



第2期中期計画期間（平成22年度～平成26年度） における地層処分生物圏評価研究の進め方

Study Plan on Biosphere Assessment for Geological Disposal of Radioactive Waste
(5-year Plan for Fiscal Years 2010-2014)

加藤 智子 板津 透 鈴木 祐二

Tomoko KATO, Toru ITAZU and Yuji SUZUKI

地層処分研究開発部門

地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

第 2 期中期計画期間（平成 22 年度～平成 26 年度）における地層処分生物圏評価研究の進め方

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット
加藤 智子，板津 透^{*}，鈴木 祐二^{*}

（2010 年 12 月 15 日受理）

地層処分生物圏評価において対象とする期間は非常に長く，処分場からの核種が表層環境に到達する時刻における表層環境や人間の生活様式を正確に予測し，モデル構築に反映することは困難である。IAEA-TECDOC-1077 では，衣食住や人間活動といった人間の生活様式や，自然事象に起因する気候，地形，植生，帯水層を含む水循環の変化が予測できる期間においては，実際の環境の特徴もしくは予測できる範囲内での変化に基づくモデル構築が可能であるが，期間が遠い将来に及ぶ場合には，様式化された生物圏評価モデルが必要となることを述べている。このような場合，IAEA BIOMASS プロジェクトで提唱された生物圏評価モデル構築のアプローチ（BIOMASS アプローチ）は，生物圏の不確実性への対処の観点からも特に有効な手法となる。

このことから，評価対象期間を，人間の生活様式の変化が予測できる期間（処分後 100 年程度まで），自然事象に起因する水循環の変化が予測できる期間（処分後 1 万年程度まで），それ以降（処分後 1 万年程度以降）に区分し，国内外における生物圏評価の考え方や進め方に関する現状把握を踏まえつつ，OECD/NEA が示す安全評価の具体的な進め方や，BIOMASS アプローチにしたがって生物圏評価を行う際に重要となると考えられる課題を整理した。

また，すべての評価対象期間を通じて，効率的な評価を行うために，モデル構築およびパラメータ設定の具体的な手順や，適切な情報を活用しパラメータ設定するためのデータベースを体系的に整備しておくことも重要な課題である。

上記の課題の整理を踏まえて，実際の環境条件およびその変遷を考慮した生物圏評価を行う際に重要となると考えられる課題のうち，当面 5 ヶ年で原子力機構において重点的に実施する研究項目として以下を設定し，具体的な検討の進め方を示した。

- ① 表層環境における水理・物質移行の 3 次元解析結果や文献情報等に基づく生物圏評価モデル構築の試行による，モデル構築フローの整備
- ② 我が国の環境条件を反映した生物圏評価パラメータの設定に向けたデータベースの整備
- ③ 長期的な変遷を考慮した生物圏評価の考え方の整理とモデル構築

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※技術開発協力員

*（株）NESI

Study Plan on Biosphere Assessment for Geological Disposal of Radioactive Waste
(5-year Plan for Fiscal Years 2010-2014)

Tomoko KATO, Toru ITAZU* and Yuji SUZUKI*

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

(Received December 15, 2010)

As the biosphere assessment of geological disposal covers an extremely long time period, it is difficult to predict the future human environment and lifestyles. IAEA-TECDOC-1077 addresses that a stylized approach is proposed for selecting critical groups and biospheres in future situations where human behaviour or biosphere conditions cannot be known with any certainty, although it is possible to construct biosphere models based on the characteristics and evolution of the surface environment at the actual site in shorter time period. BIOMASS Methodology is especially effective for treating uncertainty of biosphere in these situations.

To address the approaches of biosphere modelling, time period after closure of repository was divided;

- period 0 to ca. 10^2 years post-closure, when evolution of human life style could be described;
- approximately 10^2 years to 10^4 years post-closure, when major change of hydrological cycle caused by natural phenomena could be described;
- beyond 10^4 years.

Critical issues of biosphere modelling with the procedure of safety assessment by OECD/NEA and BIOMASS Methodology were specified through summarising the past progresses in domestic and foreign institutes.

