への核種移行経路や滞留時間が第四紀堆積層によってどのように変化するかについて検討が開始されており、その検討内容は参考になると考えられる。

(3) 英国

英国の性能評価書である Nirex-97 では、G B Iとして、核種移行解析結果および過去の知見を参考に、陸域および海洋環境への自然放出と井戸を検討している。評価の際には、地表環境と生物圏環境との間にある移行プロセスを考慮している。本調査から、地下水流動モデルによる核種移行解析結果およびこれまでの検討から得られた知見をもとに、G B Iが設定されているということがわかった。英国 Nirex-97 の検討で特徴的なのは、SHETRAN モデルにより、地表環境での水文システムの影響をより詳細に評価に取り入れようとしていることである。SHETRAN は、地表近傍および地表環境での核種の分布を計算することが可能な地表近傍・地表システムのモデル化に用いられるものである。Nirex のプログラムでは、処分場から放出される核種を、地表水媒体へと直接放出される分と地上へと放出される分とに分割したコンパートメントモデルを作成しているが、このような分割を行うには複雑な物理プロセスが関与している。SHETRAN は、生物圏中で重要な物理プロセスを特定し、より簡単なモデルで用いるための定量的なデータが提供するものである。

(4) スイス (オパリナス粘土プロジェクト)

スイスでは、過去 20 年にわたる北スイスでの広域の地質調査により、Zürcher

Weinland の地質・水理構造および特性に関する明確な情報が得られている。この情報は主として、Benken の深さ 1000m の試錐孔における集中的な作業および周辺地域の 3D 地震波探査から得られたものである。地震波探査により、オパリナス粘土の卓越した均質性と横方向の広がりが確認されている。さらに、地質、水理、地球化学および同位体に関する広域規模のデータが総合化され、かつ新たな狭域流体力学モデルが開発されている。包括的かつ詳細な地質情報がまとめられており、さらに北部 - 中央スイスにおける Nagra の深試錐孔から、またスイスのその他の地域における地下掘削部（例えば、道路および鉄道用のトンネル）に交差しているオパリナス粘土に関する研究から、多くの情報が得られている。これら情報から、対象地域の地下水流れを把握しており、それをもとに G B I を設定している。スイスの事例は、地下水流動モデルや核種移行解析を行わずに、地質調査の結果を利用して、G B I の設定を行っている一例である。G B I の設定に際して行った地質調査については参考になるものと思われる。

2.5.2 わが国の典型的な環境パターンの設定

本件で対象とする仮想的な処分サイト周辺の環境パターンの設定を行った。設定の方法は以下のとおりとした。

わが国における統計情報や環境分野の情報を利用して、下記の事項に関して典型的な環境条件を検討・整理した。

- ・ 地理条件
- ・ 地形条件
- ・ 地質条件
- ・ 水文条件
- ・ 人間活動など

前項までの検討内容を勘案し、下記に示す2種類の仮想サイト環境モデルを設定した。

(ア) 仮想サイト環境モデル

- ・ 対象スケール：面積は約 100km²程度を想定
- ・ 地理条件：山間部，平野部，島嶼（沖合数 km 程度を想定）
- ・ 地形条件：山地，丘陵，平野および山地と丘陵に挟まれた盆地，海域の島
- ・ 地質条件：大規模な花崗岩体が分布する地域。表層は花崗岩体の風化層が高地（山地，丘陵，島）では約 100m 程度，低地（平野あるいは盆地）では未固結の第四紀層が堆積する。
- ・ 水文水理条件：山間部から海域にかけて河川，高地と低地との境界には湧水域，活断層に沿った湖沼，平野および島嶼に浅井戸

(イ) 仮想サイト環境モデル

- ・ 対象スケール：面積は約 100km²程度を想定
- ・ 地理条件：山間部，平野部，島嶼（沖合数 km 程度を想定）
- ・ 地形条件：山地，丘陵，平野および山地と丘陵に挟まれた盆地，海域の島
- ・ 地質条件：基盤岩上層に第三紀の砂質と泥質による堆積層が分布する地

域。表層は第三紀の泥質層と未固結の第四紀層が堆積する。

- ・ 水文水理条件：山間部から海域にかけて河川，高地と低地との境界には湧水域，活断層に沿った湖沼，平野および島嶼の被圧帯水層（砂質）に深井戸

さらに，設定した仮想的なサイト環境モデルのうち，G B I 設定検討に利用することを目的に次の3種類環境パターン例を設定した。

（ア）環境パターン

- ・ 処分場設置岩種 / 深度：花崗岩 / 約 1000m，地表面に連絡する大規模な亀裂の間に位置する。
- ・ 地形条件：内陸部～沿岸部までの比較的起伏がある地形を呈する。
- ・ 地理条件：山間部～沿岸低地部である。
- ・ 地質条件：
 - 深部は低透水性の花崗岩であり，地下水の流れは亀裂による。
 - 表層は丘陵部周辺で深部岩盤の風化堆積物，沿岸部は風化堆積物と第四紀堆積物により覆われており層状の帯水層が広がっている可能性がある。
 - 丘陵部に大規模な亀裂が走っている。
- ・ 表層水理条件：亀裂からの湧水を含む湖沼，河川，沿岸海洋および浅井戸
- ・ 人間活動：沿岸部での生活活動が中心で，飲料水は湖沼，河川，生活用井戸（浅井戸）から取水

（イ）環境パターン

- ・ 処分場設置岩種 / 深度：堆積岩 / 約 500m，周辺に大規模な亀裂はない（下流側に存在）。
- ・ 地形条件：沿岸からの影響を受け難い内陸部に位置し，起伏がある地形を呈する。
- ・ 地理条件：周囲を山地および丘陵に囲まれる盆地である。
- ・ 地質条件：

- 処分場設置位置より深部は低透水性の花崗岩である。
- 地下100mから500m程度は、処分場母岩である低透水性の泥質岩と高透水性の砂質岩からなる堆積層
- 盆地の表層は高透水性の未固結の第四紀堆積層により覆われている。また、山地および丘陵は硬質系の堆積岩が露頭している。
- 丘陵部に大規模な亀裂が走っている。
- ・ 表層水理条件：亀裂からの湧水を含む湖沼、河川および深井戸
- ・ 人間活動：盆地での生活活動が中心であり、飲料水は湧水・河川から取水

(ウ) 環境パターン

- ・ 処分場設置岩種 / 深度：堆積岩 / 約 500m, 本土からは数 km 程度離れている。
- ・ 地形条件：島中央部～沿岸部まで起伏がある。
- ・ 地理条件：島嶼部であり、海域の変動の影響を受けやすい。
- ・ 地質条件：
 - 地下100m以深は、処分場母岩である低透水性の泥質岩と高透水性の砂質岩からなる堆積層
 - 沿岸域の表層は高透水性の未固結の第四紀堆積層により覆われている。また、内陸部は硬質系の堆積岩が露頭している。
- ・ 表層水理条件：沿岸海洋、深井戸
- ・ 人間活動：沿岸部に生活用井戸がある（被圧帯水層から採水）

2.5.3 予備的G B I設定フローによる試行検討および検討結果の反映

予備的G B I設定フローの改良に資する問題点などを抽出することを目的に、例示的に設定した環境パターンについて試行検討を実施した。本検討により得られた予備的G B I設定フローの問題点および課題などは次のとおりである。

表層水理環境の考慮

より現実的な核種の流出域を把握するためには、表層環境特性を考慮することが課題として挙げられる。一般にサイト周辺の地下水理環境を把握するためには、複数のスケールモデルが利用されている。しかしながら、これらの対象領域は、数10km～数km、対象深度は約1000m程度の岩石部、すなわち固結した新第三紀以前の地層に主眼が置かれており、これらのスケールに比べて薄い表層水理に影響を及ぼす基盤岩の表層風化物や未固結の第四紀堆積物などを詳細に区分した解析はなされないことが予想されるためである。

海外事例調査でもみられるように、このような表層水理を考慮した場合、生物圏評価結果に影響を及ぼすことが明らかとなっており、わが国においてもサイトの状況によっては核種移行や希釈効果の視点から重要となる可能性がある。

検討結果より今後の課題としては下記の内容があげられる。

- ◇ より詳細な表層環境の再設定：試行検討結果より、より具体的なG B I設定を行うには、表層環境について把握することが有用であることが示唆された。しかしながら、本検討で使用した例示的なサイト環境モデルおよび環境パターンは、処分場深度レベルから生物圏までの比較的巨視的なスケールをカバーするものであり、表層環境については比較的単純な設定を行っており、G B I設定に資する表層環境の影響などを詳細に検討するまでには至らなかった。今後は表層環境に着目（実際には、構成地質の異なる複層である場合や、空隙率が高い層には、帯水層が含まれる場合もある）した環境パターンを再設定し、表層環境内の地下水移行パスを考慮することで、より詳細なG B I設定を検討することが可能となると考えられる。
- ◇ 表層環境を考慮した生物圏モデル化検討：スウェーデンや英国の生物圏評価

事例では、表層水理における核種移行を生物圏モデルに取り入れた評価検討が行われている。わが国においても、表層環境を考慮したモデル化検討を行うことで、これまでの処分の成立性の確認に主眼をおいた保守的かつ近似的な生物圏評価から、より現実的な評価が可能となると考えられる。

生物圏の長期変遷の考慮

G B I となるエリアを含む表層および地表環境は、地下深部に比べて長期変遷の影響を受けやすいと考えられる。本検討結果のうち、環境パターン のような島嶼地下深部に処分場が設置される事例では、塩淡境界によって、多くの核種が海域に放出される（すなわち G B I は海洋）と結論付けている。しかしながら、長期的には将来、沿岸の浅い海域は陸化するとされており、その場合には、塩淡境界は移動するのにもない、G B I が変化し、生物圏への核種移行量も変化することが予想される。今後は、このような長期的な海水準変動も含めた変遷を考慮しつつ、G B I 設定手法を検討していくことも必要であると考えられる。

