

**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(III)
(研究概要)**

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003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大字村松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)
2003

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(III)

(研究概要)

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

三木崇史* 池田孝夫*

要旨

本研究では、地質環境と生物圏とのインターフェイス(GBI)の設定手法、処分施設に含有される化学毒性物質の影響評価、気候変動を考慮した生物圏モデルについて検討した。

GBIの設定手法に関する検討では、諸外国におけるGBI設定手法に関する文献調査結果を参考に、わが国におけるGBIの設定手順フローを作成した。さらに、GBI設定に必要な調査項目および調査手法について整理した。

処分施設に含有される化学毒性物質の影響評価では、HLW処分施設に含有される化学毒性を有する物質について、影響評価を行い、生物圏における化学物質の濃度はわが国の環境基準と比較して十分小さくなることがわかった。

気候変動を考慮した生物圏モデルについては、諸外国および国際機関での気候変動の取り扱い方について調査し、わが国における気候変動を考慮した生物圏評価のアプローチ方法について検討した。

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。

機構担当部課室： 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 (III)
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

Takahito Miki* and Takao Ikeda*

Abstract

This report contains results on study of method of identification of Geosphere-Biosphere Interface (GBI), toxicological impact of non-radioactive contaminants contained in radioactive waste disposal facility and consideration of climate change in long-term biosphere assessments.

Regarding study of method of identification of Geosphere-Biosphere Interface (GBI), flowchart for GBI identification was developed based on the results of literature survey. And items and techniques of site survey for GBI identification were summarized.

With regard to study of toxicological impact of non-radioactive contaminants contained in radioactive waste disposal facility, toxicological impact assessment of non-radioactive contaminants included HLW geological disposal facility was carried out, and it is confirmed that the concentrations of toxic materials which were originated from disposal facility will be enough lower than Japanese environmental standards.

Regarding consideration of climate change in long-term biosphere assessments, a review of relevant information from a range of countries and international organization was carried out, and an approach for consideration of the effects of climate change within the Japanese HLW disposal safety programme was developed.

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. 具体的な地質環境が与えられた場合の GBI の設定手法に関する検討.....	3
2.1 諸外国における GBI の設定手法.....	3
2.2 GBI の設定手順の検討.....	11
2.3 検討のまとめと今後の課題.....	19
3. 放射性廃棄物に含有される非放射性物質の化学毒性影響に関する評価.....	21
3.1 諸外国における評価事例の調査.....	21
3.2 評価対象物質の選定.....	24
3.3 化学毒性物質の物質移行解析.....	28
3.4 考察および今後の課題.....	31
4. 気候変動を考慮した生物圏モデルに関する検討.....	34
4.1 諸外国における気候変動に対する考え方に関する調査.....	34
4.2 BIOCLIM での検討状況に関する調査.....	40
4.3 わが国における気候変動を考慮した生物圏評価のアプローチの検討.....	44
4.4 検討のまとめ.....	48
5. おわりに.....	51
5.1 具体的な地質環境が与えられた場合の GBI の設定方法に関する検討.....	51
5.2 放射性廃棄物に含有される非放射性物質の化学毒性影響に関する評価.....	51
5.3 気候変動を考慮した生物圏モデルに関する検討.....	52
6. 参考文献.....	53

表目次

表 2-1	地下水シナリオにおける GBI の設定事例のまとめ	8
表 2-2	調査項目と調査方法	15
表 2-3	具体的な環境毎の調査項目の対比表	20
表 3-1	評価対象として選定された元素	27
表 4-1	調査の対象とした国及び国際機関	35
表 4-2	諸外国の安全要件における気候変動の取扱い	38

図目次

図 2-1	Yucca Mountain での処分場から放出された核種が生物圏へと到達する までの概念図	4
図 2-2	Nirex-97 での局所的な環境でのコンパートメントモデルの一般的な構 成	5
図 2-3	局所モデルを用いたパーティクルトラッキングの解析結果	6
図 2-4	放出域の評価例 (Aberg での放出点の評価結果)	7
図 2-5	GBI 検討フロー	14
図 3-1	評価対象のスクリーニングフロー	25
図 3-2	人工バリアからの核種移行率	29
図 3-3	母岩からの核種移行率	29
図 3-4	基本ケースにおける各媒体中での各元素のピーク値と基準値	32
図 4-1	生物圏評価において気候変動の影響を考慮するための一般的なアプロ ーチ	50

1. はじめに

第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999）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、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て生物圏評価モデルを構築した。第2次取りまとめ以降は、さらにデータ選定についてプロトコルを作成し、信頼性と透明性を確保し、かつ効率的に生物圏評価に使用するパラメータを設定する手法を構築した（吉田 他, 2001）。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如何に反映させるかについて検討する必要がある。特に、地圏と生物圏との境界域（Geosphere-Biosphere Interface, 以下 GBI と略する）は評価結果に大きな影響を及ぼし、かつサイトの状況に依存するため、その設定手法については重要な課題であるといえる。昨年度実施した地質環境と生物圏とのインターフェイスの具体化の検討では、地下水を介して放出するケースについて、生物圏評価におけるデータ取得とモデル化に関するフローチャートを作成した（三木 他, 2002）。しかしながら、このフローチャートは概念的なものであるため、より具体的なモデル化手法およびデータ取得手法について検討する必要がある。

また、第2次取りまとめの安全評価では、人間への放射線学的な影響について評価している。一方、放射性廃棄物中には、非放射性物質であっても化学的な毒性を有する物質も含有されている。諸外国においてはこれらの化学毒性を有する物質の影響について評価されている例もあるが、わが国においては評価例は極めて少なく、地層処分される廃棄物の放射線学的影響に限らず包括的な安全性を議論するためには、定量的にその影響の程度を把握することが重要な課題であるといえる。

さらに、現在、欧州においては、気候変動を考慮した生物圏評価手法に関する検討が、国際的な共同研究プログラムにより進められている(BIOCLIM, 2000)。これは、諸外国において安全要件として長期的な気候変動を考慮した評価が求められていることが背景にある。一方わが国においては、地層処分に対する明確な安全要件は提示されてはいないものの、将来的に諸外国と同様に気候変動を考慮した評価が必要となる可能性がある。過去の研究においては、気候変動を考慮した評価として、ツンドラ気候および冷帯気候を想定した評価モデルが開発されているが、これらは気候状態を離散的に取り扱ったものであり（加藤 他, 2001）、氷期サイクル等のダイナミック

な気候変動は考慮されておらず ,わが国においてもより詳細な評価が要求される可能性はある。

以上のことから ,本研究においては ,地層処分における生物圏評価の信頼性を向上させることを目的として ,具体的な地質条件が与えられた場合の G B I の設定手法 ,気候変動を考慮した評価モデルおよび放射性廃棄物中に含有される非放射性物質の化学毒性の影響について検討を行った。

2. 具体的な地質環境が与えられた場合の GBI の設定手法に関する検討

生物圏評価では、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如何に反映させるかについて検討する必要がある。特に、地圏と生物圏との境界域(Geosphere-Biosphere Interface, 以下 GBI と略する) は評価結果に大きな影響を及ぼし、かつサイトの状況に依存するため、その設定手法については重要な課題であるといえる。

そこで本検討では、まず国内外における地下水および地表水の流動に関する評価手法、ならびに GBI 決定プロセスにおけるこれらの利用方法について文献調査を行い、それを参考に具体的なモデル化手法およびデータ取得手法について検討した。

2.1 諸外国における GBI の設定手法

本検討では、まず諸外国における GBI の設定手法について調査した。調査の対象は、以下のとおりとした。

- BIOMASS
- Yucca Mountain (米国)
- NIREX-97 (英国)
- SAFIR-2 (ベルギー)
- SR-97 (スウェーデン)

以下に、その詳細を記述する。また、文献調査結果の概要を表 2-1 にまとめる。

2.1.1 BIOMASS (国際機関) における GBI 設定に対する考え方

BIOMASS プログラム(BIOMASS, 2001a : 2001b : 2001c)では、環境への予想外のあるいは継続的な核種放出、及び固体廃棄物の管理に関連した放射線学的問題に取り組んでいる。このうち Theme 1 (放射性廃棄物処分) では、“ レファレンスバイオスフィア ” の概念を、放射性廃棄物処分場の長期安全性評価に適用するための実際的システムへと発展させることを目的とした検討がなされており、その中で、生物圏評価における GBI の設定は重要であるが、サイトスペシフィックであること、また、時間変化をするものであることから、予測が困難であり、その設定には不確実性が伴うことを述べている。

2.1.2 諸外国での生物圏評価における GBI 設定に対する考え方

(1) Yucca Mountain (米国)

Yucca Mountain の実現可能性評価 (Viability Assessment for a Repository at Yucca Mountain) (DOE , 1998a : 1998b) における生物圏評価では , Yucca Mountain 処分場から放出した核種は , 不飽和域を通過して , 下方にある地下水面へと移行していくと考えられているため , 処分場性能の全体的な評価を行う際には , 飽和域を通過する核種移行及び地下水流動を理解することが重要であるとしている。地下水流動解析等の結果から , Yucca Mountain サイトの下にある帯水層の地下水は北から南へと流れていることがわかり , また , 地下水流動方向にある Yucca Mountain の最も近くの居住者は , Amargosa Valley の共同体に住んでいる。このため , もし放射性核種が Yucca Mountain の地下水へ放出された場合 , 地下水流動により , 核種の一部は , 時間の経過と共にこの地域の南方向へと拡がっていくことが示されている。

Yucca Mountain の実現可能性評価では , 被ばく経路について , site-specific な評価を実施し , 処分場から標準人へ核種が到達し得る唯一の経路は , 汚染井戸水であると仮定している (図 2-1) また , 標準人は , すべての飲料水を核種の最高濃度地点にある井戸から飲用するものと仮定している。さらに , 自然湧水する地表水はないと仮定している。

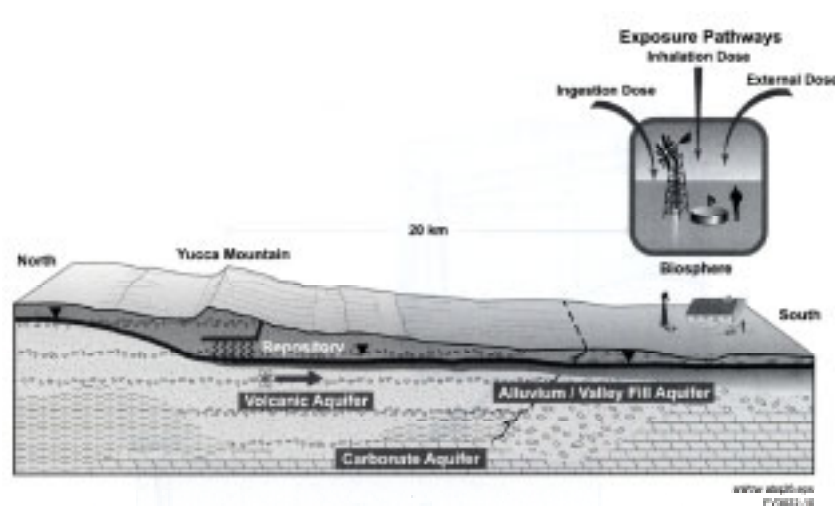


図 2-1 Yucca Mountain での処分場から放出された核種が生物圏へと到達するまでの概念図 (DOE, 1998b)

(2) Nirex-97 (英国)

Nirex-97(NIREX, 1997)では、水の流れを理解することと、これら水の流れを適切なモデルで表す方法について特に詳細な検討を行っている。具体的には、Sellafield 周辺の地質特性及び水理学的特性を明らかにし、広域スケールでの3つの地下水流動モデルを開発している。これらモデルを利用して、処分場からの地下水流路をシミュレートし、処分場を通過し、生物圏へと流入する地下水フラックスや地表近傍の地下水中の核種濃度を算出している。さらに、Nirex-97では処分場の位置を一般的な内陸サイトに想定しているため、生物圏における放射線影響は、土壌や地表にある水媒体への処分場起源核種による“自然放出(Natural Discharge)(すなわち、土壌、地表水への排出)”，もしくは処分場から発生した核種によって汚染された“井戸水の揚水”の結果、起こる可能性があるとしている(図 2-2)。さらに、氷河及び周氷河期といった気候変動を考慮した場合には、湖沼に流入することも検討している。

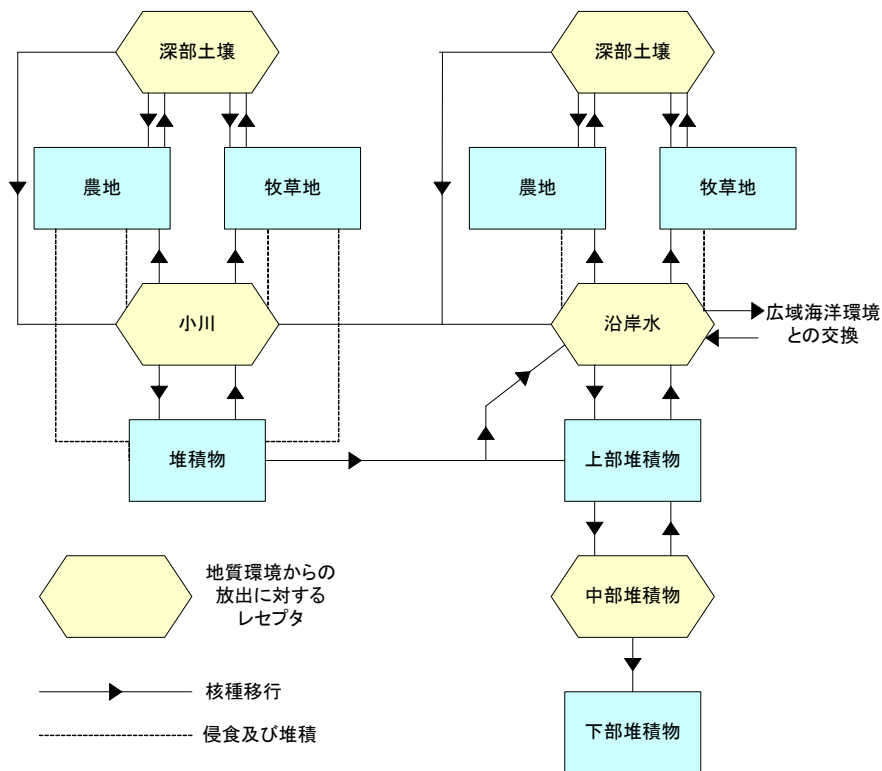


図 2-2 Nirex-97 での局所的な環境でのコンパートメントモデルの一般的な構成

(3) SAFIR2 (ベルギー)