Additionally, it is important to develop the procedure of biosphere modelling and database for setting parameters for the use of appropriate information.

Based on the critical issues specified, 5-year research plan on biosphere assessment were identified as follows;

- (1) Development of the methodology for constructing site-specific biosphere models through groundwater flow analysis in surface and near-surface environment and literature survey;
- (2) Development of biosphere database for setting domestic parameters;
- (3) Development of methodology for biosphere modelling considering future evolution of surface environment.

Keywords: 5-year Plan, Biosphere Assessment, Biosphere Modelling, Geological Disposal, Radioactive Waste, BIOMASS Methodology, Time Period after Closure of Repository

※Collaborating Engineer

*NESI Incorporated

目 次

1. はじめに	1
2. 国内外の生物圏評価に関する検討状況の整理と課題の抽出	3
2. 1 研究の背景	3
2. 2 研究の経緯	6
2. 2. 1 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ	6
2. 2. 2 平成 17 年取りまとめ	7
2. 2. 3 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ	8
2. 2. 4 原子力機構第 1 期中期計画期間（平成 17 年度下期から平成 21 年度まで）	8
2. 3 国内外における検討	10
2. 3. 1 余裕深度処分における安全評価	10
2. 3. 2 諸外国における状況	11
2. 4 生物圏評価の具体的な進め方と課題の認識	12
2. 4. 1 評価条件の設定	14
2. 4. 2 システムの理解	15
2. 4. 3 モデル構築／パラメータ設定	18
2. 4. 4 課題のまとめ	21
3. 当面 5 ヶ年における研究	23
3. 1 課題と目標	23
3. 2 実施内容	24
3. 2. 1 表層環境における水理・物質移行の 3 次元解析結果や文献情報等に基づく生物圏評価モデル構築の試行による、モデル構築フローの整備	24
3. 2. 2 我が国の環境条件を反映した生物圏評価パラメータの設定に向けたデータベースの整備	29
3. 2. 3 長期的な変遷を考慮した生物圏評価の考え方の整理とモデル構築	34
3. 3 年度展開	37
4. おわりに	38
参考文献	39

Contents

1.	Introduction	1
2.	Past progresses of biosphere assessment research in domestic and foreign institutes and specification of critical issues for future study in biosphere modelling	3
2.1	Background of this study	3
2.2	Past progresses in JAEA	6
2.2.1	H12 report.....	6
2.2.2	H17 report.....	7
2.2.3	TRU-2 report.....	8
2.2.4	Progresses of biosphere assessment research in JAEA for fiscal years 2005 to 2009	8
2.3	Past progresses and trends in Japan and foreign countries.....	10
2.3.1	Safety assessment of sub-surface disposal after the period for active control.....	10
2.3.2	Progresses of R&D in foreign institutes	11
2.4	Issues for future study in biosphere modelling.....	12
2.4.1	Setting assessment context.....	14
2.4.2	Understanding of biosphere system	15
2.4.3	Construction of biosphere models and setting parameter set	18
2.4.4	Critical issues in biosphere modelling.....	21
3.	5-year research plan on biosphere assessment for fiscal years 2010 to 2014.....	23
3.1	Objectives.....	23
3.2	Contents.....	24
3.2.1	Development of the methodology for constructing site-specific biosphere models through groundwater flow analysis in surface and near-surface environment and literature survey	24
3.2.2	Development of biosphere database for setting domestic parameters.....	29
3.2.3	Development of methodology for biosphere modelling considering future evolution of surface environment	34
3.3	Schedule.....	37
4.	Conclusions.....	38
References	39

1. はじめに

地層処分生物圏評価において対象とする期間は非常に長く、処分場からの核種が表層環境に到達する時刻（例えば数万年や数十万年後）における表層環境や人間の生活様式を正確に予測し、モデル構築に反映することは困難である。IAEA-TECDOC-1077 (IAEA, 1999¹⁾) では、衣食住や人間活動といった人間の生活様式や、自然事象に起因する気候、地形、植生、帯水層を含む水循環の変化が予測できる期間においては、実際の環境の特徴もしくは予測できる範囲内での変化に基づくモデル構築が可能であるが、期間が遠い将来に及ぶ場合には、様式化された生物圏評価モデルが必要となることを述べている。このような場合、IAEA BIOMASS プロジェクトで提唱された生物圏評価モデル構築のアプローチ (IAEA, 2003²⁾; 以下、BIOMASS アプローチ) は、生物圏の不確実性への対処の観点からも特に有効な手法となる。