3. 海外動向を考慮した生物圏評価技術に関する検討

現在、諸外国の国際機関（IAEA や EC など）において、生物圏評価に関する国際的な研究プログラム（例えば、BIOCLIM など）が実施されている。また、放射線防護指標に関する議論（例えば、FASSET など）も活発に行われている。わが国においても、今後の生物圏評価にこれらの成果を反映させ、性能評価の信頼性を向上させることは重要であると考えられる。このため、本章では、これらのうち、特に生物圏モデルに関する研究プログラム（BIOCLIM、BIOMOSA および BIOPROTA）の最新動向を把握することを目的とした調査を実施し、その内容を整理する。さらに、各プログラムから得られる、わが国における地層処分の性能評価（特に、生物圏評価）に有用と考えられる情報についても整理する。

3.1 生物圏評価技術に関する近年の海外動向

現在、数多くの生物圏評価にかかわる国際共同研究が実施されている。表 3.1-1 にその一例を示す。これらのプログラムは例えば次のような内容が含まれる。

- ・ 評価指標（人間以外の生物種への放射線防護やその他の補完的な放射線防護指標を含む）
- ・ 生物圏モデル（G B I，気候変動，被ばく経路およびデータを含む）
- ・ 環境の時間的変遷

表3.1-1 生物圏評価にかかわる国際共同研究の一例

プロジェクト名	FASSET	SPIN	BIOCLIM	EQUIP	PADAMOT
	Framework for Assessment of Environmental impact	Testing of Safety and Performance Indicators	Modelling sequential biosphere systems under climate change for radioactive waste disposal	Evidence from Quaternary Infills for Palaeohydrogeology	Palaeohydrogeological Data Analysis and Model Testing
生物圏評価との関連性	評価指標	評価指標	生物圏モデル	環境の時間的変遷	環境の時間的変遷
主機関	SSI	GRS mbH	ANDRA	Golder Associates Ltd (UK) British Geological Survey	UK Nirex
実施期間	2000～2003年	2000～2002年	2000～2003年	1998～2000年(?)	2001～2004年
研究目的・研究内容	電離放射線の環境影響評価を行うための放射線防護の枠組みを提供するプロジェクト。電離放射線が環境すなわち動植物相に与える放射線学的影響に関する知識を集めることを目的としている。 *ECの第5次FP	種々の安全・性能指標を同定し、処分システムの長期性能を評価する際のそれら指標の適合性試験することを意図して行われたプロジェクト。 *ECの第5次FP	気候変動を考慮した放射性廃棄物処分のための生物圏システムのモデル化に関するプロジェクト。長期の気候変動が、放射性廃棄物地層処分場の安全性に及ぼす影響を評価するための科学的根拠および実際の方法論を提供することを目指している。 *ECの第5次FP	過去の地下水条件下で生成された鉱物から古水理情報を得るための方法論を作成することを目的として行われたプロジェクト。 *ECの第4次FP	第四紀中に起こった気候変動にともなう、鉱物および地下水の変遷を調査するプロジェクトである。結果として、気候変動による地質環境条件の変化に関する情報が提供される。 EQUIPの後継プロジェクト。 *ECの第5次FP
現状	プロジェクトは完了。FASSET放射線影響データベース(FRED)がWeb上から利用可能。FREDは、放射線と生物との線量影響の文献を収集したもの。	プロジェクトは完了。	プロジェクトは延長され、2003年12月に完了。ただし、現在、一部の文書は公開されていない。	プロジェクトは完了。引き続きPADAMOTプロジェクトで検討が行われている。	継続中。2003年3月にHPが開設されている。
情報源	http://www.cordis.lu/en/src/d_001_en.htm http://www.fasset.org/	http://www.cordis.lu/en/src/d_001_en.htm EURATOM(2002)	http://www.cordis.lu/en/src/d_001_en.htm http://www.andra.fr/bioclim/ EURATOM(2002)	http://www.cordis.lu/fp5/home.html http://www.bgs.ac.uk/padamot/home.html Bath et al., (2000)	http://www.cordis.lu/en/src/d_001_en.htm http://www.bgs.ac.uk/padamot/home.html EURATOM(2002)

EURATOM(2002): Nuclear Fission and Radiation Protection Projects Selected for Funding 1999-2001, EUR 19955, January 2002.

EC 4th Framework Programme: 1994～1998年

EC 5th Framework Programme: 1998～2002年

3.2 BIOCLIM プロジェクト

BIOCLIM (Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal) については、これまでの研究で調査されている(三木他, 2003)。このため、本項では新規の知見を含め、その概要をまとめるとともにわが国への適用性を検討する。

3.2.1 BIOCLIMプロジェクトの目的および概要

BIOCLIM プロジェクトは、2000年10月から3年間の予定で、ECにより発足した、地層処分のための気候変動を考慮した連続的な生物圏システム(sequential biosphere system)のモデル化に関する研究プロジェクトである。BIOCLIM プロジェクトでは、長期の気候変動が、放射性廃棄物地層処分場の安全性に及ぼす影響を評価するための科学的根拠および実際の方法論を提供することを目指している。表 3.2-1 に BIOCLIM プロジェクトに参加した欧州の12機関と3つの補助機関を示す。

BIOCLIM プロジェクトの具体的な目標は、以下のとおりである。

- ・ 規制側や廃棄物管理機関が、地球規模での気候変動やその影響を表すために、放射線学的安全評価で用いられてきた方法を、より明確に理解すること。
- ・ 長期気候変動に関する問題を扱うため、新しい長期気候モデル化戦略の整備に協力すること。
- ・ 気候モデルからの大規模での(例えば、地球規模での)アウトプットを、地域ベースへとダウンスケールすること。
- ・ 長期気候変動と生物圏システムの応答、特に地球規模および地域スケールでの植生パターンとをリンクすること。
- ・ 地層処分施設の性能評価に取り入れるのに適した、気候変動に対する生態系の変化を説明すること。
- ・ 上記のような性能評価を実施する責任を負う、諸外国の機関を支援するために、プロジェクトの成果を広めること。

表3.2-1 BIOCLIMプロジェクトのメンバー一覧

国名	参加機関
フランス	ANDRA (放射性廃棄物管理庁)
	CEA/LSCE (フランス原子力庁)
ベルギー	Catholic University of Louvain la Neuve, UCL/ASTR (ルーヴァンカトリック大学)
スペイン	CIEMAT (エネルギー・環境・工学研究センター)
	ENRESA (放射性廃棄物管理公社)
	UPM-ETSIMM (マドリードポリテクニク大学)
英国	Environment Agency of England and Wales, United Kingdom (英国環境省)
	Enviros Consulting Ltd
	United Kingdom Nirex Ltd (原子力放射性廃棄物会社)
	University of East Anglia (イーストアングリア大学)
ドイツ	GRS (ドイツ原子炉安全協会)
チェコ共和国	NRI (チェコ原子力研究所)

3.2.2 実施内容と現況

上記目標を達成するため、BIOCLIM プロジェクトは、下記の5つのワークパッケージからなる。

(1) ワークパッケージ1：欧州の廃棄物管理機関の要件とりまとめ

ワークパッケージ1では、欧州における廃棄物管理機関の処分の安全性や気候変動に関する要件をレビューし、気候変動を表すために現在用いられている方法を下記の報告書にとりまとめている。なお、ワークパッケージ1についての詳細は、これまでの同研究報告書（三木他，2003）に記載している。

- ・ 長期気候変動を引き起こすメカニズムおよびそのプロセスと、環境への影響
- ・ 気候シミュレーションへの利用を目的として、対象となる欧州地域における利用可能な過去の環境データ

(2) ワークパッケージ2：段階的手法

ワークパッケージ2では、将来の個々の特定時間に関して、大気中二酸化炭素濃度や、氷床の容積あるいは日射量パラメータを変化させ、局所レベルでの気候シミュレーションを行う。なお、上記同様、ワークパッケージ2の一部についての詳細は、これまでの同研究報告書（三木他，2003）に記載している。また、2004年には残りの報告書も公開された。

(3) ワークパッケージ3：連続的手法

ワークパッケージ3では、長期（200,000年間）の連続的な気候変動を予測することを目的として実施される。なお、2004年には一部の報告書が公開された。

(4) ワークパッケージ4：生物圏システム

上記、ワークパッケージ2およびワークパッケージ3で開発された非連続的あるいは連続的な気候モデルから得られた結果を、長期的な生物圏システムに反映させる手法について、安全評価モデル要件の視点から検討する。特に、時間依存する生物圏システム状態間での変遷を、性能評価に適切な詳細レベル表現する方法について新規のガイダンスを提供する。

(5) ワークパッケージ 5 : 結果の反映および最終セミナー

技術作業は、2003 年 11 月までに完了している。得られた重要な知見については、2003 年 11 月 27 日および 28 日に、ルクセンブルグで開催された BIOCLIM-BIOMOSA 合同の最終セミナーで発表された。図 3.2-1 にセミナーのアジェンダを示す。なお、合計 13 件の技術報告書のうち、その多くは、2004 年 2 月現在も作成中である。さらに、EC による概要版の作成が予定されており、2004 年夏に公開予定である。