SAFIR 2(ONDRAF/NIRAS, 2001)では、核種移行計算に直接用いるための水理モデルを作成している。水理モデルは、広域モデル、準広域モデル、局所モデルの3つのスケールで作成されている。これらモデルのうち局所モデルでは、水頭の分布が求められ、パーティクルトラッキング(図 2-3)を行い、水の移行経路の流出点を確認されている。図 2-3 より、全てのパーティクルは、Kleine Nete の方向、Kleine Nete またはその支流と合流する北もしくは北北西方向へと向かっていることを示し、その流出ゾーンは、レファレンスサイトから 8 km 以内とされている。以上の結果から、核種が生物圏に達する位置 (GBI) が、生物圏条件が一定の場合の通常シナリオでは、生物圏の‘レセプタ’を、井戸、小川、河川、沼および土壌(植物の根元)と設定されている。

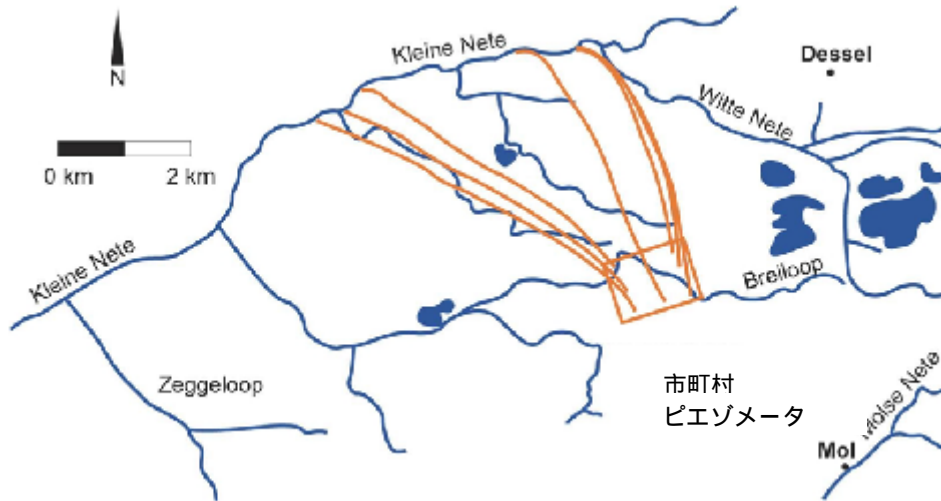


図 2-3 局所モデルを用いたパーティクルトラッキングの解析結果

(ONDRAF/NIRAS, 2001)

(4) SR-97 (スウェーデン)

SR-97 (SKB, 1999)では、3箇所の仮想の処分施設に対して、地下水流動解析および生物圏に関する詳細な調査を行うことにより GBI が設定されている。

核種の放出点の予測については、処分施設を仮定して particle tracking により核種の放出点を評価している (図 2-4)。

GBI の設定では、不確実性を考慮して Reasonable なケースと Pessimistic なケースの2種類を設定している。Reasonable なケースの GBI は、それぞれの仮想サイトの解析結果のうち、最も放出点が多かったところと井戸をモジュールとした場合の結果と比較して選定している。Pessimistic なケースでは、井戸、泥炭および農耕土のモジュールのうち、最も線量への換算係数が大きくなるモジュールを選択している。

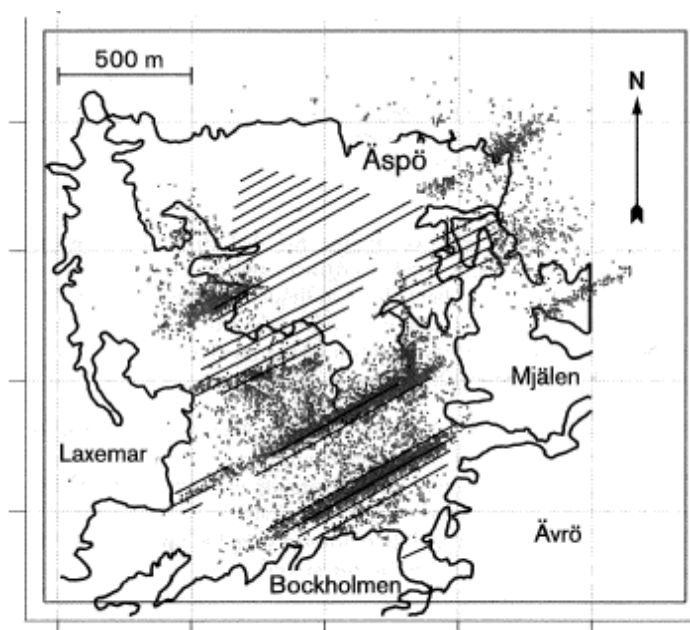


Figure 9-16. Exit points for Aberg's base case. Repository tunnels at -500 m.a.s.l. are shown projected on the surface.

図 2-4 放出域の評価例 (Aberg での放出点の評価結果) (SKB, 1999)

表 2-1 地下水シナリオにおける GBI の設定事例のまとめ (1/3)

	米国 (Yucca Mountain)	英国 (Nirex-97)	スウェーデン (SR-97)	ベルギー (SAFIR2)
GBI (Receptor)	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動方向にある居住区の井戸 	<ul style="list-style-type: none"> 井戸 Natural discharge 	<ul style="list-style-type: none"> 井戸 河川 泥炭地 	<ul style="list-style-type: none"> 井戸 小川 河川 土壌
設定根拠	<ul style="list-style-type: none"> 自然湧水する地表水はなく、井戸水が唯一の経路となり得る 	<ul style="list-style-type: none"> 特定の放出点は設定されておらず、一般的な放出点として、井戸及び土壌・地表水への排出 (Natural Discharge) を設定 	<ul style="list-style-type: none"> Reasonable なケースでは最もパーティクルの放出が多かったモジュールを選択 Pessimistic なケースでは線量への換算係数が最も大きくなるモジュールを選択 	<ul style="list-style-type: none"> 小川、河川については水理解析および Particle Tracking の結果から流出域を選定、沼については核種の侵入は最小と予想されるため考慮しない。 土壌については、根が帯水層に到達しているため考慮する。

表 2-1 地下水シナリオにおける GBI の設定事例のまとめ (2/3)

	米国 (Yucca Mountain)	英国 (Nirex-97)	スウェーデン (SR-97)	ベルギー (SAFIR2)
設定の参考とした解析	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動解析 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動解析(2次元連続多孔質媒体モデル, 3次元連続多孔質媒体モデル, 3次元亀裂ネットワークモデル) 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動解析(3次元有限差分法)(Particle Tracking) 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動解析 (Particle Tracking)
設定の参考とした取得データ	<ul style="list-style-type: none"> 地下水面標高 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水性状(淡水・塩水) 	<ul style="list-style-type: none"> 地表の土地利用 	<ul style="list-style-type: none"> 圧力水頭
地理的条件	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位が低い。 自然湧水がない。 他の水系から独立している。 	<ul style="list-style-type: none"> 候補処分場の深さの地下水は塩水である。 水頭圧の差から、潜在的に上昇流がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂がある場合は放出点が亀裂に依存する。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分サイトの及ぼす影響範囲は小さく、レファレンスサイトと Kleine Nete 川の間にある。

表 2-1 地下水シナリオにおける GBI の設定事例のまとめ (3/3)

	米国 (Yucca Mountain)	英国 (Nirex-97)	スウェーデン (SR-97)	ベルギー (SAFIR2)
地表付近の水 の流れの考慮	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位が低いことを確認している。 自然湧水が無いことを確認している。 	<ul style="list-style-type: none"> 地表近くでの核種の分布状況については、詳細なモデルを作成して解析を実施している。 (SHETRAN-UK) 	<ul style="list-style-type: none"> 泥炭等の湿地が地下水放出へ影響を及ぼすことに注意している。 	<ul style="list-style-type: none"> GBI 設定時に植物が帯水層に達していることを考慮している。
不確実性の取 り扱い	<ul style="list-style-type: none"> 一部の重要なパラメータについては確率分布を定義して解析を実施。 代替ケースとして、2種類の気候状態を考慮した解析を実施。 	<ul style="list-style-type: none"> 対象エリアへの流入割合及び対象エリアの面積については、感度解析的な評価を実施。 寒帯及び周氷河気候では、地上での Natural Discharge のみを考慮。 	<ul style="list-style-type: none"> 解析結果の不確実性を考慮して、Reasonable ケースと Pessimistic ケースを設定。 長期的な気候変動については安全性に影響がないことを別途検討。 	<ul style="list-style-type: none"> 代替シナリオとして、気候変動の影響を考慮したシナリオが検討されている。生物圏評価においてはフラックスは変わるが、GBI は井戸及び河川である。

2.2 GBI の設定手順の検討

ここでは、諸外国における GBI 設定に関する文献調査結果を参考に、わが国における GBI の設定手順について検討する。

2.2.1 不確実性への対応

生物圏評価の場合、評価アプローチの基本条件として、長期にわたる評価に対する生物圏システムの同定のための原則を定める必要がある。これは GBI の設定においても重要である。このような場合では、様々な変動を考慮に入れ、より保守的な GBI の設定に変更されることが予想される。そのために、生物圏評価を行う前に、時間的な不確実性に対する考え方(例えば評価期間)を明確にしておく必要がある。

本検討においては、まずは、現在の生物圏及び地圏環境が継続することを想定した評価に重点を置き、これをベースにして、隆起・侵食、気候・海水準変動に関する情報を収集し、対象となる地域における将来的な変動を想定した場合の変化を検討することが適切であると考えられる。

2.2.2 前提条件が GBI 設定に及ぼす影響

GBI は、評価の前提条件によって、大きく異なる可能性がある。BIOMASS (BIOMASS, 2001a) において構築されたレファレンスバイオスフィアの方法論では GBI は前提条件のひとつであるが、他の条件の影響を受けると考えられる。例えば評価目的であれば、安全審査を目的とするなら、詳細で保守的な評価を行うと考えられるが、人工バリアや天然バリアの性能の比較といった場合では、より簡素で単純な評価で十分である。そのような場合は GBI も大きく異なる可能性がある。また、将来の人間社会に関する仮定についても、将来の人間の生活様式の変化までを考慮する場合は、現在の被ばくグループよりも様々な被ばくグループや被ばく経路を範疇に入れる必要がある。

2.2.3 GBI 検討フロー

以上までの検討をもとに GBI 設定の検討フローを検討した(図 2-5)。

本検討では、空間的な不確実性について配慮した。つまり、既往の評価事例および現状の地下水流動の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ると考えられる。そのため、比較的多数の GBI 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 GBI あるいは保守的な GBI を選択することが妥当であると考えられる。

2.2.4 調査項目に関する検討

地下深部における地下水流動特性の把握、および地表付近の水収支を把握・評価するためには、以下の項目について調査し、各々の特性を明らかにする必要がある。

- 地形・地質分布および地質構造
- 地盤の水理・物理・化学特性
- 地下水賦存状況および流動状況
- 地下水涵養量
- 地下水利用実態
- 水収支
- 水質
- 海洋環境

これらの把握するためには、それぞれいくつかの調査手法が考えられる。主な調査手法は以下のとおりである。

- 予備調査（文献調査 - 文献その他の資料による既存情報の整理）
- 地形・地質調査（地形・地質分布・地質構造のほか、地盤の水理定数 - 透水係数・貯留係数・有効間隙率等を含む）
- 地下水位調査（地下水位・水圧分布等）
- 地下水流動調査（流向流速・流量）
- 水文調査（地表水の流量・水位観測等）
- 地下水涵養量調査（降水量・蒸発散量等）
- 水質調査（地下水の年代・水質等）
- 土地利用調査
- 地下水利用実態調査
- 海洋調査・海洋計測

調査項目と調査手法の関係を表 2-2 にまとめる。

また、GBTZ の F E P（三木 他, 2002）のうち、地下水による生物圏への移行

に関連する FEP については、いずれかの調査項目によってカバーされており、当該 F E P の取捨に必要な情報はある程度入手可能であるといえる。しかしながら、対象となる地域の複雑さ、あるいは調査の詳細さの限界および長期的な変動に関する不確実性が障害となり、これらのすべての FEP の取り扱い方法を明確にすることは困難である。そのため、GBTZ を設定するために、評価の保守性を考慮して、取り扱いが不明確であり、かつ重要であると考えられる FEP を包含する設定となるように注意する必要があると考えられる。