このことから、評価対象期間を、人間の生活様式の変化が予測できる期間（処分後 100 年程度まで）、自然事象に起因する水循環の変化が予測できる期間（処分後 1 万年程度まで）、それ以降（処分後 1 万年程度以降）に区分し、国内外における生物圏評価の考え方や進め方に関する現状把握を踏まえつつ、OECD/NEA が示す安全評価の具体的な進め方 (OECD/NEA, 1991³⁾) や、BIOMASS アプローチにしたがって生物圏評価を行う際に重要となると考えられる課題を整理した。

まず、人間の生活様式の変化が予測できる期間（現在）においては、サイトにおける実際の表層環境での水理・物質移行や存在形態や同位体比を考慮した環境中での核種移行、地域特有の生活習慣の把握等と、それらの理解を踏まえたモデル構築およびパラメータ設定が必要となる。特に、帯水層での核種の希釈や収着現象に関しては、実際の環境条件を考慮した具体的なモデル構築の試行等に基づき、生物圏評価モデルに反映すべき現象とその方法を検討しておくことが重要である。

次に、自然事象に起因する水循環の変化が予測できる期間（近い将来）においては、気候変動や隆起・沈降運動に基づく表層環境の変遷や、環境の変遷に基づく核種移行挙動および環境条件／生活習慣の変化に伴う人間の生活様式の変化の把握と、それらの理解を踏まえたモデル構築およびパラメータ設定が必要となる。モデル構築においては、地質環境の長期安定性研究の成果等を踏まえた表層環境の状態設定およびこれに基づくモデル化を行うことが可能である一方で、人間の生活様式の設定にあたっては、その変遷が合理的に予測できないことから、環境条件や社会状況の変化を踏まえつつ、モダンアナログの考え方を適用することが有効な方法のひとつとなる。

さらに、人間の生活様式や自然事象に起因する水循環の変化が予測できない期間（遠い将来）においては、近い将来の表層環境条件の延長としてその変遷を捉えることや、蓋然性が高いと思われるいくつかの表層環境条件を仮定することにより、生物圏の状態設定を行い、合理的で保守的な評価（過小評価でなく、過度に保守的な評価でない）のための様式化された生物圏評価モデルの構築を目指すことが重要である。

また、すべての評価対象期間を通じて、効率的な評価を行うために、モデル構築およびパラメータ設定の具体的な手順や、適切な情報を活用しパラメータ設定するためのデータベースの整備が必要となる。特にモデル構築およびパラメータ設定の手順に関しては、BIOMASS アプローチ等を参照し、実際の環

境条件を反映したモデル構築の試行等を通じて、留意点等に関する知識を体系的に整備しておくことが重要である。

上記の課題の整理を踏まえて、実際の環境条件およびその変遷を考慮した生物圏評価を行う際に重要となると考えられる課題のうち、当面 5 ヶ年で（独）日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）において重点的に実施する研究項目として以下を設定し、具体的な検討の進め方を示した。

- ④ 表層環境における水理・物質移行の 3 次元解析結果や文献情報等に基づく生物圏評価モデル構築の試行による、モデル構築フローの整備
- ⑤ 我が国の環境条件を反映した生物圏評価パラメータの設定に向けたデータベースの整備
- ⑥ 長期的な変遷を考慮した生物圏評価の考え方の整理とモデル構築

本報告書においては、第 2 章で、国内外の生物圏評価研究に関する検討状況を整理し、我が国の地層処分生物圏評価を実施するうえで生じると考えられる課題を抽出した。これを踏まえて、第 3 章においては、課題の重要度および優先度を考慮して、当面 5 ヶ年（平成 22 年度から平成 26 年度頃まで）で原子力機構において実施する研究項目を特定して、研究の具体的な進め方を示した。