<p>JOINT FINAL SEMINAR OF THE EC BIOCLIM and BioMoSA PROJECTS</p> <p>GLESNER ROOM, EC-WAGNER BUILDING, LUXEMBOURG</p> <p>27 and 28 NOVEMBER 2003</p> <p><i>DETAILED SEMINAR PROGRAMME</i></p>	
<p><u>08.30 – 09.00 h</u> REGISTRATION</p>	
<p>DAY 1 Chairperson: G Smith (Enviros Consulting)</p>	
<p><u>09.00 – 09.45 h</u> SESSION 1 - INTRODUCTION</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • 09.00 – 09.15 h Welcome Address and Introduction to the Joint BioMoSA and BIOCLIM Seminar and Seminar Arrangements H von Maravic (EC) • 09.15 – 09.30 h BioMoSA: Aims, assessment context and approach G Pröhl (GSF) • 09.30 – 09.45 h BIOCLIM: Objectives and scope D Texier (ANDRA) 	
<p><u>09.45 – 11.45 h</u> SESSION 2 - BioMoSA and BIOCLIM: CHARACTERISATION OF STUDY AREAS</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • 09.45 – 10.30 h BioMoSA – Characterisation of Specific European Sites at Present Day 1 Simon (CIEMAT) • 10.30 – 11.00 h <i>Tea/Coffee Break</i> • 11.00 – 11.45 h BIOCLIM - Characterisation of Past Evolution of European Study Areas A Cortes (ENRESA) 	
<p><u>11.45 – 16.45 h</u> SESSION 3 – BIOCLIM: CHARACTERISATION OF CLIMATE EVOLUTION</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • 11.45 – 12.30 h Basic Assumptions D Paillard (LSCE) • 12.30 – 14.00 h <i>Lunch</i> • 14.00 – 14.45 h Simulation of Future Climate Scenarios at Global and Regional Scales M-F Loutre (UCL) • 14.45 – 15.30 h Coupled long-term global simulation of climate and ice sheet evolution M Kageyama (LSCE) • 15.30 – 16.00 h <i>Tea/Coffee Break</i> • 16.00 – 16.45 h Going Beyond Simulation: Rule-based and Statistical Downscaling C Goodess (UEA) 	
<p><u>17.00 – 18.30 h</u> SESSION 4 – POSTERS ON CLIMATE MODELLING and WINE RECEPTION HOSTED BY THE EC</p>	
<p>DAY 2 Chairperson: S Mobbs (NRPB)</p>	
<p><u>09.00 – 12.30 h</u> SESSION 5 - BioMoSA and BIOCLIM: APPLICATION OF DATA IN PERFORMANCE ASSESSMENTS</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • 09.00 – 09.40 h BioMoSA – Site Specific Models: Similarities and Differences B Kanyar (Univ. Veszprem) • 09.40 – 10.20 h BioMoSA – Comparison of the Deterministic Calculations for the Five Sites of Interest S Mobbs (NRPB) • 10.20 – 10.50 h <i>Tea/Coffee Break</i> • 10.50 – 11.30 h BioMoSA – Model Uncertainty and Parameter Sensitivity G Olyslaegers (SCK/CEN) • 11.30 – 12.15 h BIOCLIM – Methodology for Incorporating Climate Change in Performance Assessments: Current Status and Potential Future Developments M Thorne (M Thorne & Associates) • 12.15 – 12.30 h Brief Discussion of Session 4 Presentations • 12.30 – 14.00 h <i>Lunch</i> 	
<p><u>14.00 – 16.00 h</u> SESSION 6 - CONCLUSIONS AND PLENARY DISCUSSION</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • 14.00 – 14.20 h Conclusions from the BioMoSA Project G Pröhl (GSF) • 14.20 – 14.40 h Conclusions from the BIOCLIM Project D Texier (ANDRA) • 14.40 – 15.00 h Reporting on Day 1 and Day 2 G Smith (Enviros), S Mobbs (NRPB) • 15.00 – 16.00 h Plenary Discussion Chairperson: U Kautsky (SKB) with H von Maravic (EC), D Texier (ANDRA), G Pröhl (GSF), G Smith (Enviros) and S Mobbs (NRPB) 	

図3.2-1 BIOCLIM-BIOMOSAジョイント最終セミナーのアジェンダ

3.2.3 BIOCLIMプロジェクトから得られる知見

わが国の生物圏評価研究において有用と考えられる、BIOCLIM プロジェクトから得られる知見を以下に示す。

BIOCLIM プロジェクトにより、欧州に関する多数の気候モデル開発と開発にあたっての新規知見が提起されている。これらの結果のうち、わが国の生物圏評価に特に関心および関連がある内容としては、欧州のモデル化結果の多くが、今後150,000年以内に、完全氷河状態は生じないことを示している点である。この知見をわが国に適用することに関しては、さらに慎重な検討が必要であるものの、今後の性能評価に将来の気候変動を含めることを望んでいる各国機関にとっては重要な情報ソースとなりうる。わが国への適用の際には、まず、より大きな地球規模スケールモデルを、わが国のレベルにスケールダウンする必要があるかどうか、また欧州地域に対して既に BIOCLIM プロジェクトで提示されている結果が十分にロバストであり、かつわが国にとって適切なものであるかどうかを確認することが必要である。

BIOCLIM プロジェクト結果から、気候変動による環境変化を性能評価の生物圏構成要素に取り入れるための包括的な手法がもたらされる。よって、レファレンスバイオスフィア概念を用いた場合、下記の内容を利用した高度化が予想される。

- ・ 気候変動に関する情報を生物圏システムの状態やその状態間での変遷に利用したランドスケープ変化の記述。
- ・ 生物圏システムの状態間の変遷特性を把握するための相互作用マトリクスの開発（一例を図 3.2-2 に示す）。
- ・ 生物圏構成要素間での時系列的な関連性を視覚化するのに有用な方法である変遷図（一例を図 3.2-3 に示す）の作成。

レファレンスバイオスフィア概念へのこれら高度化は、わが国において気候変動による環境変化を検討する際にも取り入れることが肝要であると考えられる。

気候変動による環境変化の状態は、BIOCLIM プロジェクトによって、かなり進

歩したとはいえ，概念モデルや数学モデルにその変遷を取り込み，さらに放射線学的な重要性を評価するには，今後，さらなる作業が必要であると考えられる。

BIOCLIM プロジェクトで開発された手法は，その他の人間あるいは地球規模での環境変化プロセスを含めて拡張する余地がある。わが国の隆起の重要性を考えると，これは特に関心が高い事象である。同様に，この手法は，生物圏のみならずニアフィールドおよび地質環境を考慮するために利用することも可能である。

気候区分と変遷期間(砂漠気候からステップ気候;期間は 5000 年)					
	地形	影響なし	上方への移行をともなう地下水面深さ変化	影響なし	影響なし
	化学的な風化の増加・地形の傾斜の減少	土壌および岩石	地下水媒体量が増し，浸透量が変化	自然植生(低地にある草地)の発達	作付けエリア増加
	活発な表面流出 浸食・裸地での地形の傾斜の減少	活発な浸出	水媒体	自然植生の発達・利用可能な地表水の増加・淡水生物種の増加	都市社会と農村社会の混合
	自然植生の増加・風食程度の減少	有機物含有量およびバイオマスの増加	蒸発散量増加	生物相	利用可能な農業・漁業資源の増加による人口増加
	ダム開発減少	自然土壌開発・無灌漑作物の重要性増加	深井戸および貯水池利用の減少	既存状態への作物の適用	人間社会

図3.2-2 生物圏システム状態間の変遷を表す相互作用マトリクス例
(BIOCLIM , 2003)

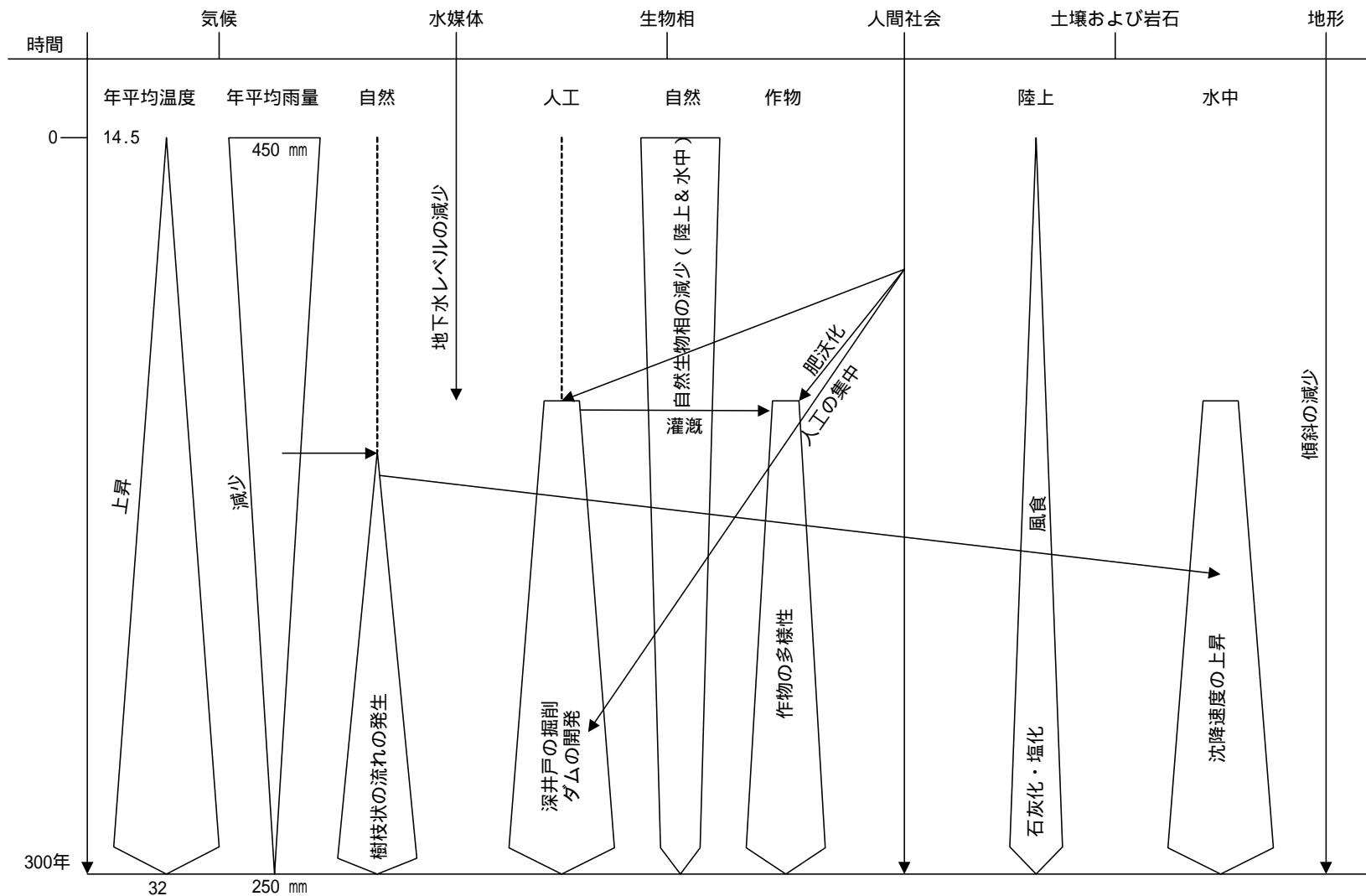


図 3.2-3 スペイン中央部における数 100 年間の気候変動による変遷例 (BIOCLIM, 2003)