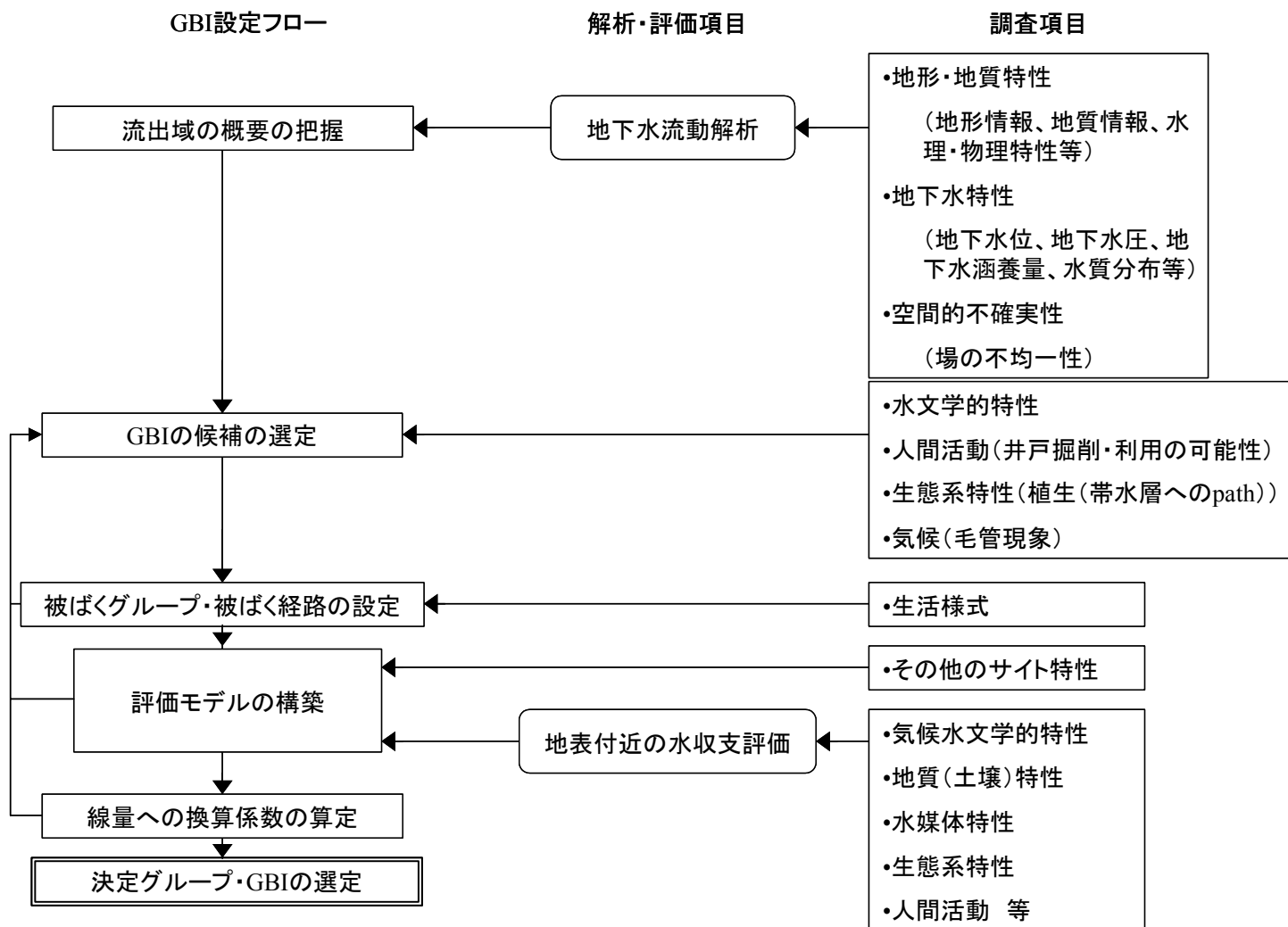


図 2-5 GBI 検討フロー

表 2-2 調査項目と調査方法

	地形地質分布及び地質構造	地盤の水理・物理・化学的特性	地下水賦存及び同流動状況		地下水涵養量	地下水利用実態	水収支	水質	海洋環境
			飽和体	不飽和体					
予備調査									
地形・地質調査									
地下水位調査									
地下水流動調査									
水文調査									
地下水涵養量調査									
水質調査									
土地利用調査									
地下水利用実態調査									
海洋調査・海洋計測									

2.2.5 調査方法の検討

以下に、表 2-2 に示した調査手法について、それぞれ概説する。

(1) 予備調査

予備調査は、調査地域周辺の既存情報を収集・整理し、本調査の効率的な実施に資することを目的とする。

調査の対象としては、以下の項目が挙げられる。

- 地形・地質
- 土地利用・植生
- 気象・水文
- 地下水

また、なるべく信頼性の高い資料を使用することが重要である。

(2) 地形・地質調査

地形調査は、地形面から地下水流動系を推定するとともに、土地利用の実態から水の利用、表流水の浸透・涵養あるいは地下水の湧出の状況を把握し、地下水と地表水の収支との関係を検討するために実施する。

地質調査は、地下水を保持する媒体としての地層の空間的分布と構造、およびその水理特性を把握し、地下水の賦存状況、流動状況を明らかにすることを目的とする。調査項目としては、地形、地質・地質構造および地層の水理的性質が挙げられる。

(3) 地下水位調査

地下水位調査は、地下水位の空間分布および経時変化を把握し、地下水の賦存・流動機構を明らかにするために実施する。地下水位調査には、大きく分けて一斉観測と長期観測の2種類ある。一斉観測は、その地域の地下水体の賦存状況や地下水の動態を知るための観測である。長期観測では、降水、河川水位、潮汐、気圧、地震等の自然的要因、あるいは地下水の揚水、かんがい、土木工事等の人為的要因による地下水位の変動を把握するために実施される。

(4) 地下水流動調査

地下水の流動調査は、地下水の流れを水循環の一環としてとらえ、涵養域 - 流動域 - 流出域という空間的な広がりの中で地下水流動の実態を解明することを目的としている。地下水流動の調査方法としては以下のものが挙げられる。

- 地下水ポテンシャルの測定
- トレーサの利用（環境同位体，水質，人工トレーサ）
- 地下水温を用いた調査地下水追跡調査
- 孔内流向・流速測定

(5) 水文調査

水文調査は、水循環の量的把握に必要な資料を得ることを目的とし、水文気象、表流水流量、蒸発散量、土壌水分等の項目について実施する。

水文調査（観測）は、河川管理、国土の実態調査、気象業務等の一環として建設省、気象庁、地方自治体等で広く実施されており、これに関連して各種の法規や技術基準が存在する。また、既存のデータとの互換性への配慮あるいは既存のデータの有効利用を考えるうえでは、これらの関連法規あるいは技術基準は重要となる。

(6) 地下水涵養量調査

地下水涵養量調査は、気象条件、地盤条件等から把握する。地下水涵養量を把握する手法には以下のものがある。

- 地表面の水収支から求める方法
- 土壌水分を測定する方法
- ライシメータによる方法
- トレーサを利用する方法

(7) 水質調査

水質試験は、地下水・表流水の水質の把握および地下水の涵養・流動機構の解明を目的として実施される。水質の時間的・空間的な変化を明らかにすることによって、その地域の地質や地下水の循環機構を解明する手がかりが得られる。

(8) 土地利用調査

土地利用調査は、土地利用の実態から水の利用、表流水の浸透・涵養あるいは地下水の湧出の状況を把握し、人間活動と地下水・地表水の収支との関係を検討するために実施する。

(9) 地下水利用実態調査

地下水利用実態調査は、地下水利用施設の分布、構造、地下水利用料を把握し、地下水賦存・流動状況の検討、水収支解析の検討を行うことを目的として実施する。

(10) 海洋調査・海洋計測

海水による希釈水量を評価するためには、海水の流動状況を把握する必要がある。評価に必要なデータとして、以下のものが挙げられる。

- 海底地形
- 潮流（流速，流向）
- 水位変化
- 水温
- 塩分

2.2.6 具体的な環境に応じた調査項目・調査手法に関する検討

(1) 具体的な環境に応じた調査項目に関する検討

わが国の地形は多様性に富んでおり、そのため、評価の対象となる地域によって調査項目が異なる可能性がある。ここでは、具体的な環境に応じて調査項目が変更しうるかどうかを検討した。検討の結果得られた、分類した具体的な環境に対する調査項目の対比表を表 2-3 に示す。表では、内陸部・淡水域・堆積岩を基本ケースとして、調査項目に変更があると考えられるものについて印を付けている。これより、本検討において分類した具体的な環境については、どの具体的な環境に対しても不必要となる調査項目はないと考えられるが、調査項目が追加されたり、相対的な重要度が変化すると考えられる。

(2) 具体的な環境に応じた調査方法に関する検討

上記に示すとおり調査項目はどの環境においても同じであっても、調査方法はその具体的な環境条件によって異なる場合があると考えられる。例えば、同じ地下水流動量という調査項目であっても、帯水層の種類によりその取得方法が異なることがわかる。このようなデータ以外にも、調査対象とする場所の特徴に適したデータの取得方法を使用することが重要となると考えられるが、わが国の地形は多様であるために、場所が特定された後に詳細な調査方法について検討する方が効率的であると考えられる。

2.3 検討のまとめと今後の課題

表 2-2 に示した調査項目は、大きく分類したものであるため、どのような具体的な環境においても、これらの調査項目は共通であるといえる。しかしながら、それぞれの調査の詳細については、調査の対象となる地域の特徴によって異なると考えられる。例えば、亀裂を多く含むような地質媒体が地表付近まで存在する場合は、亀裂の分布状況や亀裂による地下水流動への影響等についても調査する必要がある。また、沿岸部では、密度流の影響が大きくなると考えられるため、水質の分布に対してより慎重に行う必要がある。また、同じ調査項目であっても、評価対象地域の環境に適した調査方法を選択する必要がある。

今後は、本検討で開発した GBI 設定フローおよび抽出した調査項目の妥当性を確認し、必要に応じて改良する必要がある。

表 2-3 具体的な環境毎の調査項目の対比表

具体的な条件			地形地質分布および地質構造	地盤の水理・物理・化学的特性	および流動状況		地下水涵養量	地下水利用実態	水収支	水質	海洋環境
					飽和体	不飽和体					
内陸部	淡水域	堆積岩 (割れ目が無い場合)									
		結晶質岩 (割れ目がある場合)	*1	*1							
沿岸部	淡水域	堆積岩 (割れ目が無い場合)								*2	
		結晶質岩 (割れ目がある場合)	*1	*1						*2	
	海水域	堆積岩 (割れ目が無い場合)				*3		*3	*3	*2	*4
		結晶質岩 (割れ目がある場合)	*1	*1		*3		*3	*3	*2	*4

*1: 割れ目に関するデータを取得する必要がある。

*2: 塩淡境界を把握するために水質分布を十分調べる必要があるため、ボーリングの位置あるいは量が内陸部の場合とは異なると考えられる。

*3: 核種は海水域に放出されると考えられるため、相対的に淡水の水収支を把握することの重要度が低い。

*4: 核種は海水域に放出されると考えられるため、海洋での核種の拡散に関する情報を詳しく調べる必要がある。

3. 放射性廃棄物に含有される非放射性物質の化学毒性影響に関する評価

第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構, 1999）の安全評価では、人間への放射線学的な影響について評価している。一方、高レベル放射性廃棄物中には、非放射性物質であっても化学的な毒性を有する物質も含有されている。そこで本検討では、わが国の高レベル放射性廃棄物に含有される化学毒性を有する物質が、人間に対して及ぼす影響の大きさについて、定量的な評価を行った。

3.1 諸外国における評価事例の調査

ここでは、まず、諸外国においてはこれらの化学毒性を有する物質の影響について評価されている例について調査し、その知見を整理した。調査の対象とした国は以下の7カ国である。

- ・カナダ
- ・ベルギー
- ・フィンランド
- ・スウェーデン
- ・スイス
- ・ドイツ
- ・英国

3.1.1 カナダ

カナダの環境影響評価書（EIS : environmental impact statement）(AECL, 1994)では、処分場の操業段階及び閉鎖後段階における化学物質放出による環境影響に関する検討が実施されている。EISでの評価対象元素として、AECLは、Goodwin and Mehta (1994)のスクリーニング研究に基づいて選定された8元素（Cr, Se, Br, Mo, Cd, Sb, Cs, Tc）に、別の先行研究において重要とされたSmを加えた9元素を選定している。

解析は放射性物質と同様のモデルを用いて行い、濃度評価は10万年にわたって行っている。濃度が最大と見積られたのはBrである。次に濃度が高いのはSbであるが、Brよりも数桁低い値となっている。その他の7元素の濃度は土壌中、水中、大気中のいずれも 10^{-20} (mol/kg 又は mol/m³) 以下であった。AECLは、濃

度評価値は既存の環境規制値よりも数桁低い等の理由から、Br 及び Sb の放出が決定グループに対して有意な影響をもたらすことはない結論している。その他の7元素についても、AECL は、決定グループに対して有意なリスクをもたらすことはない結論している。

3.1.2 ベルギー

SAFIR 2 (ONDRAF/NIRAS, 2001) では、高レベル及び長半減期核種を含む廃棄物に対する地下処分システムの長期安全性評価において、地層処分場の非放射線影響に関する評価を行っている。金属の処分場から帯水層へのフラックスは、MICOFF¹移行コードで評価が行われた。最初のステップでは、MICOFF 移行コードにより、無限多孔質媒体中の一次元地下水流動解析を行っている。その際、溶解度制限は無視している。処分場から 45 m 地点での濃度が 10^{-3} kg/m³ 以上となる元素 (B, Cr, Ba, Mn, Mo, Ni, Sm, U, Zn) については、次のステップで溶解度制限を考慮した計算を行っている。

この結果から、帯水層中の最大濃度は最大許容濃度よりも2桁以上低く、Boom Clay 中にある処分場の廃棄物に関する化学毒性は制限因子とならないことがわかる。

3.1.3 フィンランド

フィンランドでは、使用済燃料キャニスタから放出される物質についての化学的な長期環境影響に関する研究を行っている。キャニスタ材と使用済燃料中に含まれる全化学元素を検討の対象としている。最も毒性が強く、含有量の多い元素の放出及び移行については、溶解度による計算や計算コードを使った解析によって研究が行われている。結果として得られた地下水中の元素濃度は、飲料水についての濃度限度との比較が行われており、使用済燃料の最終処分の安全性に関しては、化学毒性は有意な要因とはならないことが示されている。(Raiko, et al., 1999)