2. 国内外の生物圏評価に関する検討状況の整理と課題の抽出

2. 1 研究の背景

我が国の地層処分の安全確保の方策としては、地層処分にとって適切な地質環境を選定し、そこに人工バリア（ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材から構成）や処分施設を適切に設計、施工することとしている。また、この人工バリアおよびバリアとして機能する天然の地層（以下、天然バリア）からなる地層処分システムに対して、長期的な安全性を確認するための安全評価が行われる。

地層処分システムの安全評価の方法は、まず、地層処分システムが将来どのようにふるまい、それが人間にどのような影響を与えるかについて、さまざまな可能性（以下、シナリオ）を想定する。次に、作成したシナリオに沿って適切なモデルを作成し、必要なデータを用いて評価・解析を行う。この結果を安全基準等の適切な防護レベルと比較することにより、地層処分システムの安全性が判断される。安全評価のシナリオにおいては、処分場から流出した放射性核種（以下、核種）が人間の生活する環境に到達することを想定しており、処分場の安全性を人間が受ける放射線量（以下、線量）として提示することが求められている（例えば、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会、1997⁴⁾）。既往の安全評価においては、特に、地下水により核種が人間環境に運ばれるという想定である「地下水シナリオ」が重要であるとされている（例えば、核燃料サイクル開発機構、1999⁵⁾）。

線量の算出にあたっては、天然バリアから移行した核種の人間の生活環境での移行や人間への移行（被ばく）をモデル化しており、この一連の流れを生物圏評価と呼ぶ。ここで生物圏とは、人間の生活環境を指しており、河川、湖沼等の表層水、地表付近の土壌・地層、動植物等が含まれる。また、生物圏評価における線量算出の対象とする生物は人間である。農作物や家畜、魚介類に関しては、経口摂取による被ばく経路を与えるものとして存在するが、それ自体が受ける線量を生物圏評価における算出の対象としない。なお、原子力安全委員会が示した「余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方」（原子力安全委員会、2010a⁶⁾）においては、人間が生活し、処分場から放出された核種による被ばくを受ける環境を「生活圏」と呼んでいる。地層処分における既往の検討では、“Biosphere”という語の和訳として「生物圏」を用いているが、前述の定義のとおり、人間の生活環境とその周辺を指していることから、余裕深度処分の安全評価でいうところの「生活圏」と同義である。

現在、我が国の地層処分事業はサイト選定の段階にあり、例えば、原子力発電環境整備機構（2004）⁷⁾では、「立地点の安全評価にあたっては、そのサイト環境条件やそれに応じて想定される処分場のデザインに適合したものとすることが必要である」ことが述べられている。また、安全規制の基本的な考え方を示した図書においても、「処分地が持つ条件を適切に考慮し、評価モデルおよびパラメータを設定し評価する」（原子力安全委員会 放射性廃棄物安全規制専門部会、2000⁸⁾；総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会、2003⁹⁾）ことが指摘されている。このことから、現段階の生物圏評価に係わる研究開発においては、実際の環境条件が与えられた場合に、そこでの現象をモデルに取り込む手法や、優先的に取得しておくべき重要な情報の一覧を整備しておくことが重要である。また、地層処分事業は長期にわたって行われることから、評価手法および評価に用いるデータ等を複数の世代が有効活用できるよう、体系的に整理して管理しておくことも重要である。

地層処分の安全評価は数万年以上といった極めて長い時間を対象としている。特に、生物圏は深地層に比べてその変遷が大きいいため、このような長期間にわたって将来の人間生活の環境や様式を予測することは困難である。評価対象地域では、多様な生活習慣を持つ多くの人間が居住・活動するため、その一人一人に対して地層処分に由来する線量を算出することは労力の点、および将来についての予測が困難な点からも現実的ではない。また、生物圏を構成する要素およびそこでの被ばくプロセスを実際の現象に即して記述することは非常に複雑であり、その全てを網羅的に扱うことは同様の理由で困難である。