3.3 BIOMOSA プロジェクト

BIOMOSA (Biosphere Models for the Safety Assessment of radioactive waste disposal) について、その概要をまとめるとともにわが国への適用性を検討する。

3.3.1 BIOMOSAプロジェクトの目的および概要

BIOMOSA プロジェクトは、欧州共同体 (EC) により発足し、2001 年半ばに開始された 2 年半の研究プロジェクトである。BIOMOSA プロジェクトは、地層処分の安全評価のための生物圏モデルの信頼性向上に資することを目的とした研究プロジェクトであり、IAEA による BIOMASS (IAEA , 2003) のレファレンスバイオスフィア の概念を適用することを前提としている。BIOMOSA プロジェクトには、欧州の 6 機関が参加している。表 3.3-1 に参加機関を示す。

表3.3-1 BIOMOSAプロジェクトのメンバー一覧

国名	参加機関
ドイツ	GSF (放射線環境研究所)
スペイン	CIEMAT (エネルギー・環境・工学研究センター)
スウェーデン	Studsvik EcoSafe
ハンガリー	University of Veszprem (ヴェスプレーム大学)
英国	NRPB (英国放射線防護局)
ベルギー	SCK-CEN (ベルギー王立原子力研究センター)

BIOMOSA プロジェクトの具体的な目標は、以下のとおりである。

- ・ 欧州における地層処分の長期安全性検討に適用するための、実用的な生物圏モデルを開発し、検証すること。
- ・ モデル化に必要な共通な FEP あるいはサイト固有な FEP を特定すること。
- ・ サイト間での主要な相違点を特定すること。
- ・ IAEA の BIOMASS 手法 (IAEA , 2003) により開発されたサイト固有のモデ

ルの変動を定量化するため検証結果を比較すること。

- ・ 長期安全性検討に適用するための一般的な生物圏ツールを開発すること。
- ・ サイト固有のモデル結果と一般的なモデル結果との比較を行うこと。
- ・ 長期性能評価検討において、信頼性の高い、十分に確実な結果を得るためにはどの程度の詳細度でサイトをモデル化すべきかに関するガイダンスを提供すること。
- ・ 一般的な生物圏ツールを各国の状況に応じて適用するための可能性と限界を特定すること。
- ・ 一般的な生物圏ツールをサイト候補地へ適用するためのガイダンスを提供すること。

3.3.2 実施内容と現況

上記目標を達成するため、BIOMOSA プロジェクトは、下記の6つのワークパッケージからなる。

(1) ワークパッケージ1：評価条件 (Assessment Context) の設定

ワークパッケージ1では、評価条件項目について合意したうえで、各項目を設定する。表 3.3-2 に合意された評価条件を示す。さらにハンガリー、スペイン、ベルギー、ドイツ、スウェーデンの5ヶ国に関して検討対象サイトを選定し、検討および開発するモデルの境界条件を設定している。ワークパッケージ1で着目すべき点としては、評価の仮定が可能なかぎり現実的 (realistic) であるというアプローチを採用したことである。この様な仮定に対しては、仮想的な被ばくグループに対する線量計算という考えと一致しない可能性がある。つまり、同じ生物圏システムを評価しても、個人線量結果が低くなる可能性を有している。さらに、システム変遷に関しては、明確には検討対象としていない。

表3.3-2 BIOMOSAプロジェクトの評価条件（1 / 2）

項目	記述内容	注記
評価目的	<ul style="list-style-type: none"> 規制要件の遵守を実証すること。 異なるサイト間および環境条件間での線量の変動を定量化すること。 	<ul style="list-style-type: none"> 規制は国によって異なるので、BIOMOSA プロジェクトにおいて、規制遵守の実証には直接取り組んでいない。しかしながら、開発・適用されるツールは、規制目標の遵守を判断するのに十分なものである。
評価指標	<ul style="list-style-type: none"> 成人および幼児(1～2歳)への年個人実効線量。 さまざまな環境媒体中での核種濃度。検討対象サイト間での相違点および類似点を特定するためにこれらが必要である。 線量および放射能濃度の不確実性。不確実性の定量化は、モデルの妥当性および信頼性の評価を裏付ける。 	<ul style="list-style-type: none"> 個人線量は、主要な規制目標の一つである。
評価の考え方	<ul style="list-style-type: none"> 作成されるモデルは可能なかぎり現実的であるべきである。 	<ul style="list-style-type: none"> 保守的な先入観は、信頼性をもって導出された結論のみならず、各サイトの比較を複雑にすることになる。
処分場のタイプ	<ul style="list-style-type: none"> BIOMOSA プロジェクトでは生物圏の移行のみを扱っているので明確にしない。 	<ul style="list-style-type: none"> 結果は、一般的に適用可能であり、必ずしも特別な処分場システムに特化していない。
サイト条件	<ul style="list-style-type: none"> 5ヶ所のサイトに対するサイト固有モデル、5ヶ所の固有なサイト条件を扱う一つの一般的なモデル。 	<ul style="list-style-type: none"> 生物圏システムの変化は、気候変動および隆起による。 生物圏の変遷については推論的であることから、明確な検討はしない。ただし、各サイトで起こり得る将来の状態は考慮し、改良された環境条件に対する計算を行う。 上記の追加計算は、「現在の気候が別のあらかじめ設定された気候状態へと変化するならば、評価指標に対する影響は何か?」といった問いに対する回答を用意するものである。

表3.3-2 BIOMOSAプロジェクトの評価条件（2 / 2）

項目	記述内容	注記
ソースターム およびGBI	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水媒体への各核種の単位放出率。 ・ 各サイトに対するGBIは以下のとおり。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ ハンガリー: 井戸, 湖沼, 土壌, 河川 ➢ スペイン: 湖沼, 河川, 土壌 ➢ ドイツ: 井戸, 土壌 ➢ ベルギー: 井戸, 河川 ➢ スウェーデン: 沿岸水, 井戸, 湖沼, 土壌 ・ 一般的なモデルでは, 海洋, 地表水, 井戸, 堆積物, 地表近傍土壌への放出をGBIと仮定する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ GBIはサイト固有とする。 ・ 5つの異なるサイトを検討する。 ・ 評価指標は水中の放射能濃度で規格化する。 ・ 上記の結果は比較する。このような規格化により, サイト間での被ばく計算を直接比較することが可能となる。一方, 地質環境の表層部分での移行は, さまざまなサイトでの希釈の指標を与えることから検討される。
評価期間	<ul style="list-style-type: none"> ・ 生物圏への核種の連続的な放出を仮定している。放出された核種が環境中でその平衡の90%に達した時の結果を提示することになる。特定の期間は指定されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 時間ステップはその発生時間とは無関係とする。
将来の人間社会に関する仮定	<ul style="list-style-type: none"> ・ 各サイトでの現在の状態としている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 技術レベル, 農業慣習, および生活習慣は, できるかぎりサイト固有な条件に従って仮定される。
評価対象核種	<ul style="list-style-type: none"> ・ Cl-36, Se-79, Tc-99, I-129, Cs-135, Ra-226, Pa-231, Np-237, U-238, Pu-239 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 左記核種は大半の性能評価で対象とされているものである。 ・ 核種は広範囲な環境挙動を網羅している。

(2) ワークパッケージ2：サイト固有要件および概念モデルの設定

ワークパッケージ2では, 相互作用マトリクスアプローチを各処分システムの概念モデル開発に利用することが確認された。これは, BIOMOVs (BIOMOVs II, 1996) および BIOMASS (IAEA, 2003) で開発され, わが国の既存の生物圏検討でも利用されているものと同様である。さらに, このアプローチは, 5ヶ所のサイトすべてに関する一般の評価モデル開発にも利用することも確認されている。なお, この一般的なモデルは, 5ヶ所のサイトに関連するあらゆるプロセスを考慮するように意図されている。

(3) ワークパッケージ3：サイト固有な生物圏モデルの開発および適用

ワークパッケージ3で決定したサイト固有モデルの開発のために選定地域を表 3.3-3

に示す。表 3.3-3 のように各対象地域については、BIOMASS プロジェクト（IAEA，2003）の生物圏システム記述の構成要素を利用して記述し、その特徴を明記している。その後、各サイトに対する概念モデル作成のために相互作用マトリクスアプローチを用い、マトリクス中で特定されたプロセスを表現する数学モデルを作成している。また、数学モデルおよび関連データ（サイト依存データおよび非サイト依存データ）を利用したソフトウェアコードを表 3.3-4 に示す。

（４）ワークパッケージ４：一般的な生物圏ツールの開発

ワークパッケージ４では、前ワークパッケージ３で特定された、さまざまなプロセス表現が可能な一般的な生物圏コードが開発されている。このコードの開発にあたっては、特定の生物圏移行プロセスや経路を柔軟に切り替えることが可能なように設計とされている。例えば、このコードを内陸サイトに適用する場合、海洋経路は無視される。コードは、サイト固有のモデルで用いたのと同じデータを用いて、５ヶ所のサイトで適用されている。