¹ SCK/CEN (ベルギー原子力研究センター) により開発された移行式の解析解をベースとした核種移行解析コード。

3.1.4 スウェーデン

KBS-3 概念に準じた使用済燃料インベントリを有する廃棄体キャニスタを想定して、これらの廃棄物に含まれる化学毒性物質の評価を実施している。この評価では、廃棄物中に存在する元素が基準値以下となるのに必要な水の希釈量を算出することで、各元素の毒性と質量を考慮した、相対的な重要性を判断している。結果として、キャニスタ材料である鉛及びウランが最も重要であることが示されている。また、Karlsson, et al (1994) では、安全評価で用いられる放出シナリオを基にした検討を行っている。この結果、Pb 放出の影響評価に対しても同様のシナリオを適用したところ、ニアフィールドから井戸に年間 8 m³ 程度の水が直接放出されたとしても、10 mg/L の指針値を上回らないことがわかった。また、溶解度制限のない元素として Se に関する検討も行っている。

3.1.5 スイス

Buchheim, et al. (1992) によれば、放射性廃棄物管理共同組合 (NAGRA) は、スイスで計画されている処分場の化学リスクに関して詳細な調査を行っている。スイスでは、低 / 中レベル廃棄物処分場及び高レベル廃棄物処分場中の生態に関する毒性物質やその他の有害となる可能性のある物質のインベントリから、主に低 / 中レベル廃棄物処分場で発生する重金属 (Ni, Cd, Cu, Cr) を評価対象元素として設定した。結果として、処分場に存在する Cd の生物圏への移行は環境中の Cd 濃度を増加させることはなく、Cd の生態へのリスクは無視し得るものと判断されている。また、Ni, Cu, Cr といったその他の重金属についても同様の結果が得られている。

3.1.6 ドイツ

Buchheim, et al. (1992) によれば、ドイツでは、Konrad 処分場への処分が予定されている非発熱性の放射性物質の放射性毒性に加えて、化学毒性に関する検討も実施されている。Konrad 処分場に定置される放射性廃棄物中に存在する可能性がある無機化学毒性物質のうち、最も量の多いものは Pb で、線の遮蔽に用いられる。次いで多いのは、Ni, Cr, Cu, V である。

評価の結果から、1000 ~ 10,000 年経過後に、Konrad 処分場にある放射性廃棄

物の放射性毒性は、天然の 3 wt%ウラン鉱で充填された同じ処分場の放射性毒性よりも低いという結果を得ている。一方、化学分析より母岩中に化学毒性元素が存在することが示されており、これらの結果から、定置された廃棄物の化学毒性は、元来母岩に存在したハザードにはあまり寄与していないとの結論を得ている。

3.1.7 英国

英国では、今日まで、原子力放射性廃棄物会社（Nirex）による性能評価プログラムで、廃棄物の放射線影響に関する問題に取り組んできた。一方で、廃棄物や人工バリア材料に含まれる化学毒性物質によるリスクも考慮すべきであることが認識されてきており、Nirex では化学毒性物質評価に必要な作業を開始している。

3.2 評価対象物質の選定

ここでは、高レベル放射性廃棄物処分施設含有される物質の化学毒性評価を実施するために、評価対象とする元素のスクリーニングを行った。

3.2.1 検討の対象とする人工バリア材料

本検討では、以下の部材に含有される物質を、高レベル放射性廃棄物処分施設に含まれる非放射性物質として検討の対象とした。

- ガラス固化体
- キャニスタ（ステンレス鋼）
- オーバーパック（炭素鋼，チタン - 炭素鋼，銅 - 炭素鋼）

3.2.2 評価対象物質のスクリーニングの手順

以下の手順により評価対象のスクリーニングを行った（図 3-1）。

各元素の存在量の算出

暫定的な水中濃度の算出

含有量の少ない元素のスクリーニング

国内の規制基準及び毒性情報による判定基準の設定

Toxicity Index の算出

評価対象の選定

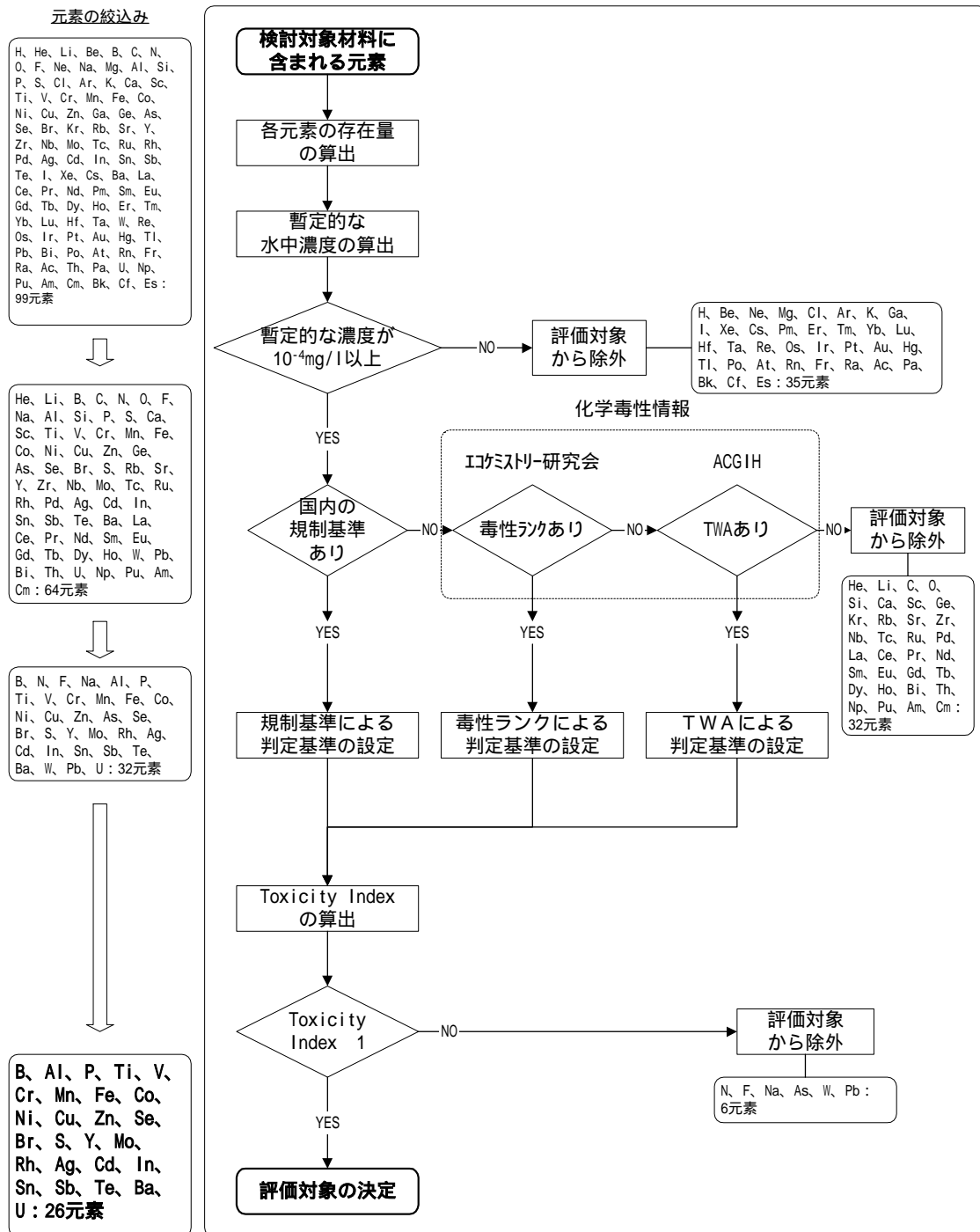


図 3-1 評価対象のスクリーニングフロー

3.2.3 高レベル放射性廃棄物処分施設に含まれる元素のインベントリ算出

高レベル放射性廃棄物のガラス固化体に含まれる元素及び人工バリア材に含まれる物質について、以下のようにインベントリ評価を行った。

(1) 各元素の存在量の算出

(a) ガラス固化体

燃料およびその放射壊変に起因する各元素の存在量については、「高レベル放射性廃棄物ガラス固化体のインベントリ評価」(石原 他, 1999)に記載されている JNFL ガラス固化体の仕様及びガラス組成をもとにして、高レベル廃液及びジルカロファイン中に含まれる元素の存在量を算出した。その他のガラスを構成する物質については、同報告書に記載されている JNFL ガラス固化体の仕様及びそのガラス組成を参考に設定した。

(b) 人工バリア材

人工バリア材(キャニスタ, オーバーパック)に含まれる元素については、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 総論レポート」(核燃料サイクル開発機構, 1999)をもとに設定した。

3.2.4 暫定的な水中濃度の算出

本検討では、評価対象の選定において、含有される物質の全量が一定量の水によって希釈された場合の濃度をスクリーニングの目安として使用した。希釈水量としては、第2次取りまとめ(核燃料サイクル開発機構, 1999)のレファレンスケースにおける生物圏評価に使用されている河川による希釈水量(10^8m^3)を使用した。

3.2.5 含有量の少ない元素のスクリーニング

本検討では、化学物質に関する国内の規制基準もしくは毒性情報(エコケミストリー研究会)などから、最も厳しい基準が $1 \times 10^{-4}\text{mg}/\ell$ のオーダーであることから、上記で求めた暫定的な水中濃度が $1.0 \times 10^{-4}\text{mg}/\ell$ 以下の物質を評価対象から除外することとした。

3.2.6 国内の規制基準及び毒性情報による判定基準の設定

本検討では、化学物質の安全性の指標として、原則として環境基準等の国内の規制基準を使用することとした。また、国内の規制の対象となっていない物質については、国内外の信頼性の高い化学毒性情報をもとに判定基準を設定した。さらに、情報が無い物質については評価が困難であるため、評価対象から除外した。

3.2.7 Toxicity Index の算出

本検討では、ここまでのスクリーニングで絞り込まれた元素に対して、(1)式を用いて Toxicity Index を算出した。以下に示すように、化学物質を 10^8m^3 の水量で希釈した濃度 (mg/ℓ) と判定基準 (mg/ℓ) との比により求めた。

$$\text{Toxicity Index} = \frac{(\text{化学物質を}10^8\text{m}^3\text{の水量で希釈した濃度}(\text{mg}/\ell))}{(\text{判定基準}(\text{mg}/\ell))} \dots(1)$$

ガラス固化体、キャニスタ及びオーバーパックの各部材毎に対して算出された Toxicity Index に対して、いずれかの Toxicity Index が 1 を超える元素を本検討における評価対象として選定した。検討の結果、表 3-1 に示す 26 元素が評価対象として選定された。

表 3-1 評価対象として選定された元素

区分	選定された元素
国内の規制基準により判定された元素 (14 元素)	B, P, S, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se, Mo, Cd, Sb, U
化学毒性情報により判定された元素 (12 元素)	Al, Ti, V, Co, Br, Y, Rh, Ag, In, Sn, Te, Ba

3.3 化学毒性物質の物質移行解析

ここでは、わが国の高レベル放射性廃棄物に含有される化学毒性を有する物質が、人間に対して及ぼす影響の大きさについて定量的な評価を行った。

評価は、第2次取りまとめ（核燃料サイクル機構，1999）における放射性物質を対象とした核種移行解析のレファレンスケースを参考に評価モデルを設定した。なお、ニアフィールド・ファーフィールドについては核種移行解析コード GoldSim を、生物圏については AMBER を、それぞれ用いて解析を実施した。

3.3.1 ニアフィールド及びファーフィールドの移行解析

(1) 評価モデル

評価モデルは、第2次取りまとめにおける放射性物質を対象とした核種移行解析のレファレンスケースとした。ただし、人工バリア材からの対象物質からの放出モデルおよび評価期間の2点についてはレファレンスケースから変更した。

パラメータについては、元素に依存するパラメータおよびソース部からの放出速度に関するパラメータ以外は第2次取りまとめのレファレンスケースと同じとした。放出モデルに関する金属の厚さおよび腐食速度に関するデータは、第2次取りまとめにおいて使用されている値をなるべく使用し、評価では物質は寿命の間に均一に放出されたとした。

緩衝材中での溶解度については、第2次取りまとめ及びTRU処分概念検討書（核燃料サイクル開発機構ほか，2000）での中性付近での溶解度の設定値が存在すればそれを使用し、設定されていない場合は保守的に可溶性とした。

人工バリアおよび天然バリアでの分配係数については、第2次取りまとめ及びTRU処分概念検討書での設定値があればそれを使用し、ない場合は他の文献あるいは化学的に類似する元素の値を使用した。パラメータの変動幅については、データが比較的多くあるものについては、いくつかの文献における値の幅から最小値と最大値を設定し、データが少ないものについては、設定値の上下2桁を変動幅とした。

(2) 評価結果

化学毒性物質の人工バリアおよび母岩からの移行率を図 3-2 および図 3-3 にそれぞれ示す。

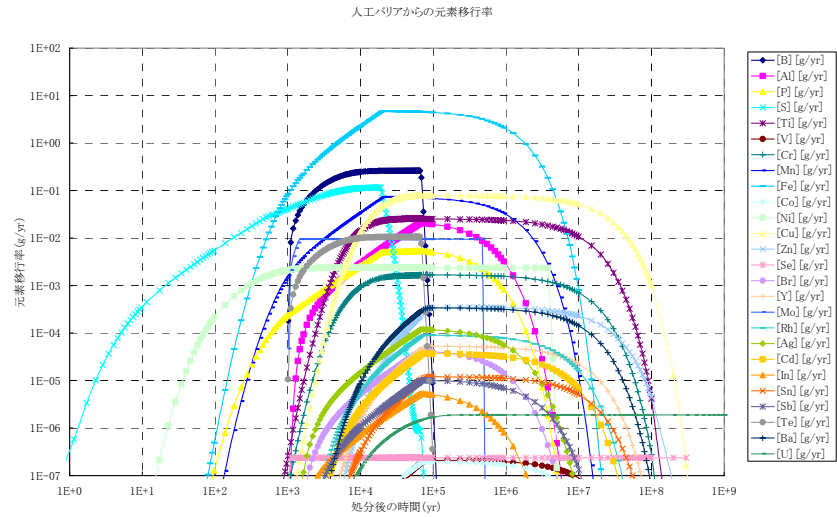


図 3-2 人工バリアからの核種移行率(ガラス固化体1本あたり)