そのため、生物圏評価においては、サイトにおける実在の人間ではなく、評価対象地域の住民を代表するような特徴を有する仮想的な人間を評価対象として想定する。また、生物圏のモデル化においては、生物圏の状態を忠実に再現するのではなく、評価目的に見合うように適切に簡略化を行う。このような作業を将来の状態を対象として行うため、生物圏評価ではその評価モデルを構築していく道筋で多くの仮定が用いられることになる。このことを踏まえ、国際原子力機関（IAEA）が実施した放射性廃棄物処分生物圏評価のための国際プロジェクト BIOMASS においては、将来予測の不確実性に対処するため、BIOMASS アプローチを提唱した（IAEA, 2003²⁾）。BIOMASS アプローチでは、安全評価に用いる生物圏を意味する「アセスメントバイオスフィア」を「処分場に起因する核種が生物圏に流入することによって生じると考えられる放射線影響について、計算する基盤を与えるために必要な仮定の集合」と定義している。この定義を生物圏評価モデルの構築に適用するにあたっては、表層環境での核種移行プロセスとそこに住む人間が受ける被ばく経路を、サイト固有の情報に加えて、一般的な人間の生活習慣と生物圏の状態に基づいて様式化（stylisation）するという手法が諸外国の生物圏評価においても採用されている。なお、処分後の時間が長くなればなるほど、表層環境での核種移行や人間の生活様式に係わる不確実性が増大することから、様式化された生物圏評価モデルを構築することの重要性が高まるとされている（IAEA, 1999¹⁾）。

さらに、BIOMASS アプローチにおいては、評価の前提条件に基づく生物圏の状態設定の方法について、評価期間内での変遷を考慮するかどうか、考慮する場合には、初期状態の変化をどのように取り込むか（システムの変遷を連続的に取り扱うか、離散的に取り扱うか）を明確にすることとしている（図 2.1-1）。