（５）ワークパッケージ５：サイト固有モデルと一般的ツールとの結果比較

計算結果は、人間が使用する水中の核種濃度（ 1Bq/m^3 と仮定）で規格化し、 $\text{Sv/yr} / \text{Bq/m}^3$ で与えられる（ワークパッケージ１参照）。これにより、サイト間での比較やサイト固有のモデルと一般的なモデルとの比較が容易となる。ただし、この規格化を行うことにより、各サイトに関する G B I での核種フラックスの希釈の相違は検討することはできない。また、計算は各サイトについて同様に現在の条件に対して実施される。結果は、サイトごとに決定論的に提示され、さらに、不確実性については確率論的な計算を用いて評価が行われている。

（６）ワークパッケージ６：結果の分析および評価

BIOMOSA プロジェクトで得られた結果を分析・評価し、地層処分の長期安全評価における生物圏のモデル化に対する結論が出されている。これらの結論については、2003年11月27日、28日にルクセンブルグで開催された BIOCLIM-BIOMOSA 合同の最終セミナーで発表されている。前図 3.2-1 にセミナーのアジェンダを示した。

表3.3-3 BIOMOSAプロジェクトにおけるサイト固有モデルの開発のための選定地域

	ハンガリー	スペイン	ベルギー	ドイツ	スウェーデン
位置	メチェク山地に近く、ダニューブ川の30km西方	イベリア半島の中央西部	モルーデッセルサイト、沿岸から150km	ニーダーザクセン、エルベ川の2km南方、沿岸から100km	フォルスマルク、バルト海沿岸に隣接
地理的範囲	特定せず	約 50km ²	特定せず	約 100km ²	特定せず
地形	<ul style="list-style-type: none"> 丘陵 海拔 100m 	<ul style="list-style-type: none"> 台地 山脈間 	<ul style="list-style-type: none"> 平地 海拔 25m 	<ul style="list-style-type: none"> 台地 	<ul style="list-style-type: none"> 平地 海拔 20m
気候	<ul style="list-style-type: none"> 年平均温度: 10.6°C 年平均降水量: 666mm 寒い冬, 暑い夏, 生育期には顕著な雨不足 	<ul style="list-style-type: none"> 年平均温度: 15.6°C 年平均降水量: 648mm 温暖な冬, 暑くて非常に乾燥した夏, 生育期の顕著な雨不足 	<ul style="list-style-type: none"> 年平均温度: 9.7°C 年平均降水量: 757mm 温暖な冬, 涼しい夏, 生育期に十分な降雨のある海洋気候 	<ul style="list-style-type: none"> 年平均温度: 8.5°C 年平均降水量: 556mm 生育期の中程度の水不足という特徴がある温和な大陸性気候 	<ul style="list-style-type: none"> 年平均温度: 5.5°C 年平均降水量: 563mm 涼しくて湿度の高い気候
地質	粘土, 黄土	褐色土, エンティソル*	ポドゾル	ポドゾル, ポドゾルーグライ土, グライ土	石灰質が豊富な氷河堆積物
土地利用	一部で穀類の生産および動物の飼育(牛, 豚, 羊, 馬)を行っている森林	作物(果物, 野菜, 穀類)および動物の飼育(牛, 豚, 鶏, 魚の養殖)を少量生産	冬に牛や羊を飼うために用いるとうもろこしを大量に生産	穀類および根菜の生産, 動物の飼育(牛, 豚, 鶏, 魚の養殖)を盛んに実施	多少農業を行っている森林
習慣	農業	農業	農業	農業	農業と海洋漁業

* 1974年に「Soil Taxonomy」として公刊されたアメリカの土壌分類で、最近形成された土壌のこと。

表3.3-4 BIOMOSAプロジェクトで利用された評価コード

機関	モデル	コード
GSF	サイト固有, ドイツ	ECOSYS
CIEMAT	サイト固有, スペイン	AMBER
Studsvik EcoSafe	サイト固有, スウェーデン	BIOPATH
ヴェスプレーム大学	サイト固有, ハンガリー	ModelMaker
NRPB	5カ国のサイトに適用	BIOGEM
SCK-CEN	サイト固有, ベルギー	BIOSPHERE

3.3.3 BIOMOSAプロジェクトから得られる知見

わが国の生物圏評価研究において有用と考えられる, BIOMOSA プロジェクトから得られる知見を以下に示す。

BIOMOSA プロジェクトでは, 5ヶ所のサイト固有な生物圏モデル開発のために, BIOMOVS (BIOMOVS II, 1996) で開発され, BIOMASS (IAEA, 2003) で整備されたレファレンスバイオスフィア概念が上手く利用されている。この手法における各主要ステップ(評価条件の設定, 生物圏システムの記述, FEP作成とスクリーニング, FEP間の相互関係の明確化, 概念モデルの構築, 数学的定式化, パラメータの整備, 解析の実施)は, 系統的な手法にしたがっており, その結果, 十分に裏付けられた根拠のある生物圏モデルが作成されることになる。また, このアプローチは, わが国においてもこれまでの生物圏モデルの構築において利用されている。

レファレンスバイオスフィア概念を利用することにより, 十分に裏付けられた根拠のある方法で生物圏モデルを構築することが可能となる一方で, モデル構築の過程で主観的な決定を下す必要性が残っていることを認識することが重要である。このような主観的な決定は, 構築される生物圏モデルの性質に影響を及ぼし得るものである。例えば, BIOMOSAの結果に見受けられる各モデル間での相違

の一部は、明らかに、サイト固有な条件の違いのみならず、モデル開発段階による主観的な先入観を反映している。主観的な判断についての相対的な重要性は、例えば、Savage (1995) で示されたような、主観的な決定によって導入された先入観を監査することによって、解明することが可能である。これ以外にも、例えば、同じ問題の評価を2組以上のモデル開発チームで実施するという方法もある。

BIOMOSA プロジェクトは、生物圏のモデル化に関する多くの側面について、貴重な情報源を提供している。今後は、生物圏のモデル化アプローチやデータが補完されたかどうかを確認するには、BIOMOSA プロジェクトが公表する最終報告書をレビューすることが肝要である。例えば、重要プロセスの数学的定式化は、重要パラメータと合わせてレビューすることができる。さらに、BIOMOSA プロジェクトで示されている確率論的結果と決定論的結果とを、これまでの生物圏研究で得られた結果と比較し、類似点や相違点の理由を説明することもできる。

BIOMOSA プロジェクトで検討されている各サイトでの井戸GBIに対する結果は、概して同じである。これに対して、その他のGBI（例えば、湖沼、河川、土壌、海洋）に対する結果は、サイト間での大きな違いを示している。これは、その他のGBIがサイトに依存するのに対し、井戸GBIは、一般的にサイトに依存しないということを示唆するものと解釈される。ただし、BIOMOSA プロジェクトでは、井戸水中の単位核種濃度を仮定しているということを認識することが重要である。実際に、各サイトのGBIの特徴は、汚染水と非汚染水との混合や核種濃度の希釈といったプロセスを通じて、井戸水中の核種濃度に強く影響を及ぼす。したがって、井戸GBIに対してさえも、サイト固有の特徴を考慮することが必要であり、サイト固有の情報を適切に評価し、解明する必要がある。なお、BIOCLIM-BIOMOSA 合同の最終セミナーでは、このような評価や解釈の際には、以下の点を考慮すべきであることが示唆された。

- ・ データの質
- ・ データの妥当性
- ・ サイト固有および（あるいは）一般的なデータ利用による不十分な部分の解決

- ・ サイト調査の要件に関するガイダンス作成

汚染された飲料水の摂取は、大多数の核種（Cl-36，Se-79，Cs-135 を除く）に対して最も線量が高くなる被ばく経路である。したがって、NEA（1998）で提案されているように、この被ばく経路はサイト評価についてのベンチマークとして用いることができる。それにもかかわらず、以下の理由から、代替的な被ばく経路を検討することが重要である。

- ・ ある核種にとっては重要となる被ばく経路（例えば、Th-229 からの外部被ばくやアクチニドの吸入）
- ・ あるサイトにおいては飲料水の摂取が不適切な被ばく経路（例えば、沿岸サイトなど）
- ・ 処分概念の安全性における信頼性構築のために、ステークホルダーは広範囲な被ばく経路を検討することを期待していること

さらに、例えば BIOMASS Example Reference Biosphere（IAEA，2003）のような、その他の研究では、水は重要な経路で、有用な指標となる経路となり得る（あまり複雑でなく、水の摂取は異なるサイト間でもあまり違わないため）という主旨のもとに行われている。一方、BIOMOSA プロジェクトでは、決定グループの行動に関し保守的な仮定していない。このため、すべて被ばくグループは同じ水を飲むが、食物の消費に対する現実的な仮定は“決定グループ”に対する仮定よりも低くなる可能性があるため、線量が低く見積もられる可能性がある。ただし、この結果については、仮定が間違っているのではなく、単に評価条件が異なっているにすぎない。

BIOMOSA プロジェクトでは、成人と幼児の線量を算出している。成人と乳児との線量の差は、通常2倍以下で、10種類の対象核種のうち6核種について成人の線量が高くなった。わが国においては、現在まで、成人に対する線量のみを検討してきた。これは BIOMOVs（BIOMOVs II，1996）および BIOMASS（IAEA，2003）の提言、すなわち、これらプロジェクトでは成人、幼児あるいは乳児との間での線量の違いは大きくないこと、を参考にしたことによる。しかしながら、一般的に、幼児あるいは乳児は、成人よりも放射線リスクの影響を受け

やすいことは事実であり、例えば、Smith et al. (1997) では、地層処分にかかわるほとんどのリスク評価でこの問題を注目していないことについて、セーフティケース全体における弱点であると論じられている。