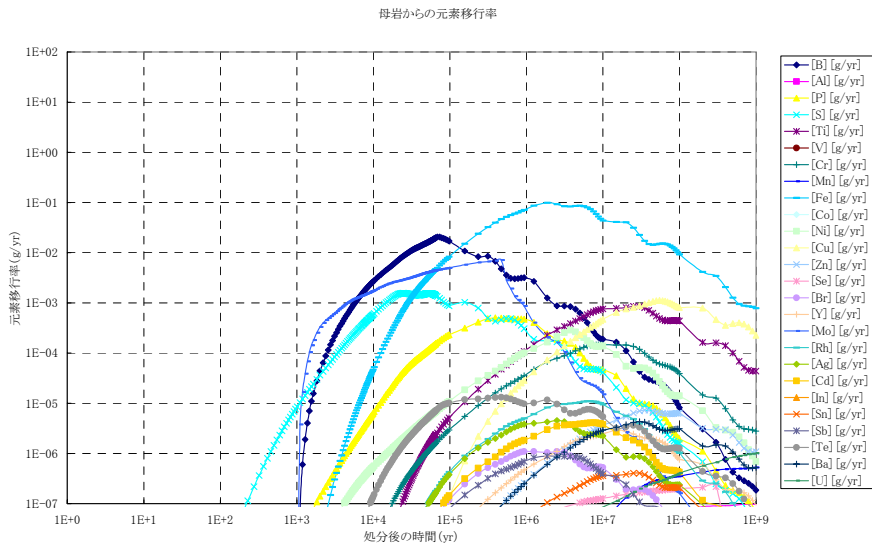


図 3-3 母岩からの核種移行率(ガラス固化体1本あたり)

3.3.2 生物圏における物質移行解析

(1) 評価モデル

評価モデルは、第2次取りまとめにおける放射性物質を対象とした核種移行解析のレファレンスケース（河川水放出ケース）とした。

(2) 評価に使用したパラメータ

コンパートメントに関するパラメータ及びコンパートメント間の移行プロセスに関するパラメータは、第2次取りまとめと同じとした。また、各元素の分配係数は、第2次取りまとめ及びTRU処分概念検討書での設定値があればそれを使用し、ない場合は他の文献あるいは化学的に類似する元素の値を使用した。パラメータの変動幅については、データが比較的多くあるものについては、いくつかの文献における値の幅から最小値と最大値を設定し、データが少ないものについては、設定値の上下2桁を変動幅とした。

(3) 評価指標

本検討では、下記に示すような、我が国における水質汚濁及び土壌汚染に係る環境基準の基準値と、生物圏における各元素の土壌・水中濃度とを比較することにより、その安全性を評価した。

水質基準に関しては、国内で規制基準が設定されていない物質については、エコケミストリー研究会が取りまとめたPRTR法対象物質の経口長期毒性に関する情報を活用した。また、大気中濃度については、適切な基準がわが国には存在しないため、米国産業衛生専門家会議（ACGIH：American Conference of Governmental Industrial Hygienists）の作業環境の許容濃度（TWA）と比較を行うこととした。

(4) 評価結果

図3-4に、基本ケースにおける各元素の水中濃度の最大値、土壌中濃度の最大値、大気中濃度の最大値と基準値を示す。ここで、基準があるものについては図中に基準値を示した。

水中濃度は河川水コンパートメント中の濃度を，土壤中濃度は表面土壌・河川堆積層・沿岸海域堆積層コンパートメント中の濃度を，大気中濃度は表面土壌コンパートメント上部大気中濃度とした。

いずれの元素の河川水濃度，土壌濃度，大気中濃度とも，各々の環境基準よりも数桁小さい結果が得られている。また，パラメータの変動範囲を考慮しても基準を大きく下回る結果となった。

本評価では，希釈水量として $10^8 \text{ m}^3/\text{y}$ を使用しており，サイト条件や評価シナリオによっては，さらに小さな希釈水量しか期待できない場合もあるが，本検討の結果から判断すれば，おそらく安全性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.4 考察および今後の課題

本検討では，高レベル廃棄物処分施設に含有される化学物質の影響について，放射性核種の核種移行解析と同様のモデルを用いて解析した。その結果，どの化学物質についても，評価結果は基準を大きく下回る結果となった。これより，化学物質については安全であることの見通しは得られたと考えられる。

今後の課題としては，知見が乏しいために評価が不可能であるとして評価対象から除外した物質，つまりランタニド，あるいはテクネチウムといった物質について，その化学毒性に関する知見を収集する必要がある。また，対象物質についても，評価で使用したパラメータを精査することにより評価の信頼性を向上させる必要がある。さらに，化学毒性評価の重要性についての議論を明確にするためには，放射性核種の人間への影響との比較を容易にするために，リスクベースによる評価に関する検討も重要であると考えられる。その他にも，天然に存在するこれらの化学物質の存在量と本検討結果を比較することにより，安全性に関する理解が深まると考えられる。

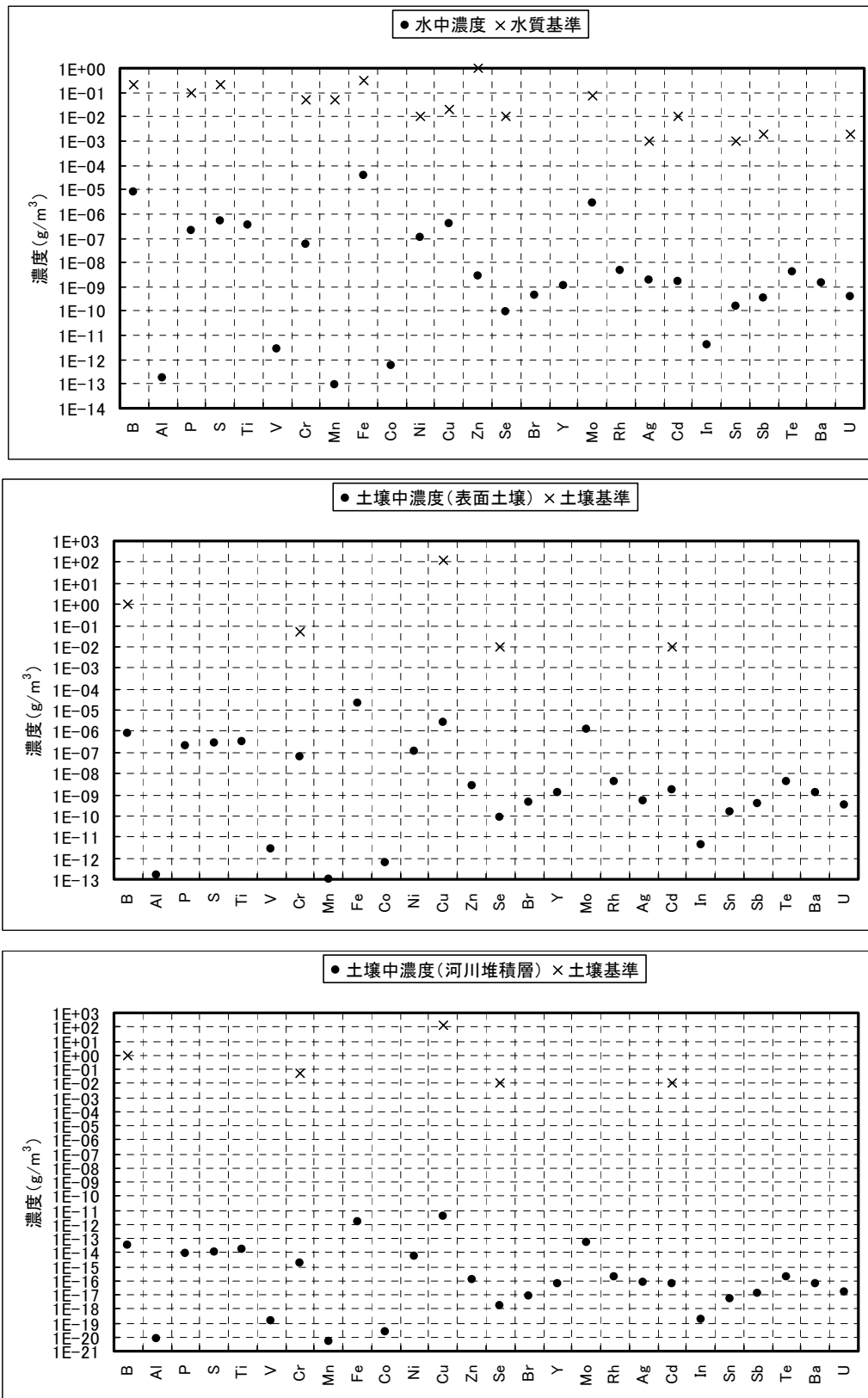
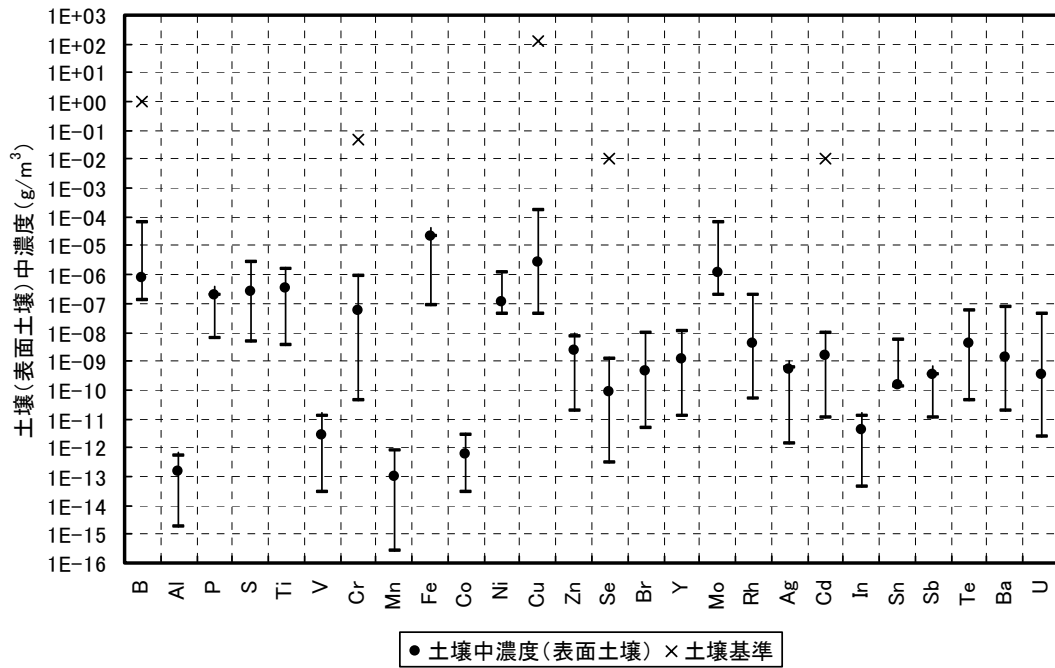


図 3-4 基本ケースにおける各媒体中での各元素のピーク値と基準値
(ガラス固化体4万本あたり) (1/2)

感度解析: 表面土壌の分配係数



感度解析: 表面土壌の分配係数

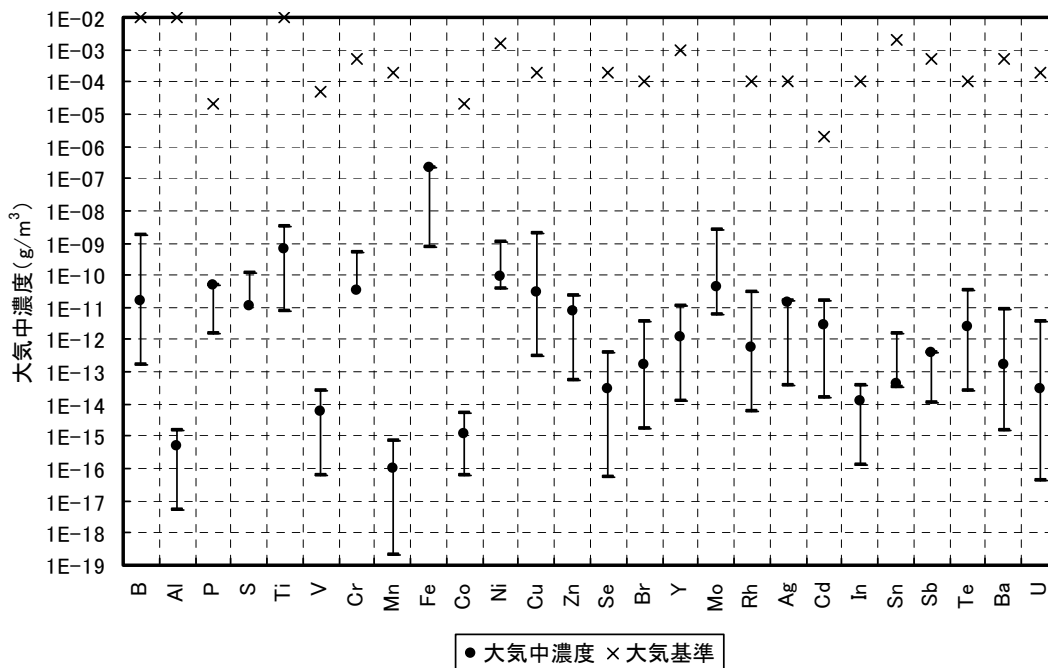


図 3-4 基本ケースにおける各媒体中での各元素のピーク値と基準値
(ガラス固化体4万本あたり) (2/2)

4. 気候変動を考慮した生物圏モデルに関する検討

地層処分の場合、地下水の流れが極めて遅いことに加えて、多くの放射性核種が移動し難い化学形態となると考えられるため、地層処分の安全評価では、評価期間は長期に及ぶ。従って、その間に生じる気候変動などの環境変化の影響を考慮したうえで、処分の安全性が確保されていることを示すことが重要となる。

そこで本検討では、わが国における HLW 処分の安全評価での生物圏への気候変動の影響を考慮する際に使用する手法を提言することを目的として、以下に記す検討を行った。