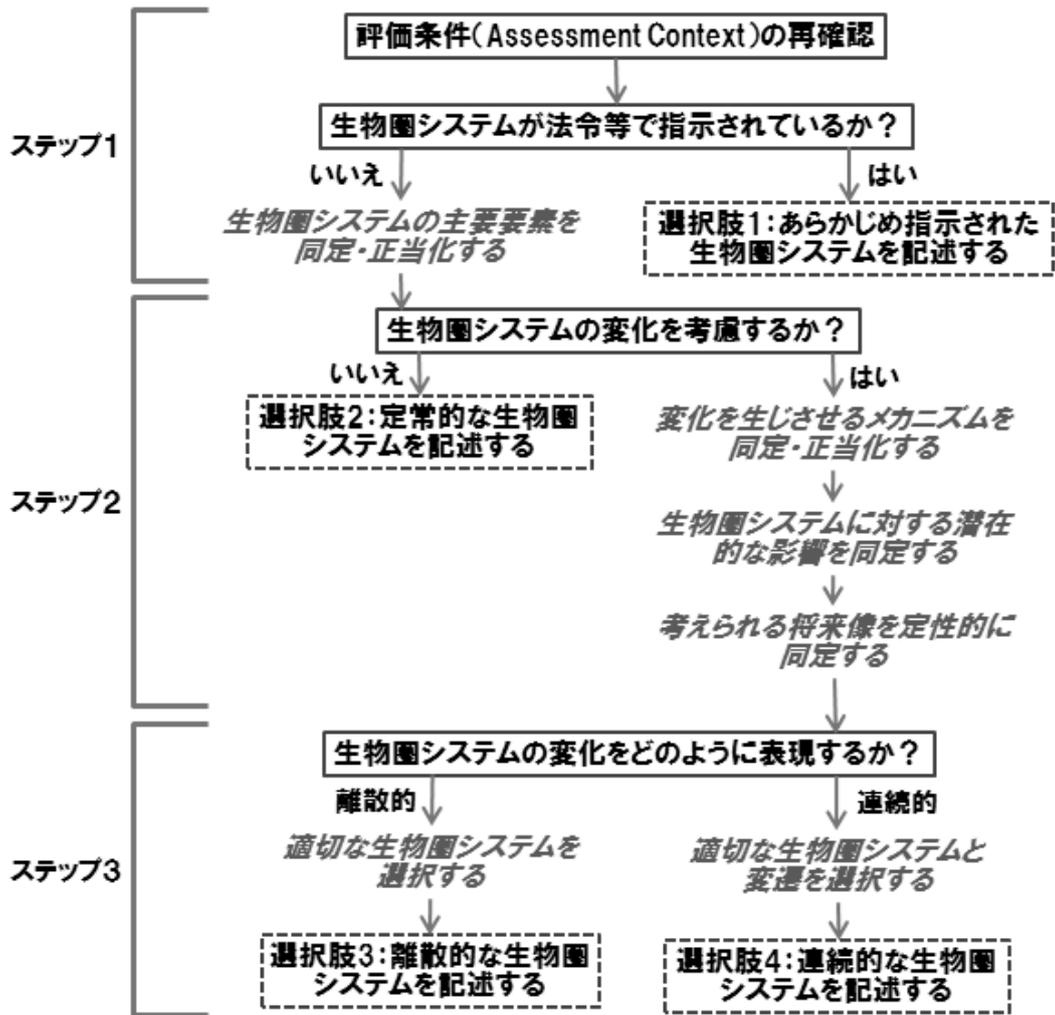


図 2.1-1 評価条件に基づき生物圏の状態を設定するためのステップ (IAEA, 2003²⁾)

また、BIOMASS では、地質環境と生物圏とのインターフェイス (Geosphere-biosphere interface ; 以下、GBI) を天然バリアから放出された核種の移行先である生物圏との間に存在する核種を受け渡すモデル上の境界面と定義している。GBI は生物圏評価モデルにおいて核種が天然バリアから生物圏に放出される入り口として設定され、一般的には、河川、河川堆積層、沿岸海域水、沿岸海域堆積層等が GBI として扱われることが多い。実際に特定された場所において天然バリアから生物圏への核種移行を考えた場合、天然バリアとみなされる岩盤と地表付近にある生物圏の間には帯水層²⁻¹⁾が存在し、そこでは天然バリアとは異なる核種移行条件となることが予想される。最近の生物圏評価では、帯水層中での核種の希釈等の効果が無視できないと考えられ、この部分も含めて、面ではなく大きさをもつ領域として GBI とみなすことが多い。帯水層が GBI として設定された場合、帯水層での希釈水量や水資源としての利用の有無によって、算出される線量が左右されることとなる。

また、BIOMASS 終了後の欧米諸国による共同プロジェクトである BIOPROTA では、帯水層を含め

²⁻¹⁾ 生物圏評価における「帯水層」とは、バリア機能の期待できない透水性の高い領域であり、天然バリアについては、地下水が存在するが帯水層とは別な領域として扱う。

て GBI として設定されることを考慮して、Geosphere-biosphere interface zone（以下、GBIZ）という用語も用いている（BIOPROTA, 2005¹⁰⁾）。GBI（もしくは GBIZ）の特性を考慮して表層環境での核種移行をモデル化し、GBI（GBIZ）の候補を絞り込むための手法を確立することは生物圏評価上非常に重要な研究項目のひとつである。なお、原子力機構における生物圏評価研究においては、天然バリアとして機能する岩盤とそこに含まれる地下水を指す「地質環境」に対し、帯水層および人間の生活環境である生物圏を併せて「表層環境」と呼んでいる。

一方、一般的に生物圏評価においては、線量を算出するために数多くのパラメータを設定しており、評価対象となるサイト固有の情報や、国際的な合意等、様々な情報に基づき設定される。数多くのパラメータを効率的に設定するためには、サイトで優先的に取得すべきパラメータを吟味するとともに、限られた既存情報を有効に活用しつつ、生物圏評価パラメータを設定するための手法を整備しておくことが重要である。また、環境放射能研究等における既往の成果（土壌中や農作物中の核種移行挙動の解明等）を参照し、生物圏評価パラメータを設定するにあたっての情報整理（データベースの整備）、および情報の検索、閲覧を簡便かつ迅速に行うことができるシステムの整備（情報検索・閲覧システムの整備）も必要不可欠である。