3.4 BIOPROTA プロジェクト

BIOPROTA (Keys Issues in Biosphere Aspects of Assessment of the long-term Impact of Contaminant Releases Associated with Radioactive Waste Management) について、その概要をまとめるとともにわが国への適用性を検討する。

3.4.1 BIOPROTAプロジェクトの目的および概要

BIOPROTA プロジェクトは、その意味合いが BIOCLIM や BIOMOSA プロジェクトとは異なる国際的な共同研究プロジェクトであり、長寿命核種の流出に関する生物圏への放射線影響を評価する際の不確実性を取り扱うため討論の場を提供するために発足した。BIOPROTA プロジェクトでは、重要核種、これら核種に関連した生物圏での重要な移行および蓄積メカニズムを中心に扱われている。BIOPROTA プロジェクトは世界各国の多くの機関が参加している。表 3.4-1 に BIOPROTA の運営委員会メンバーである 6 カ国 8 機関を示す。

表3.4-1 BIOPROTAプロジェクトの運営委員会メンバー

国	参加機関
フランス	ANDRA (放射性廃棄物管理庁)
英国	BNFL (英国原子燃料公社)
	UKAEA (英国原子力公社)
	UK Nirex (原子力産業放射性廃棄物管理会社)
スペイン	ENRESA (放射性廃棄物管理公社)
日本	NUMO (原子力発電環境整備機構)
フィンランド	POSIVA (ポシバ社)
スウェーデン	SKB (スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社)

BIOPROTA プロジェクトの具体的な目標は、以下のとおりである。

- ・ 性能評価で利用するパラメータ値の妥当性や基礎的な情報を含む、データベー

スを開発すること。

- ・ 重要な生物圏プロセスのモデルを改良すること。
- ・ 生物圏評価に関するサイト特性調査に関するガイダンスを作成すること。
- ・ 生物圏に関する研究，サイト特性調査，モニタリングで利用するためのプロトコルを作成すること。

3.4.2 実施内容と現況

BIOPROTA プロジェクトに関しては，2002 年 6 月，ANDRA により予備的なワークショップが開催され，検討すべき特定の核種および生物圏プロセスに関する問題が決定されている。このワークショップには，18 の廃棄物管理機関および規制機関が参加し，各々の廃棄物管理プログラムの重要問題やそれら問題を扱うための提案が明らかにされた。これらの問題の一部は，各国固有の内容であったが，残りの問題は，多くの機関に関連する共通の問題であることが明らかになっている。

BIOPROTA プロジェクトでは，この予備的なワークショップで特定されたこれらの共通の問題に関連してテーマおよびタスクが構成された。表 3.4-2 に BIOPROTA プロジェクトのテーマおよびタスクの概要を示す。予備的なワークショップ後，現在まで下記の 3 回のワークショップが開催されており，議論が行われている。なお，これら 3 回のワークショップを含む 2002 年 10 月～2003 年 9 月の間に実施された作業については，経過報告書としてとりまとめられている（BIOPROTA，2003）。なお，現時点では，BIOPROTA プロジェクトは少なくとも 2004 年 9 月まで実施予定である。

第 1 回（2002 年 10 月），Oslo（ノルウェー）

第 2 回（2003 年 5 月），Wettingen（スイス）

第 3 回（2003 年 9 月），Paris（フランス）

以降より，表 3.4-2 に示した各テーマおよびタスクの概要を示す。

表3.4-2 BIOPROTAプロジェクトのテーマおよびタスク

テーマ	タスク	現状※
1. 重要核種およびプロセスデータに関するデータベース開発		データベース ver1 開発 関連報告書作成
2. モデル化関連	1. 灌漑モデルに関するガイダンス策定	ドラフト報告書作成
	2. 土壌／堆積物中のアクチノイド蓄積に対する吸入摂取のガイダンス策定	ドラフト報告書作成
	3. C-14 線量評価モデルのレビュー	参考文献リスト作成 報告書類は未作成
	4. モデルの相互比較演習	ドラフト報告書作成
	5. アナログデータの更新およびレビュー	300 件以上のアナログ 研究のデータベース作成
	6. 環境変化	タスク 7 と統合
	7. 地質環境と生物圏とのインターフェース領域(GBIZ)	経過文書(ver.1)作成
3. サイト特性調査, 研究, モニタリング	1. 生物圏のサイト特性調査に関するガイダンスの作成	経過文書(ver1)作成
	2. 長期的な調査計画プロトコル	

※ 2004 年2月現在の状況。作業成果はプロジェクト参加者に配布。

(1) テーマ 1 : 重要核種およびプロセスデータに関するデータベース開発

BIOPROTA プロジェクトのテーマ 1 については、2003 年 12 月までに、データベースが設計および構築されており、さらにその関連報告書の作成が行われている。データベースには、C-14、Cl-36、Tc-99、I-129、Np-237 に関する核種依存パラメータ（例えば、半減期、線量換算係数、植物への移行係数、土壌の分配係数）の関連情報および核種非依存データ（例えば、土壌、家畜あるいは農作物データ）が含まれる。現在、継続して、BIOPROTA プロジェクト参加者から送付されてきている情報を利用して、BIOPROTA プロジェクト内でデータの拡充を図っている。

(2) テーマ 2 : モデル化関連

BIOPROTA プロジェクトのテーマ 2 は、以下に示す 7 種類のタスクからなる。

() タスク 1 : 灌漑モデルに関するガイダンス策定

タスク 1 は、汚染された灌漑水を利用した場合の、葉菜および根菜の葉面による阻止 (interception; 経根吸収ではない) および人間による汚染食物の消費から、線量の算出を目的としている。評価対象核種は、Cl-36、Se-79、Tc-99、I-129、Ra-226、Np-237 である。2003 年 12 月までに、複数のモデル化演習結果 (AMBER コードを含む) の比較が完了し、さらに解析に用いた概念モデルやパラメータ値に関する情報を分析しているところである。

() タスク 2 : 土壌 / 堆積物中のアクチニド蓄積に対する吸入摂取のガイダンス策定

タスク 2 では、共通条件として BIOMASS Example Reference Biosphere 2A システム (ERB 2A) を参考にして、さまざまなモデルによる解析結果の比較が行われている。なお、対象核種は Pu-239 とし、その土壌濃度が 1Bq/m^3 と仮定している。2003 年 12 月までに、複数のモデル化演習結果 (AMBER コードを含む) の比較が完了し、さらに解析に用いた概念モデルやパラメータ値に関する情報を分析しているところである。

() タスク 3 : C-14 線量評価モデルのレビュー

タスク 3 は、他のタスクよりも開始が遅かったことから、それほど進展していない。

2003年12月までに、多数の機関がC-14に固有の放射能モデルを利用する方向に向かっていていることを示す複数の論文のレビューが行われている。しかしながら、性能評価に利用可能な詳細レベルでC-14のモデル化を検討する場合、特にある未知の媒体中のC-14同位体存在濃度が、既知の媒体中の濃度と同様であるとの仮定が適用可能な時間・空間的な平均スケールに関連した多くの不確実性や問題点がある。タスク3では、2004年中に各機関のC-14のモデル化手法およびそれらのモデルの長所・短所の整理を実施する予定である。

() タスク4：複数モデル間の相互比較演習

タスク4は、ANDRA、BNFL、EdF（フランス電力公社）、EPRI（米電力研究所）、NUMO、UKAEA（英国原子力公社）およびNirexが参加し、井戸水利用、河川への地下水流出および毛管上昇のような経路により流入する可能性がある土壌中の核種蓄積プロセスを検討している。評価対象核種は、Cl-36、Se-79、Tc-99、I-129、Ra-226、Np-237であり、各核種は濃度を1000Bq/m³と仮定している。2003年12月までに、複数のモデル化演習結果（AMBERコードを含む）の比較が完了し、さらに解析に用いた概念モデルやパラメータ値に関する情報を分析しているところである。

() タスク5：アナログデータの更新およびレビュー

タスク5の目的は、関連するアナログについてリスト化すること、関連プロセスをレビューし特定すること、性能評価に対する定量的・定性的情報を特定すること、およびモデルの試験の際に利用可能なアナログを示唆することである。2003年12月までに、300件以上のアナログ研究に関するデータベース化が完了し、利用可能となっている。さらに今後のスケジュールを検討中である。

() タスク6：環境変化

タスク6は、人間による環境変化に着目した検討が予定されていた。しかし、現在のところ、顕著な進展は見られず、将来的には次項のタスク7と統合される可能性がある。

() タスク 7 : GBIZ (地質環境と生物圏とのインターフェース領域)

タスク 7 の目的は、性能評価での検討が必要な GBIZ の取り扱いおよび関連する蓄積 / 分散 / 希釈プロセスを明らかにすることである。現在までに、実例となるような解析は実施されていないものの、多数の報告書のレビューが行われ、さらにレビュー結果から得られた知見をまとめた文書が作成されている。2003 年 12 月に開催された会合では、今後検討すべき問題の特定が行われた。また、相互作用マトリクスアプローチを、さまざまな表層地質条件に対して検討すべき重要なプロセスを決定するために採用することが計画された。

(3) テーマ 3 : サイト特性調査、試験およびモニタリング

BIOPROTA プロジェクトのテーマ 3 は、2 種類のタスクからなる。タスク 1 では、生物圏のサイト特性調査に関するガイダンスを作成することを目的として、実施すべき計測の種類と、それらの計測の有用性について明らかにすること、また、実際の計測手法に関するプロトコルを立案することに力を入れている。なお、地層処分における生物圏のサイト特性調査は、閉鎖後の放射線学的な性能評価に有用な知見を与えるものであることから、より長期的な調査を目的としたプロトコルが適切であると認識されている。このため、タスク 2 では、生物圏評価をサポートするような長期的な調査計画のためのプロトコルを作成することを目的としている。2003 年 12 月までに、テーマ 3 に関する第 1 バージョン報告書が作成されている。この報告書には、この 2 種類のタスクから得られた問題点について、その概要がとりまとめられている。さらに、現時点における最良の方法を明らかとし、アプローチに関する改良・拡充要件、新規のプロトコル検討が必要な分野を特定することを目的とした、今後のサイト特性調査に関するアプローチや研究、サイト特性調査およびモニタリングのプロトコルに関する作業方針が提示されている。