まず、諸外国及び国際機関での安全評価における気候変動の取り扱いについて、規制要件及び安全評価におけるアプローチ方法の観点から関連情報を調査した。次に、欧州委員会（EC）において実施中である気候変動を考慮した生物圏評価手法に関するプロジェクトである BIOCLIM (Modelling Sequential BIOsphere Systems under CLIMate Change for Radioactive Waste Disposal) について、その概要及び現状での研究成果について調査した。最後に、これらの2つの調査から、わが国の HLW 処分安全評価プログラムにおける生物圏への気候変動の影響を検討する際に使用可能なアプローチについて検討した。

4.1 諸外国における気候変動に対する考え方に関する調査

現在、欧州においては、気候変動を考慮した生物圏評価手法に関する検討が、国際的な共同研究プログラム(BIOCLIM)により進められている。これは、諸外国において安全要件として長期的な気候変動を考慮した評価が求められていることが背景にある。一方わが国においては、地層処分に対する明確な安全要件は提示されていないものの、将来的に諸外国と同様に気候変動を考慮した評価が必要となる可能性がある。よって本検討では、諸外国の安全要件における気候変動の取扱いを把握し、それに対してどのような評価手法によって対応しているかを調査した。

4.1.1 生物圏評価における気候変動に関する規制要件および指針

本検討では、表 4-1 に示す国及び国際機関を調査対象として、各国の規制機関及び国際組織における、放射性廃棄物処分の安全評価における気候及び生物圏の変化を扱うための要件に関する情報をまとめた。その結果から、以下の結論が得られた。

- ほとんどの国において、気候変動あるいは環境変化を考慮すべきという要件があるものの、多くの国々では、線量評価に対する明確なカットオフ時間が定義されていない。
- 大多数の規制者側では、将来の生物圏シナリオを詳細に規定していない。しかしながら、規制者側は、レファレンスバイオスフィア等を使用することが、長期間に及ぶ評価に対して適切であることを認識している。
- 10,000年以上の時間スケールを考慮すべきであるという要件がなくても、多くの申請者が処分場の安全性に関する見通しを得るためにより長い時間スケールについての検討を行っている。
- 長期間にわたっての、定量的な計算及び定性的な議論は、実際の影響の予測というよりも、性能及び安全性に関する指標にすぎないということが認識されている。

表 4-1 調査の対象とした国及び国際機関

国	国際機関
ベルギー	欧州委員会 (EC)
カナダ	国際原子力機関 (IAEA)
フィンランド	経済協力開発機構 / 原子力機関 (OECD/NEA)
フランス	
ドイツ	
スペイン	
スウェーデン	
スイス	
英国	
米国	

4.1.2 生物圏評価における気候変動の表し方

ここでは、表 4-1 に示す諸外国及び国際機関において、気候変動の影響を理解して生物圏評価に反映させるために用いられている手法をまとめた。その結果、以下のことが明らかになった。

- HLW 処分については、本検討において調査対象とした多くの国において、現在も調査段階にある。生物圏のモデル化の進捗状況、特に気候変動を扱うために用いられている手法の検討状況は、各国の評価プログラムの状況によって異なっている。
- 評価に含まれる生物圏システムは、簡単な飲料水井戸のみを検討している場合（例えば、フィンランドの評価、NEA の指針）から、レファレンスケースにもかかわらずより詳細な生物圏を検討している場合（例えば、UK Nirex の評価 (NIRX, 1997)、IAEA BIOMASS ERB 2B (BIOMASS, 2001a)）まで、多岐に及んでいる。
- 一部の国では（例えば、カナダ、米国）、処分候補地における現在の状態を踏まえた、ただ一つの生物圏システムを検討している（例えば、カナダ (AECL, 1994) では寒帯気候、米国 (DOE, 2000) では Yucca Mountain の乾燥性気候）。
- 大多数の国々は、気候変動を踏まえた、様々な将来の生物圏条件を考慮している（例えば、英国、フランス、ドイツ、スペイン）。
- 現在のところ、気候変動を考慮する場合、気候変動を非連続的に扱う離散的な生物圏を仮定するというアプローチを用いている（例えば、UK Nirex (NIREX, 1997)、IAEA BIOMASS ERB 3A (BIOMASS, 2001a)）。
- 代替的な気候を選択する際に、通常、対象とする国 / 地域における過去の状態を復元した結果を参考にしている。
- 代替的な将来の生物圏システムデータは、通常、現存する類似の環境を参考にしている。

4.1.3 調査のまとめ

本検討の調査結果を表 4-2 に示す。多くの国々において、規制機関は、地層処分

場の長期安全性を評価する際に、気候変動及び環境変化の検討を要求もしくは期待している。しかしながら、評価において気候変動及び環境変化を表現するに用いる詳細なアプローチは規定されていない。それに対し、事業の申請者側では、気候変動及び環境変化を扱うために同じようなアプローチ、すなわち、評価の対象となる地域から得られるデータを基にして将来的に起こりえる気候を選定し、連続的に気候が変化すること考慮せずに、その気候が継続することを想定した生物圏を使用している。

また、IAEA の BIOMASS や現在進行中である EC の BIOCLIM プロジェクトといった近年の国際共同プロジェクトでは、長期にわたる生物圏での気候変動及び環境変化についてのよりわかりやすく、論理的なアプローチに関する実用的な方法論に重点をおいている。わが国の安全評価においても、処分施設の安全性に生物圏の変化が及ぼす影響について検討を行う場合は、これら 2 つのプロジェクトが提供するガイダンスは有用であると考えられる。

表 4-2 諸外国の安全要件における気候変動の取扱い (1/2)

国/国際機関	規制側		実施側				
	規制要件/指針	評価期間	評価・目的	サイト	評価指標	仮定	アプローチ
ベルギー	該当なし。	言及されていない。	・ SAFIR2 (ONDRAF/NIRAS, 2001a;2001b)	(基) Boom Clay (代) Ypresian Clay	レファレンスグループの個人に対する年実効線量	井戸, 水路 (water course), または土壌を放出レセプタとする。	現在の慣習及びデータに準じた離散的な, 一定のレファレンス生物圏。代替シナリオに, 温室効果シナリオ・氷河シナリオが含まれているが, 定量的な評価は行われていない。
カナダ	気候変動に関する記載はあるが, 要件とされていない。	数学モデルによる評価を行うのは 10,000 年まで。	レファレンスシステムの閉鎖後環境影響評価研究。	確定サイトなし	・ 農場をベースとした決定グループメンバーへの個人線量 ・ 10,000 年間のリスク基準 ・ 化学リスク	定量的な計算を行わなければならない期間 (すなわち, 10,000 年) 内では, 気候及び環境の変化は予想していない。	現在の寒帯生物圏システム及びそれに関連した人間のコミュニティ活動。全体的な生物圏システムは一定であると考えているものの, パラメータ値のサンプリングも実施 (グループの人数はサンプリングパラメータ)。
フィンランド	考慮すべき事項に掲げられている。	少なくとも数 1,000 年。線量率の計算は ~ 10,000 年。	・ TILA-99 (Vieno, 1999)	・ Hästholmen ・ Olkiluoto ・ Kivetty ・ Romuvaara	・ 低確率事象に対しては個人線量及びリスク ・ 数千年以上の期間に対しては, 処分場からの放出率 (地質環境 - 生物圏フラックス)	被ばくを受ける個人は標準的な生活様式であると仮定。	離散的な, 単純な (例えば, 飲料用井戸), 一定のレファレンス生物圏。現在の慣習及びデータに準じた様々な放出レセプタ, 人間のコミュニティ活動 (農業, 漁業) を含む。
フランス	考慮すべき事項に掲げられている。	少なくとも 1,000,000 年。	公式的な評価書はない。	Meuse / Haute Marne エリア	恐らく, 一つの指標として, 個人線量		現在の温帯気候と, 将来の寒帯気候・草原気候・ツンドラ気候での, 離散的な, 一定のレファレンス生物圏。アナログに基づく広範な人間のコミュニティ活動を考慮。
ドイツ	該当なし。	指定された評価期間はないが, 10,000 年または 100,000 年と予想。	・ GSF-91	Gorleben エリア	自給地域コミュニティメンバーに対する個人線量		現在の気候及びさらに暑い気候での離散的なレファレンス生物圏。アナログに基づく様々な集団活動を考慮。
スペイン	一部の試行的な評価では気候及び景観の変化を仮定しているが, 規制側による指定はない。	1,000,000 年まで。	・ ENRESA 97 (Pinedo, 1998) ・ ENRESA 2000	ジェネリックなサイト	個人年線量	ENRESA 97 では, 生物圏と気候は時間による変化はなく, 現在のスペインの特徴を有する (すなわち, 地中海性の生物圏システム) と仮定。ENRESA 2000 では, レファレンスシナリオ及び気候シナリオ構築のためのシナリオ作成が行われた。	現在の気候 (地中海性気候) 及び将来の草原気候での離散的なレファレンス生物圏。アナログに基づく人間の地域の集団活動を考慮。
スウェーデン	考慮すべき事項に掲げられている。	・ SSI の規制: 閉鎖 ~ 1,000 年, 1,000 年 ~ ・ SKI の要件: 少なくとも 10,000 年。	・ SR-97 (SKB, 1999)	3 ヶ所のジェネリックサイト	個人の線量率	評価期間は, ~ 100,000 年及び 100,000 年 ~ としている。SR 97 への入力情報として, 汚染地下水から, 湖, 流水, 沿岸域, 農地, 泥炭地への放出を仮定した, 線量が算出されている。線量評価のための生物圏のモデルは, 今日と同じ変わらない状態にあるものと仮定している。	現在の温帯/寒帯気候, 及び将来の永久凍土・氷期の気候での, 離散的な, 一定のレファレンス生物圏。スウェーデンの実際の地域での人間活動及びデータを使用。

表 4-2 諸外国の安全要件における気候変動の取扱い (2/2)

国/国際機関	規制側		実施側				
	規制要件/指針	評価期間	評価・目的	サイト	評価指標	仮定	アプローチ
スイス	将来予測の不確実性の記述はあるが、気候に関する記述はない。	指定されていない。	・ Kristallin-I (Nagra, 1994) ・ OPA (Van Drop, 2001)	・ 2ヶ所の候補サイト ・ オパリヌス粘土層	・ 自給農業コミュニティに準じた仮想的な決定グループメンバーへの年間個人線量 ・ リスク基準は低確率事象に適用	2つの長期気候シナリオが提案されている。 ・ 氷期-間氷期サイクルが継続するシナリオ ・ さらに暑くかつさらに湿度の高い状態を引き起こすCO ₂ 濃度の上昇を考慮したシナリオ	現在の気候(間氷期)、及び将来のさらに暖かい湿度の高い/乾燥した気候・さらに寒い周氷河期の気候での、離散的な、一定のレファレンス生物圏。アナログに基づく人間のコミュニティ活動及びデータを使用。
英国	HLW に関しては該当なし。	指定されていない。	・ NIREX 95 (NIREX, 1995) ・ NIREX 97 (NIREX, 1997) ・ GPA		・ 年間個人線量 ・ リスク	・ Nirex 95: 5つの気候状態(氷期, 周氷河, 寒帯, 温帯, より温暖な気候(地中海性気候))の各々に対して様式化されたレファレンス生物圏を設定。 ・ Nirex 97: 温帯, 寒帯, 及び周氷河気候に対して様式化されたレファレンス生物圏を設定。 ・ GPA: 寒帯に対して様式化されたレファレンス生物圏を設定。	現在の温帯気候、及び将来のさらに暖かい気候(温室ガス効果による)・さらに寒い寒帯気候, 周氷河期の気候, 氷期の気候での、離散的な、一定のレファレンス生物圏。アナログに基づく自給農業/狩猟採集と関連した人間のコミュニティ活動を考慮。
米国	考慮すべき事項に掲げられている。	適合性評価では10,000年。	DOE (2000) ・ EPRI(1998)による試験的評価		年間個人線量	・ EPRI は、気候変動シナリオとして、降雨量の増加による人工バリアを通過する地下水流量の変化の影響を考慮。 ・ DOE は、気候変動を考慮していない。 ・ NRC は、降雨量の増加の影響と処分場にある処分容器(disposal package)の湿量増加の影響のみを考慮	現在の農業活動及びデータを基にした、現在の乾燥性気候(Yucca Mountainにおける)での、離散的な、一定のレファレンス生物圏。雨量の増加(廃棄物容器の再飽和に影響を及ぼす)もしくは代替的なGBIを考慮。
EC	特別な要件はない。	定義されていない。	EC が直接実施した評価はない。 BIOCLIM / BioMoSA ¹ (2001)からの指針		個人線量またはリスクの算出に用いられる放出率であると仮定。		将来の気候及び植生について、気候モデルを個別にも動的にも作成することを公布。気候の遷移状況を外挿し広域スケールに縮小、安全評価との関係を考慮。(BIOCLIM プロジェクト)
IAEA	指針のみ提示されている。	定義されていない。	特定の評価は実施されていない。 BIOMASS からの指針。		100,000年までの期間に対しては個人線量及び/またはリスクを仮定。		BIOMASS のレファレンスバイオスフィアの方法論を適用することで、離散的なまたは連続的な気候及び環境変化を考慮。
NEA	特別な要件はない。	定義されていない。	NEA 自身による評価はない。各国の参加機関による評価	(各機関の項参照)	通常、決定グループメンバーへの年間個人線量。	(各機関の項参照)	性能評価への統合、及び単独モデルの作成による代替的な、一定の生物圏システム推定のために、離散的な、簡単な(例えば、飲料用井戸)、一定のレファレンス生物圏を設定。

¹ EC において実施されている生物圏評価に関するプログラムであり、BIOMASS において構築した評価手法がサイト特有な条件に対しても適用可能であることを確認することを目的としている。