2. 2 研究の経緯

これまでに核燃料サイクル開発機構（原子力機構の前身）は、核燃料サイクル開発機構（1999）⁵⁾（以下、地層処分研究開発第2次取りまとめ）、電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構（2005）¹¹⁾（以下、第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ）、核燃料サイクル開発機構（2005）¹²⁾（以下、平成17年取りまとめ）において研究成果を公開した。また、原子力機構設立後は、第1期中期計画期間における研究成果を適宜研究開発報告書等として公開した。以上の文書に公開した、核燃料サイクル開発機構および原子力機構において実施した生物圏評価研究の経緯を以下に整理する。

2. 2. 1 地層処分研究開発第2次取りまとめ

地層処分研究開発第2次取りまとめにおいては、BIOMASS アプローチを参考に、我が国の多様な表層環境や生活様式等を考慮して、将来においても現在と同様の生活様式が継続することを仮定し、種々の核種移行／被ばく経路、被ばくの様式を想定した。この想定に基づき、核種移行／被ばくによる影響を評価するモデルを構築し、定量的な評価を行った。

具体的には、我が国の一般的な地形（平野、丘陵、山地）を対象に、陸水系・海水系それぞれの地下水を考慮した場合の GBI として、表層水系（河川、湖沼）、井戸、海を想定して、天然バリアから放出された核種が生物圏内を移行し、人間に至る経路を設定して、処分場に起因して受ける線量を算出した。なお、天然バリアから生物圏に核種が放出される場合には、帯水層での希釈や収着による核種の移行遅延を考慮せず、GBI に全量が放出されることを想定した。レファレンスケースとして想定した GBI を河川水とした生物圏評価の概念モデルを図 2.2-1 に示す。

また、線量を算出する際に用いるパラメータのうち、環境条件および生活様式（河川流量や灌漑水量、食物摂取量等）に関連する我が国固有の統計値を有するものに関しては、我が国の一般的な状況を表す

値としてそれらを使用した。また、半減期や実効線量係数等の国際的に合意が得られているものに関しては、国際放射線防護委員会（ICRP）等の推奨する値を使用した。さらに、土壌への分配係数や農作物への移行係数、畜産物・海産物への濃縮係数等、元素や品目に固有のパラメータ（以下、元素固有パラメータ）に関しては、地層処分研究開発第2次取りまとめ段階では、我が国のデータが十分に整備されていなかったことから、諸外国の性能評価報告書等で用いられている値を中心に引用した。