3.4.3 BIOPROTAプロジェクトから得られる知見

わが国の生物圏評価研究において有用と考えられる、BIOPROTA プロジェクトから得られる知見を以下に示す。

BIOPROTA プロジェクトの目的は、前述の他のプロジェクト（BIOCLIM や BIOMOSA）とは異なり、生物圏に関するモデル開発での重要な問題点や、その取り扱いに関するオプションを特定するための議論の場として位置づけられており、生物圏評価にかかわるさまざまな情報を入手するという点で、有用な情報源であると考えられる。このため、今後（プロジェクト完了までは9ヶ月ある）も BIOPROTA プロジェクトの成果に関して注目し続けることで、わが国における現在の生物圏評価に関連のある諸問題が明らかとなり、今後の研究に含めるべき内容の判断することが可能となる。上述した BIOPROTA プロジェクトのテーマおよびタスクは、生物圏評価を実施しているさまざまな機関が確実に関連するように慎重に選定された結果であり、その知見は、わが国における将来の生物圏評価プロジェクトにも関連するものと考えられる。

BIOPROTA プロジェクト内で検討されている問題の一部は、これまでの生物圏評価研究においても検討されてきている。表 3.4-3 に BIOPROTA プロジェクトのテーマおよびタスクと、対応するこれまでの研究状況を示す。表 3.4-3 よりテーマあるいはタスクの多くにわが国でも関連した研究が実施されてきている。このことから、BIOPROTA プロジェクトの進捗状況やその成果を踏まえたレビューや、必要であれば、新規知見を取り込んだ改良・補完のための作業が必要となると考えられる。同時に、わが国のこれまでの生物圏評価研究成果は、今後の国際共同研究に影響を及ぼし得るものでもある。

BIOPROTA プロジェクト内の3種類のタスク（タスク1，タスク2およびタスク4）の比較検討演習では、第2次とりまとめを含む、わが国の生物圏評価研究で利用されてきたコンパートメントモデル開発ツールである AMBER コードが利用されている。このことから、AMBER が生物圏評価にとって有用なツールであり、今後もわが国の生物圏評価研究で AMBER を使用する際のコードの検証とな

ると考えられる。

表3.4-3 BIOPROTAプロジェクトの内容とわが国における生物圏評価との関連

テーマ	タスク	わが国との関連
1. 重要核種およびプロセスデータに関するデータベース開発		過去の研究でとりまとめられた例がある(三木他, 2002)。
2. モデル化関連	1. 灌漑モデルに関するガイダンス策定	井戸および河川をGBIとした過去の研究に含まれた例がある。
	2. 土壌/堆積物中のアクチノイド蓄積に対する吸入摂取のガイダンス策定	過去に研究された生物圏評価対象に含まれた。
	3. C-14 線量評価モデルのレビュー	ガス状核種の放出について研究例がある(三木他, 2002)
	4. モデルの相互比較演習	井戸および河川をGBIとした過去の研究に含まれた例がある。
	5. アナログデータの更新およびレビュー	未検討
	6. 環境変化	過去の研究では、例えば、気候変動に影響に関する概要検討がある(三木他, 2003)。
	7. 地質環境と生物圏とのインターフェース領域(GBIZ)	GBIに関しては過去の研究で取り上げられている(三木他, 2002; 三木他, 2003)。
3. サイト特性調査, 研究, モニタリング	1. 生物圏のサイト特性調査に関するガイダンスの作成	未検討
	2. 長期的な調査計画プロトコル	

3.5 検討のまとめ

現在、諸外国の国際機関（IAEA や EC など）において、生物圏評価に関する国際的な研究プログラム（例えば、BIOCLIM など）が実施されている。また、放射線防護指標に関する議論（例えば、FASSET など）も活発に行われている。わが国においても、今後の生物圏評価にこれらの成果を反映させ、性能評価の信頼性を向上させることは重要であると考えられる。このため、本章では、これらのうち、特に生物圏モデルに関する研究プログラム（BIOCLIM、BIOMOSA および BIOPROTA）の最新動向を把握することを目的とした調査を実施し、その内容を整理した。さらに、各プログラムから得られる、わが国における地層処分の性能評価（特に、生物圏評価）に有用と考えられる情報についても整理した。本検討のまとめを表 3.5-1 にまとめた。調査対象のプログラムは、現在も検討中あるいは現在のところその成果は未公表であり、今後も適宜動向を把握しておく必要がある。

表3.5-1 生物圏モデルに関する研究プログラムの現状の整理 (1 / 2)

研究プログラム	BIOCLIM	BIOMOSA	BIOPROTA
主催および主な参加国	主催:EC 参加国:フランス, ベルギー, スペイン, 英国, ドイツ, チェコ	主催:EC 参加国:ベルギー, スペイン, 英国, ドイツ, スウェーデン, ハンガリー	参加国:フランス, 英国, スペイン, 日本, フィンランド, スウェーデン
目的	長期の連続的な気候変動が, 放射性廃棄物地層処分場の安全性に及ぼす影響を評価するための科学的根拠および実際の方法論を提供すること	BIOMASS のレファレンスバイオスフィア概念を適用することを前提として, 生物圏モデルの信頼性向上に資することを目的とした研究を行うこと	生物圏への放射線影響を評価する際の不確実性を取り扱うための議論を行うこと
プログラムの現状および検討成果	プロジェクトは完了済み。一部の報告書は作成中(未公開)	プロジェクトは完了済み。報告書は作成中(一部の発表文書を除く)	プロジェクトは継続中。現在も参加することは可能。
わが国の生物圏評価への適用	<p>① わが国の生物圏評価に連続的な気候変動を適用する場合の, より大きな地球規模スケールモデルから, わが国のレベルにスケールダウンする必要性や BIOCLIM の結果が十分にロバストであり, かつわが国にとって適切なものであるかどうかの確認検討が必要。なお, 欧州に関する多数の気候モデル開発結果は, 今後 150,000 年以内に, 完全氷河状態は生じないことを示している。この知見は, 今後の性能評価に関する重要な情報ソースとなりうる。</p> <p>② 気候変動による環境変化を性能評価に取り入れるための下記を含む高度化が期待される。</p> <ul style="list-style-type: none"> 気候変動に関する情報を生物圏システムの状態やその状態間での変遷に利用したランドスケープ変化の記述。 	<p>① レファレンスバイオスフィアの利用することにより, 十分に裏付けられた根拠のある方法で生物圏モデルを構築することが可能となる一方で, モデル構築の過程で主観的な決定を下す必要性が残っていることを認識することが重要である。</p> <p>② 公表予定の最終報告書をレビューすることが肝要である。例えば, 重要プロセスの数学的定式化は, 重要パラメータと合わせてレビューすることができる。さらに, BIOMOSA で示されている確率論的結果と決定論的結果とを, これまでの委託研究での生物圏検討で得られた結果と比較し, 類似点や相違点の理由を説明することも可能である。</p>	<p>① BIOPROTA の目的は, 生物圏評価にかかわるさまざまな情報を入手するという点で, 有用な情報源であると考えられる。このため, 今後も BIOPROTA の成果に関して注目し続けることで, わが国における現在の生物圏評価に関連のある諸問題が明らかとなり, 今後の研究に含めるべき内容の判断することが可能となる。</p> <p>② BIOPROTA で検討されている問題の一部は, これまでの生物圏評価研究においても検討されてきている。このことから, その進捗状況やその成果を踏まえたレビューや, 必要であれば, 新規知見を取り込んだ改良・補完のための作業が必要となると考えられる。</p>

表3.5-1 生物圏モデルに関する研究プログラムの現状の整理 (2 / 2)

研究プログラム	BIOCLIM	BIOMOSA	BIOPROTA
わが国の生物圏評価への適用(続き)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 生物圏システムの状態間の変遷特性を把握するための相互作用マトリクスの開発。 ・ 生物圏構成要素間での時系列的な関連性を視覚化するのに有用な方法である変遷図の作成。 <p>③ 気候変動による環境変化の状態はかなり進歩したとはいえ概念モデルや数学モデルにその変遷を取り込みさらに放射線学的な重要性を評価するには、さらに作業が必要であり、今後の継続あるいは同様のプロジェクトに注目しておく必要がある。</p> <p>④ BIOCLIM で開発された手法は、その他の人間あるいは地球規模での環境変化プロセスを含めて拡張する余地がある。わが国の隆起の重要性を考えると、これは特に関心が高い事象である。同様にこの手法は生物圏以外でも利用可能である。</p>	<p>③ 各サイトでのGBIに対する結果はサイト間での大きな違いを示している。したがって、GBIを取り扱う際には、サイト固有の情報を適切に評価し、解明する必要がある。</p> <p>④ 被ばく経路はサイト評価についてのベンチマークとして用いる経路については、多少の例外はあるものの汚染された飲料水の摂取が大多数の核種に対して線量が最大となる。</p> <p>⑤ わが国においては、現在まで、成人に対する線量のみを検討してきている。これに対して、BIOMOSA では成人と幼児の線量を算出しており、多くの核種で差異が見られた。一般的に、幼児あるいは乳児は、成人よりも放射線リスクの影響を受けやすいことは事実であり、今後策定されるセーフティケースにも影響すると考えられる。</p>	<p>③ BIOPROTA の複数のタスクでは、わが国の生物圏評価研究で利用されてきた AMBER コードが採用されている。このことから、AMBER が生物圏評価にとって有用なツールであり、今後もわが国の生物圏評価研究で AMBER を使用する際のコードの検証となると考えられる。</p>