4.2 BIOCLIM での検討状況に関する調査

4.2.1 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、欧州共同体(EC)により、放射性廃棄物処分のための気候変動を考慮した連続的な(sequential)生物圏システムのモデル化に関する国際的な研究プログラムとして発足した。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及び実際の方法論を提供することを目指している。技術的な作業計画については、EC 規約の Annex に記載されている(BIOCLIM , 2000)。

BIOCLIM プロジェクトには、6 カ国 12 機関が参加している。これらの機関の共同作業により、ヨーロッパにおける将来の気候変動を長期の時間スケールでシミュレートできるような気候変動モデルを開発中である。その後、あるヨーロッパ地域で、気候が変化した結果、植生がどのように変わるかを推定する際に、これら作成された気候モデルが使われることになる。そして、このような気候や植生についての情報が、長期の安全評価において将来の生物圏システムを表すための情報提供に使われることになる。

BIOCLIM プロジェクトの目標は以下の通りである。

- 規制側や廃棄物管理機関が、グローバルな気候変動を表すための方法や、放射線学的安全評価における生物圏での気候変動の影響について、より明確に理解すること。
- 上記問題を扱うため、新しい長期気候モデル化戦略の整備に協力すること。
- 気候変化を地域スケールに縮小するため、気候モデルからのアウトプットを利用すること。
- 長期気候変動とそれに対する生物圏システムの応答(特にグローバルスケール及び地域スケールでの植生パターン)とをリンクすること。
- 放射性廃棄物処分施設の性能評価に取り入れるのに適した気候及び生態系の変化を明確に説明すること。
- 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。

BIOCLIM での作業は 5 つの作業項目(Work Package,以下 WP と呼ぶ)に分かれており、そのうち 4 つの WP において、気候モデルの開発や性能評価での気候モデルの開発結果の利用を主題とした技術的な作業が取り扱われている。また、5 番目の WP は、最終的な概要レポートや最終セミナーを通して、BIOCLIM での成果を広めることを目指している。本プロジェクトでは、進捗に応じてレポートが作成される。これらレポートは、プロジェクトの進行中に得られた成果や用いられた様々な方法論に関する情報をまとめたものである。

4.2.2 BIOCLIM の各 Work Package における技術目標及びアプローチ

ここでは、各作業項目 (WP) の技術目標やこれら技術目標を達成するために用いられた方法論について概要を記す。

(1) WP1

WP1 は、従来の安全評価において気候変動を考慮するためのアプローチを整理し、このプロジェクトの参加者が将来的に安全評価において気候変動を表すために何を要求しているかについて理解することを目指している。本 WP は 2001 年に終了しており、作業では、以下のような 2 つの見地での情報の調査に重点が置かれた。

- 気候変動を引き起こすメカニズム、気候変動の結果生じる地表環境の変化、性能評価でこれらの変化をモデル化するために用いる方法論、これまでの評価にこの方法論を使用する際に学んだ教訓。
- BIOCLIM で検討対象としている各ヨーロッパ地域 (イングランド中央部、フランス東部、スペイン中央部 / 南部、チェコ共和国) についての現在の地域情報。特に、興味をもっているのは、気候と植生パターンとのリンクである。ヨーロッパ全域の一般的な植生カテゴリが提示されており、3 ヶ所の主要地域に関して、より詳細な記述が提示されている。これら記述は各々 IAEA BIOMASS Theme 1 に基づいたもので、各地域について下記のような生物圏システム構成要素をまとめている。

- サイト位置及び地域の地質
- 人間のコミュニティ及び土地利用
- 地形
- 気候
- 岩相層序
- 地表水
- 生物相

それぞれの成果は、前者については提出書類 1 (D1) に、後者については D2 に既に報告されており、公開されている。

WP1 で照合された情報は、BIOCLIM プロジェクトの中で、2 つの中心的な目的を果たしている。まず、安全評価に適用するために必要な情報の種類の理解、及び長期間におよぶ環境変化のモデル化に関連した問題の理解に役立っている。このような情報は、安全評価で長期気候変動を表すためのアプローチの指針として、WP4 で用いられている。第 2 に、過去の気候変動が現在の地域の生物圏システムにどのような影響を及ぼしているかを理解するための根拠として、過去の地域の特徴に関する情報が他の WP への入力情報に用いられている。また、現在及び過去のデータの照合も、WP2 及び WP3 でのダウンスケーリング・ルール作成の入力情報として用いられている。ダウンスケーリング・ルールを作成することで、グローバルな規模での気候モデル化から、地域の気候及び植生パターンの導出が可能となる。

(2) WP2

WP2 は、放射性廃棄物の地層処分に関連する時間スケール（すなわち、一般的には 100 万年まで）での気候変動およびそれに付随する生物圏システムの表現方法を構築することを目指している。この WP では、気候変動を連続的に扱うのではなく、ある時間での気候および生物圏システムを取り扱うという、離散的な手法について検討している。

この WP では、3 種類のモデルについて検討されている。まず 1 つは、北半球に対して単純な気候モデルを適用し、この WP での検討の対象とする時期を同定している。次に、対象とする時期に対して、より詳細な気候の変動を検討するた

めに大気大循環モデル (GCM : general circulation model)²が用いられている。最後に , GCM モデルの結果を用いて地域スケールでの気候に関する情報を得るための , 地域レベルの気候モデルを使用する。さらに , これらをもとに , モデルから得られるグローバルな結果から地域情報を導き出すための , 統計的なダウンスケーリング方法について検討する。

(3) WP3

WP3 では , 今後 200,000 年間の連続的な気候の変動を , “ Earth Models of Intermediate Complexity (EMICs) ” と呼ばれる物理学的モデルを用いて予測することを目指している。

このWPではMoBidiCおよびCLIMBERという2つのモデルを使用している。どちらのモデルも大気/海洋モデルと氷床モデルを連成させたモデルであり , 1,000 km 四方の評価期間における気候の変動を予測する。しかしながら , これらのモデルは開発段階にあるため , このプロジェクトで使用することは挑戦的であるといえる。

さらに , 上記のモデルにより得られる連続的な気候の変化を用いて , 地域レベルでの気候の変動を表現するためのルールベースでのダウンスケーリング手法についても , このWPで開発する。

(4) WP4

WP4 では , 長期の評価期間を必要とする性能評価のための生物圏システムを適切に記述するため , 及び環境変化の潜在的な影響を同定するために , WP1 , 2 , 3 から得られた知識や理解を利用することを目指している。特に , 気候状態の遷移による動的な環境変化の重要性について , 生物圏での核種移行と関連づけて検討される。本WPでは , IAEA BIOMASS Theme 1 プログラムで開発された生物圏評価の方法論と同様の手法が適用される。(BIOMASS , 2002a ; 2002b ; 2002c)

WP4 の詳細な目的は次の通りである。

- 性能評価で有用となる , その他のWPからのデータを統合できるよう

² 地球を取り巻く全球的な大気の振る舞いを物理法則に基づいて数値モデル化し , コンピュータ上での再現を可能としたもの。

な状況を作ること。

- 性能評価に適した生物圏システムを記述するための，これらデータの使用方法を示すこと。
- 気候状態の遷移が及ぼす潜在的な放射線学的影響を検討すること。
- 任意の地域に対して気候状態及び気候遷移に適切な生物圏の記述を作成し，放射線影響評価のための概念モデルを作成する方法を提案すること。
- 生物圏への気候変動の影響を生物圏評価でどのように考慮するかについて，提案すること。

(5) WP5

WP5 では，上記までの成果が有用となるように，広範囲な科学 / 技術及び放射性廃棄物管理団体に対して最終セミナーを行い，作業の成果物，最終報告書を通して，プロジェクトの結果を普及する。

4.3 わが国における気候変動を考慮した生物圏評価のアプローチの検討

ここでは，まず性能評価における気候変動の扱いに関する基本的考え方について整理した後，わが国におけるアプローチ方法について検討する。

4.3.1 性能評価における気候変動の取扱いに関する基本的考え方

(1) 環境変化を考慮する必要性

放射性廃棄物は毒性が長期に及ぶため，放射性廃棄物地層処分の安全評価では環境変化を考慮する必要がある。処分施設に廃棄物を集中的に集めるという方策をとる際には，短期的にも長期的にも，放射性毒性を管理することで，公衆や環境への影響を最小にすることが重要である。

処分システムの閉鎖後の安全性能に関する定量的評価では，将来核種が放出される環境（地質環境や生物圏）の特徴に加えて，廃棄体や人工バリアの長期劣化を考慮している。実際に起きるであろう事象をモデル化する際に簡略化することは，地層処分の安全評価に不可欠である。ある前提条件の下では，時間変化のない生物圏モデルを取り扱うか，もしくは単に現在の条件のみを踏まえることが受

当である可能性がある。しかしながら，このような仮定には予想される環境変化やその影響の理解についての正しい判断が必要である。環境変化の影響を考慮した安全評価を行った場合のみ，処分システムを適切に受け入れることが可能であるという確信が得られる。

(2) 重要な考慮すべき事項

複雑な環境システムの長期挙動に関連した，将来の環境への放出による放射線影響を決定する全ての特質，事象，プロセス（FEPs）を正確にシミュレートするような評価は不可能である。したがって，安全評価を行う際には，採り入れられる仮定や簡略化を正当化し，それらの影響を理解するための科学的な知識を適切に使用することを，評価内に直接このような知識を取り入れようとする試みと同様に，重要視する必要がある。

生物圏で起こる変化は，事実上地下水流動や核種移行に対する動的な境界条件となるので，地層処分システムの長期性能評価に直接関連するものである。したがって，統合評価を行うという観点から，生物圏システムでの環境変化を表すためのアプローチとその他の領域で用いられたアプローチとで一貫性をとることが必要である。

アセスメント生物圏は，地域集団とそれらの環境との関係に関して整合性の取れた正しいと判断される仮定に基づいていることが必要であり，これは放射線影響に関してロバストで代表的な指標を提供するという安全評価の全体的な目的と一致している。このようなアセスメント生物圏は，生物圏システムの変化に影響を及ぼす要因に関する科学的な理解と整合性が取れたものであるべきだが，処分場からの核種放出時に実存する生物圏を予測するものとみなすべきではない。

(3) 評価のためのアプローチの検証

気候変動を考慮する場合に重要であるのは，与えられたアセスメントコンテクストのもとで行われる計算の妥当性である。放射線学的影響を指標とする安全評価において，将来の生物圏変化をシミュレートしようという試みに重点を置かずに，対象となる地域の長期的な変動について科学的に正しいと判断された記述をもとに，評価期間における変化を同定することに重点を置くべきである。その際

に、環境変化の特定な観点を、より詳細な調査・研究から得られる科学的な知識を統合することにより、簡単で汎用的な評価ツールを利用する際の信頼性が構築される。

評価レベルでのオプションは、離散的なアプローチと連続的なアプローチの2つに大別できる。以下に、この2つについて概説する。

(a) 離散的なアプローチ

離散的な気候状態を用いるという手法は、放射性廃棄物処分施設の安全評価において長期生物圏変化を表すために用いられてきた簡略化の一つである。離散的な気候状態は、歴史上の記録、花粉や氷床コアの研究、気候条件が対象サイトでの将来の状態に類似しそうな既存のアナログサイトからのデータを基にして決められている。気候の類似性を用いるという手法は、例えば植生パターン、気象データ、人間活動に関する関連情報を収集する有用な手段を提供し、これら情報は評価のモデル化要件を満たすために必要なものである。

(b) 連続的なアプローチ

アセスメント生物圏の定義付けに連続的なアプローチを採り入れる目的は、生物圏システムの構成要素の特性や特徴の時間変化を連続的にシミュレーションすることによって、生物圏システムの変化を明示的に表現することである。連続的なアプローチは、予想されるランドスケープの変化の初期段階での核種の蓄積が、変化が起こった後での放射線影響に関与する可能性があると判断されるような状況に特に適している。

一般に、一連の離散的なシステム状態として生物圏変化を表すと、予想される変化が実際に起こる期間中に起こり得る放射線影響を過大評価する傾向がある。離散的な状態が放射線影響に関して過度に悲観的な見積りをしている場合は、生物圏変化をより現実的に表した（例えば、連続的な変化として）より複雑なモデル化が必要とされる可能性がある。

4.3.2 アプローチの検討

気候変動は、生物圏変化を包括的に記述するための根拠として、全地球のおよび

地域スケールで発生する環境変化のその他の原因と一緒に考慮することが必要である。

評価内で気候変動の影響を表すための詳細なアプローチは、アセスメントコンテキストに左右されることになるため、本検討では気候変動の影響を扱うための方法に関してかなり詳細なアプローチを提示することはできない。よって、本検討では重要な一般的テーマの一部を明記し、推奨されるアプローチの基本的ステップの概要を記す。

(1) アプローチの着目点

- 一般に環境変化（および特に気候変動）の検討は、総合的な性能評価を行う場合は考慮すべきである。このような変化を評価内で表現する方法の妥当性を判断するために、変化のメカニズムやその影響について適切な考察を加えることが不可欠である。
- 環境変化とその影響を考慮するという事は、性能評価内で変化を明示的に表さなければならないということをも必ずしも意味しているわけではない。
- 地域スケールで予想されるランドスケープ変化及び地質学的および地球化学的事象・プロセスによって引き起こされる変化の影響に関する記述は、性能評価全体での変化の扱いに確実に一貫性を持たせる際の共通の基準点としての役目を果たす。
- アセスメント生物圏は、地域のランドスケープの変化の記述だけでは決まらない。生物圏のアセスメントコンテキストに関連したその他の要因も考慮することが必要である。
- 科学的な理解および判断には、評価の対象となる期間を指定することが必要である。

(2) 推奨アプローチにおけるステップ案

気候変動および環境変化の影響を扱うための方策については、BIOMASS プロジェクトで概要が説明されている（IAEA, 2002）。これら変化を扱う際にベースとなるものは、処分場サイト近傍で予想される地域のランドスケープ変化に関する

る記述である。将来起こり得ることを全て採り入れようと試みるよりも、こういったランドスケープ変化を記すときに、予想される環境変化が意味あるものとして例示されていることを判断するのに科学的な知見を用いているということが重要視されている。これらの環境変化の例示が性能評価が示そうとしている決定プロセスの指針として役立つような広範囲な将来像を十分に代表しているものであれば、評価結果は有意であると考えられる。

代表的なアセスメント生物圏を定義付ける際に考慮される要因は、気候およびランドスケープの変化の考察に限定されていないことを認識することが重要である。特に、アセスメント生物圏の同定および記述にも、性能評価の他の領域から提供された核種放出の予想パターンに加えて、GBIの形状や位置を考慮することが必要である。

アセスメント生物圏の定義付けにおける主要ステップは以下のとおりである。

- 1) 気候変動および環境変化に関する気候変動以外の主要メカニズムの時系列を特定する。
- 2) 特定された時系列ごとに、地域のランドスケープ変化について、様式的な記述を作成する。
- 3) 各ランドスケープ変化に対するソースタームおよびGBIに関連したアセスメントコンテキスト情報をレビューする。
- 4) ランドスケープ変化の各記述に相当するアセスメント生物圏システム状態の時系列を特定する。
- 5) 生物圏の変化において予想される核種挙動を考慮し、ある生物圏システム状態から別の状態への遷移の影響をシミュレートする長所および短所を検討する。

4.4 検討のまとめ

一般に環境変化（そして、特に気候変動）の検討は、包括的な性能評価においては必要となる。このような変化を評価内で表すための方法が正しいと判断できるようにするためには、変化のメカニズムやその影響を十分に検討することが不可欠である。

しかしながら、環境変化およびその影響を適切に考慮するという要件は、性能評

価モデル内で変化を明示的に表現しなければならないということを必ずしも意味しているわけではない。地域のランドスケープ内で予想される変化の記述により安全評価に対して情報が与えられるが、このような全ての変化を明示的にシミュレートしなければならないということを必ずしも意味しているわけではない。

わが国における放射性廃棄物処分安全評価における生物圏で、気候変動の影響を考慮するためのアプローチの主なステップを図 4-1 および以下に示す。科学的な知見や判断は、評価の対象となる期間を検討するために必要である。例えば、ある期間内で起こることが予想される変化に関しては、連続的なアプローチを用いて将来の完全な生物圏変化を表す必要性はない。このような場合では、包括的な評価の一部として、ある期間に起こるシステム状態を表現した一連のアセスメント生物圏に対して離散的な評価を実施することが適切であると考えられる。

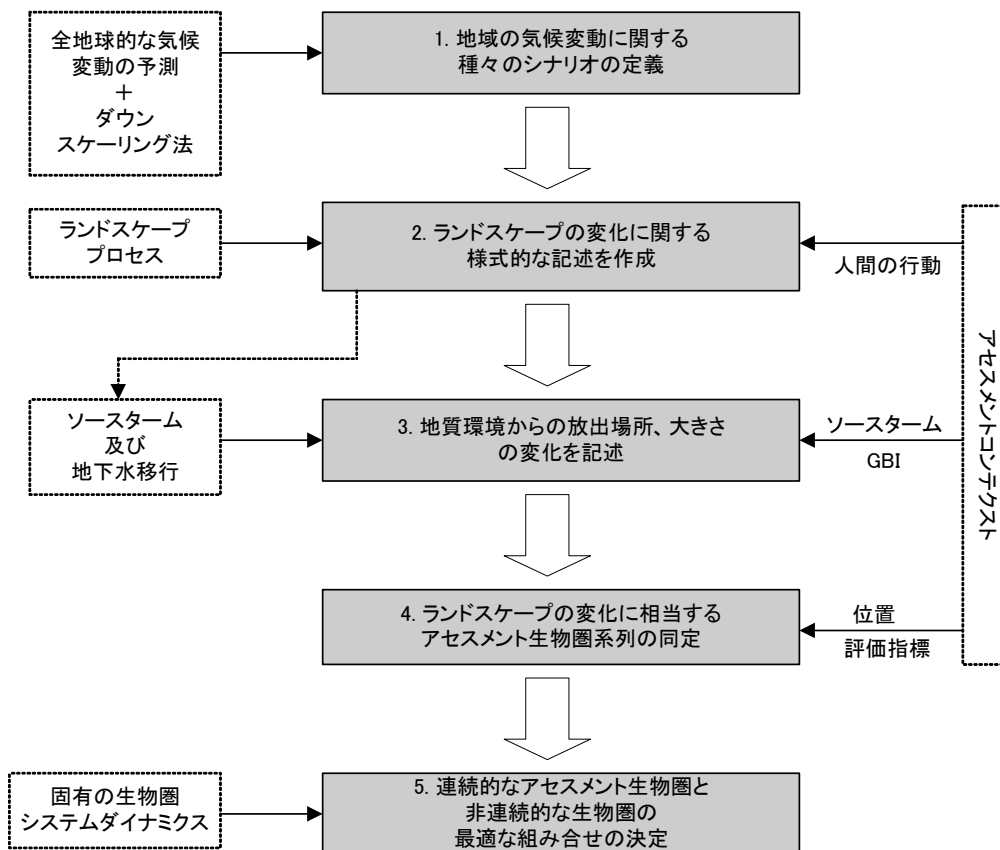


図 4-1 生物圏評価において気候変動の影響を考慮するための一般的なアプローチ

5. おわりに

5.1 具体的な地質環境が与えられた場合の GBI の設定方法に関する検討

本検討では、諸外国における GBI 設定に関する文献調査結果を参考に、わが国における GBI の設定手順について検討した。その結果、既往の評価事例および現状の地下水流動の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 GBI 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 GBI あるいは保守的な GBI を選択することが妥当であるとの結論を得た。

また、GBI 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、どのようなサイト環境においても、これらの調査項目は共通であるが、それぞれの調査手法や詳細なデータ項目についてはの詳細については、サイトの特徴によって異なると考えられる。

今後は、本検討で開発した GBI 設定フローおよび抽出した調査項目の妥当性を確認し、必要に応じて改良する必要がある。そのためには、ある任意の地域に対して事例検討を行うことが望ましい。

5.2 放射性廃棄物に含有される非放射性物質の化学毒性影響に関する評価

ここでは、放射性廃棄物中に含有される化学的な毒性を有する物質の影響評価について、諸外国における評価事例を調査し、その結果を参考にわが国における HLW 処分施設を対象とした化学毒性の影響評価を実施した。その結果、どの化学物質についても、評価結果は基準を大きく下回る結果となった。これより、化学物質については安全であることの見通しは得られたと考えられる。

今後の課題としては、知見が乏しいために評価が不可能であるとして評価対象から除外した物質、つまりランタニド、あるいはテクネチウムといった物質について、その化学毒性に関する知見を収集する必要がある。また、対象物質についても、評価で使用したパラメータを精査することにより評価の信頼性を向上させる必要がある。さらに、化学毒性評価の重要性についての議論を明確にするためには、放射性核種の人間への影響との比較を容易にするために、リスクベースによる評価に関する検討も重要であると考えられる。その他にも、天然に存在するこれらの化学物質の存在量と本検討結果を比較することにより、安全性に関する理解が深まると考えられる。

5.3 気候変動を考慮した生物圏モデルに関する検討

気候変動を考慮した生物圏モデルの高度化を目的に、諸外国の安全要件における気候変動の取り扱いを調査し、わが国において将来的な気候の変動を考慮に入れた生物圏評価モデルの評価手法について検討した。その結果として作成された気候変動の影響を考慮するためのアプローチは以下のとおりである。

- 気候変動および環境変化の主メカニズムの時系列を特定する。
- 特定された各時系列に対して、地域のランドスケープ変化に関する様式的な記述を作成する。
- 各ランドスケープ変化の記述に対して、ソースタームおよび GBI に関連したアセスメントコンテキスト情報をレビューする。
- 各ランドスケープ変化系列に相当するアセスメント生物圏システム状態のいくつかの時系列を特定する。
- 変化する生物圏で予想される核種挙動を考慮したら、ある生物圏システム状態から別の状態への遷移の影響をシミュレーションする長所および短所を検討し、どのアプローチが最適であるかを決定する。

ただし、このようなアプローチを実行するにあたっては、その他の領域の性能評価と完全に切り離すことは不可能である。したがって、統合的な評価を行うという観点から、生物圏システムでの環境変化を表すためのアプローチとその他の領域での長期安全解析で用いられたアプローチとで一貫性をとることが必要である。

6. 参考文献

【1章の参考文献】

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

BIOCLIM : “Modelling sequential biosphere systems under climate change for radioactive waste disposal (BIOCLIM). Annex I – Description of Work”, EC Project FIKW-CT-2000-00024, (2000)

加藤智子 , 他 : “ 気候変動による影響を取り入れた地層処分安全評価の生物圏モデルの検討 ” , JNC TN8400 2001-003 , (2001)

吉田英爾 , 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 2001-001 , (2001)

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(II) ” , 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)

【2章の参考文献】

BIOMASS : “Reference Biospheres” for Solid Radioactive Waste Disposal : Volume

- Overview, BIOMASS Theme 1 : Final Output Draft TECDOC, International Atomic Energy Agency, Vienna, (2001a)

BIOMASS : "Reference Biospheres" for Solid Radioactive Waste Disposal : Volume

- Methodology, BIOMASS Theme 1 : Final Output, International Atomic Energy Agency, Vienna, (2001b)

BIOMASS : "Reference Biospheres" for Solid Radioactive Waste Disposal : Volume

- Examples, BIOMASS Theme 1 : Final Output Draft TECDOC, International Atomic Energy Agency, Vienna, (2001c)

DOE : "Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain Volume 1 : Introduction and Site Characteristics", DOE/RW-0508/V1, December 1998, (1998)

DOE : "Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain Volume 3 : Total System Performance Assessment", DOE/RW-0508/V3, December 1998, (1998)

NIREX : "Nirex 97 : An Assessment of the Post-closure Performance of a Deep Waste Repository at Sellafield", Nirex Science Report No. S/97/012, (1997)

ONDRAF/NIRAS : "SAFIR 2 : Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2", NIROND 2001-06 E, (2001)

SKB : "Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97 – Post-closure safety", Main Report Summary, Volume I and II, SKB Technical Report TR-99-06, SKB, Stockholm, Sweden, (1999)

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(II) " , 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)

【3章の参考文献】

AECL : "Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste", AECL-10711 COG-93-1, (1994)

Goodwin, B.W., Kishor K. Mehta : "Identification of contaminants of concern for the postclosure assessment of the concept for disposal of Canada's nuclear fuel waste", Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10901, COG-93-265, (1994)

Raiko, E., Nordman, H. : "Chemical toxicity in final disposal of spent nuclear fuel", POSIVA-TYO--99-18, (1999)

Buchheim, B, Persson, L. : "Chemotoxicity of nuclear waste repositories", Nuclear Technology, Vol.97, No.3, pp.303-315 (1992)

ONDRAF/NIRAS : "SAFIR 2 :Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2", NIROND 2001-06 E, (2001)

F. Karlsson, M.Wiborgh : "Chemotoxic aspects of radioactive waste in Sweden", Proc Int Top Meet Nucl Hazard Waste Manag; Atlanta, Ga., p.1371-1376, (1994)

石原義尚, 他 : "高レベル放射性廃棄物ガラス固化体のインベントリ評価", JNC TN8400 99-085, (1999)

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)

核燃料サイクル開発機構, 電気事業連合会 : "TRU 廃棄物処分概念検討書", JNC TY1400 2000-001, TRU TR-2000-01, (2000)

【4章の参考文献】

BIOCLIM : "Modelling sequential biosphere systems under climate change for radioactive waste disposal (BIOCLIM). Annex I – Description of Work", EC Project FIKW-CT-2000-00024, (2000)

BIOMASS : "Reference Biospheres for solid radioactive waste disposal. Volume I – Overview", IAEA, Vienna, Austria, (2001a)

BIOMASS : "Reference Biospheres for solid radioactive waste disposal. Volume II – Methodology", IAEA, Vienna, Austria, (2001b)

BIOMASS : "Reference Biospheres for solid radioactive waste disposal. Volume III – Example Reference Biospheres", IAEA, Vienna, Austria, (2001c)

BioMoSA : "Biosphere models for safety assessment of radioactive waste disposal based on the application of the Reference Biosphere methodology. Annex I – Description of Work", EC Project FIKW-CT2001-20184, (2001)

IAEA : "Reference Biospheres for Solid Radioactive Waste Disposal: Volume II – Methodology", TECDOC in Preparation, International Atomic Energy Agency, Vienna, (2002)

AECL : "Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste", AECL-10711 COG-93-1, (1994)

DOE : "Civilian Radioactive Waste Management System Management and Operating Contractor Report", Biosphere Process Model Report, DDR-MGR-MD-000002, Rev00 ICN 01, (2000)

EPRI : "Alternative approaches to assessing the performance and suitability of Yucca Mountain for spent fuel disposal", EPRI report TR-108732, (1998)

NAGRA : "Kristallin-I, Safety Assessment Report", NAGRA Technical Report NTB 93-22, Nagra, Wettingen, Switzerland, (1994)

Nirex : "Post-closure performance assessment. Treatment of the biosphere", Nirex Science Report S/95/002, (1995)

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

ONDRAF/NIRAS : "Towards the sustainable management of radioactive waste – Background to the SAFIR 2 report", NIROND 2001-07 E, (2001a)

ONDRAF/NIRAS : "Technical overview of the SAFIR report – Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2", NIROND 2001-05 E, (2001b)

Pinedo P, Simón I and Agüero A : "Application of the biosphere assessment methodology to the "ENRESA 1997 Performance and Safety Assessment", CIEMAT Report 863, CIEMAT, Madrid, Spain, (1998)

SKB : "Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97 – Post-closure safety", Main Report Summary, Volume I and II, SKB Technical Report TR-99-06, SKB, Stockholm, Sweden, (1999)

Van Dorp F : "Representative areas and their properties for biosphere modelling for a repository in Opalinus clay", NIB-01-106, (2001)

Vieno T and Nordman H : "Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen,

Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara. TILA-99”, POSIVA Report 99-07, (1999)