4．おわりに

4．1 G B I の具体化に関する検討

本件では，一般的なサイト環境を対象とする場合に，昨年度開発した予備的 G B I 設定フローおよび抽出した調査項目の妥当性を確認し，必要に応じて改良を行うことを目的として，下記の検討を実施した。

諸外国における G B I 設定に関する調査および整理

わが国の典型的な環境パターンの設定

予備的 G B I 設定フローによる試行検討

G B I 設定手法への反映検討

この結果，より具体的な G B I 設定を行うためには，地質特性把握では詳細に実施されない可能性のある表層環境中の特性把握が重要であるとの結論が得られた。今後は，本検討で設定した仮想サイト環境モデルについて，表層環境について詳細に検討することを目的とした再設定を行うとともに，海外動向（BIOPROTA のタスク 7 や英国あるいはスウェーデンのモデル化事例）を考慮したモデル化手法の検討が必要であると考えられる。さらに，沿岸地域では特に気候変動による海水準の変動にともなう G B I への影響を考慮されることから，この影響を含めた長期的な変遷についても考慮すべきであると考えられる。

4．2 海外動向を考慮した生物圏評価技術に関する検討

諸外国の生物圏評価に関する研究枠組みに関して整理するとともに，特に生物圏モデルに関する研究プログラム（BIOCLIM，BIOMOSA および BIOPROTA）の最新動向を把握することを目的とした調査を実施し，その内容を整理した。さらに，各プログラムから得られる，わが国における地層処分の性能評価に有用と考えられる情報についても整理した。調査対象のプログラムは，現在も検討中あるいは現在のところその成果の一部は未公表であり，今後も適宜動向を把握しておく必要があると考えられる。

5 . 参考文献

【第1章】

IAEA : International Programme on Biosphere Modelling and Assessment Methods (BIOMASS) Themes for a New Co-ordinated Research Programme on Environmental Model Testing and Improvement, Theme 1: Radioactive Waste Disposal, Theme 2: Environmental Releases, Theme 3: Biospheric Processes, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. (1996)

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次とりまとめ 分冊3 地層処分システムの安全評価 ” , JNC TN1400 99-023, (1999)

【第2章】

“ Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Proposed Geologic Repository at Yucca Mountain ” , Nevada, Proposed rule 10 CFR Part 63

A. Wörman : “ Exchange processes at geosphere-biosphere interface - Current SKB approach and example of coupled hydrological-ecological approach ” , SSI rapport 2003:14(2003a)

A. Wörman et al. : “ Role of the Bio- and Geosphere Interface on Migration Pathways for Radionuclides and Ecological Effects ” , IHLRWM 2003, Las Vegas, NV, March 30 - April 2, 2003(2003b)

B. Miller et al. : “ Natural Elemental Concentrations and Fluxes: Their Use as Indicators of Repository Safety ” SKI Report 02:3, SSI report 2002:02(2002)

CRWMS M&O : “ Saturated Zone Flow and Transport Process Model Report ” , DR-NBS-HS-000001 REV 00 ICN 01. Las Vegas, Nevada (2000a)

JNC TJ 8400 2004-006

CRWMS M&O : “ Biosphere Process Model Report ” , TDR-MGR-MD-000002 REV 00
ICN 01. Las Vegas, Nevada (2000b)

CRWMS M&O : “ Input and Results of the Base Case Saturated Zone Flow and
Transport Model for TSPA ” , ANL-NBS-HS-000030 REV 00. Las Vegas, Nevada :
CRWMS M&O. ACC : MOL.20000526.0330(2000c)

DOE : “ Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain ” , DOE/RW-0508,
December 1998, (1998)

DOE : “ Hydrogeologic Framework Model for the Saturated-Zone Site-Scale Flow and
Transport Model ” , ANL-NBS-HS-000033 REV 00, ICN 01(2000)

DOE : “ Yucca Mountain Science and Engineering Report ” , DOE/RW-0539-1(2002)

D. Walker et al. : “ Summary of hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and
Ceberg ” , SKB Technical Report, TR-97-23 (1997)

G. Parkin, et al. : “ A physically based approach to modelling radionuclide transport
in the biosphere ” , J. Radiol. Prot. 1999 Vol.19 No4 319-331(1999)

IAEA : “ "Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal, Report of
BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSEssment (BIOMASS)
Programme ” , IAEA-BIOMASS-6(2003)

M. Lindgren and F. Lindström : “ SR 97 - Radionuclide transport calculations ” SKB
Technical Report, TR-99-23 (1999)

N.A. Chapman et al. : “ Geological Environments for Deep Disposal of Intermediate
Level Wastes in the United Kingdom ” IAEA-SM-289/37(1986)

Nirex : “ The Geology and Hydrogeology of the Sellafield Area. Volume 3, Hydrogeology ” , Nirex Report 524(1993)

Nirex : “ Nirex 95 : A Preliminary Analysis of the Groundwater Pathway for a Deep Repository at Sellafield, Volume 3 - Calculations of Risk ” , Nirex Science Report S/95/012(1995a)

Nirex : “ Nirex biosphere research : report on current status in 1994 ” , Nirex Science Report S/95/003(1995b)

Nirex : “ Nirex 97 - An Assessment of the Post-closure Performance of a Deep Waste Repository at Sellafield ” , Nirex Science Report S/97/012(1997)

NAGRA : “ Project Opalinus Clay - Safety Report - Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis) ” , NTB-02-05(2003)

SKB : “ Deep repository for spent nuclear fuel SR 97 - Post-closure safety ” , SKB Technical Report, TR-99-06(1999)

SKB : “ Planning report for the safety assessment SR-Can ” , SKB Technical Report TR-03-08(2003a)

SKB : “ A descriptive ecosystem model - a strategy for model development during site investigations ” , SKB Technical Report R-03-06(2003b)

S. Nordlinder et al. : “ Ecosystem specific dose conversion factors for Aberg, Beberg and Ceberg ” , SKB Technical Report TR-99-15 (1999)

U. Bergström et al. : “ Models for dose assessments - Modules for various biosphere types ” , SKB Technical Report, TR-99-14 (1999)

核燃料サイクル開発機構 : “ 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 - 平成 14 年度報告 - ” , JNC TN1400 2003-004, (2003)

環境省 : “ 大気・水・環境負荷分野の環境影響評価技術検討会中間報告書 ” (2002)

建設産業調査会 : 改訂 地下水ハンドブック (1998)

国土交通省 : 平成 15 年版 土地白書 (2003)

国土交通省 : 土地分類基本調査

国土交通省 : 平成 14 年度版 日本の水資源 (2003)

国土庁長官官房総務課 : 国土統計要覧 (1993)

原子力発電環境整備機構 : 処分場の概要 (2002)

日本ネット : 自治体インデックス(<http://www.nihon.net/jichi/index.html>)

日本水道協会 : 水道のあらまし (1993)

三木崇史, 他 : “ 地層処分安全評価における生物圏評価手法の高度化に関する検討() ” , 核燃料サイクル開発機構業務委託報告書(日揮株式会社), JNC TJ8400 2003-017, (2003)

【第3章】

BIOCLIM : “ Development and Application of a Methodology for Taking Climate-Driven Environmental Change into Account in Performance Assessments ” , Work

Package 4, Draft Deliverable D10 – 12(2003)

BIOMOVS II : “ Development of a Reference Biospheres Methodology for Radioactive Waste Disposal ” , BIOMOVS II Technical Report No. 6, published on behalf of the BIOMOVS II Steering Committee by the Swedish Radiation Protection Institute, Sweden (1996)

BIOPROTA : “ Key Issues in Biosphere Aspects of Assessment of the Long-term Impact of Contaminant Releases Associated with Radioactive Waste Management: First Year Progress Report (October 2002 – September 2003). ” , Version 1.0, Draft, November 2003(2003)

D. Savage (ed.) : The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste, John Wiley & Sons (1995)

D. Texier et al. : “ Modelling Sequential BIOSphere Systems under CLIMate Change for Radioactive Waste Disposal. Project BIOCLIM ” , IHLRWM 2003, Las Vegas, NV, March 30-April 2, 2003.(2003)

E. Leclerc-Cessac and G.M. Smith : “ BIOPROTA: International Collaboration on Key Technical Issues in Biosphere Aspects of Long-Term Radiological Assessment ” , IHLRWM 2003, Las Vegas, NV, March 30-April 2, 2003. (2003)

G.M. Smith et al. : “ Perspectives on Dosimetric Uncertainties and Radiological Assessments of Radioactive Waste Management. ” , In Proc. Int. Conf. on Low Doses of Ionizing Radiation: Biological Effects and Regulatory Control, Seville, IAEA-TECDOC-976, International Atomic Energy Agency, Vienna(1997)

IAEA : “ “Reference Biospheres” for Solid Radioactive Waste Disposal: Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSessment (BIOMASS

Programme) ” , IAEA-BIOMASS-6, International Atomic Energy Agency, Vienna(2003)

NEA : “ Working Group on Biosphere Analysis in Repository Assessments: The case for benchmark biospheres and de-coupling of biosphere and EBS/geosphere analyses ” , NEA/PAAG/DOC(98)6(1998)

P. Pinedo et al. : “ Preliminary results from the EC Project: Assessment Biospheres and Dose Variability for European Sites: BioMoSA' Reference Biosphere Investigation ” , IHLRWM 2003, Las Vegas, NV, March 30-April 2, 2003. (2003)

三木崇史, 他 : “ 地層処分安全評価における生物圏評価手法の高度化に関する検討() ” , 核燃料サイクル開発機構業務委託報告書(日揮株式会社), JNC TJ8400 2002-009, (2002)

三木崇史, 他 : “ 地層処分安全評価における生物圏評価手法の高度化に関する検討() ” , 核燃料サイクル開発機構業務委託報告書(日揮株式会社), JNC TJ8400 2003-017, (2003)