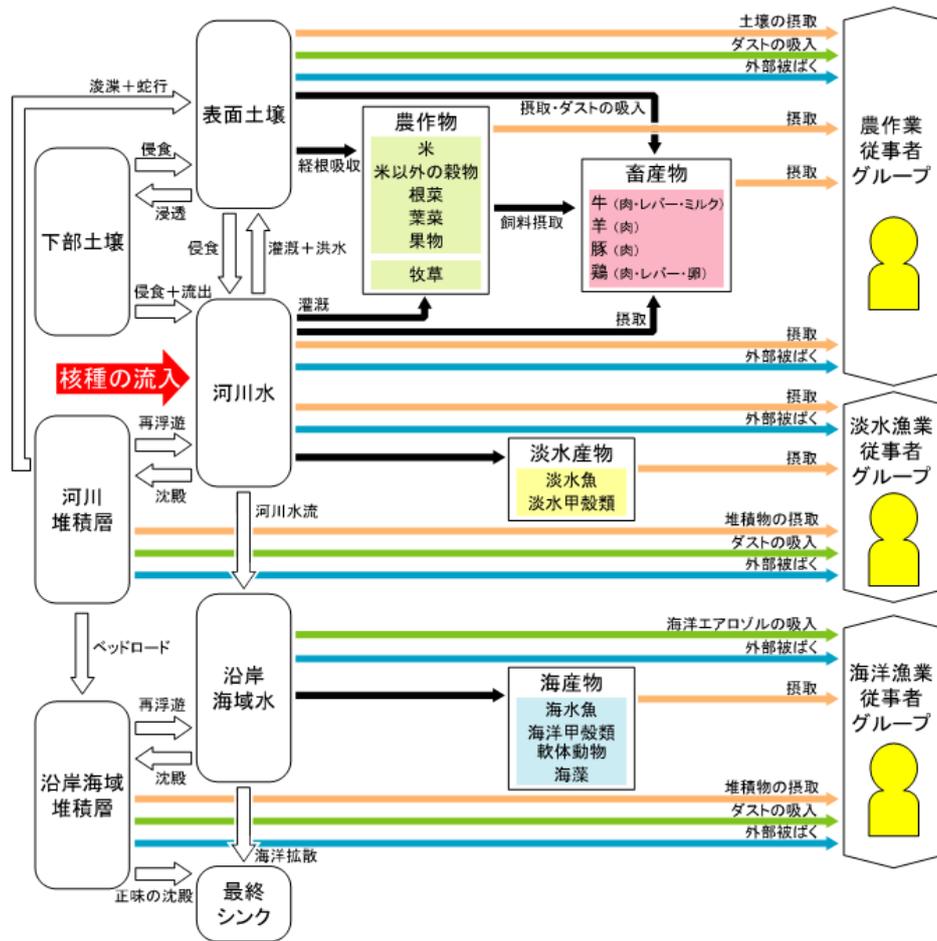


図 2.2-1 地層処分第2次取りまとめレファレンスケースにおける生物圏評価の概念モデル
 (核燃料サイクル開発機構 (1999) ⁵⁾ をもとに作成)

2. 2. 2 平成 17 年取りまとめ

平成 17 年取りまとめでは、地層処分研究開発第2次取りまとめでの、ジェネリックな環境を対象とした検討を踏まえ、実際の処分場サイトが特定された場合に、その表層環境の特徴に対応可能となる生物圏評価モデルとパラメータを体系的に整備することを目的として、これまで考慮しなかった帯水層等の表層環境での水理・物質移行に着目し、その現象の生物圏評価への取り込みに向けて、地下深部から利水環境への地下水の放出地点の推定に係る考え方とその調査段階に応じた変遷を整理した。

また、多数の生物圏評価パラメータの中から重要度の高いパラメータを特定するための手順を構築し、その適用により河川流量や分配係数、農作物への移行係数等の重要性を特定することでデータの充足度

等の分析を効率的に実施できるようになった。

表層環境の時間的変遷に関しては、地層処分研究開発第2次取りまとめでの現在の温暖気候が継続するという想定に対して、気候変動により現在と異なる冷帯気候やツンドラ気候になった場合の影響を考慮するための簡便な生物圏モデル化手法として、降水量の減少に着目し、灌漑水量、浸透／流出量、食物摂取のパラメータを変更することで取り扱う方法を構築した。その結果、温暖気候の場合に比べてほとんどの核種において処分場からの核種移行率を人間が受ける線量に換算する係数（以下、線量への換算係数）が低下する傾向にあること、また、それが灌漑水量や浸透／流出量の減少による表面土壌中の核種濃度の減少に関係することを示した。

2. 2. 3 第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ

TRU 廃棄物処分第2次取りまとめにおいては、地層処分研究開発第2次取りまとめでの検討を踏まえ、我が国の幅広い表層環境を考慮して、TRU 廃棄物処分対象核種を含めた評価を行うとともに、気候変動による影響を生物圏モデルに取り入れた場合、その影響がどの程度のものとなるかを把握することを目的として、冷帯気候とツンドラ気候のふたつの気候状態を想定して生物圏モデルを構築し、評価を実施した（鈴木ほか、2006¹³⁾）。

2. 2. 4 原子力機構第1期中期計画期間（平成17年度下期から平成21年度まで）

帯水層等の表層環境での水理・物質移行の現象の生物圏評価への取り込みに関連して、利水環境での希釈・分散効果の評価において基本的な情報となる水収支の推定に必要なデータ一覧の整理を行った（稲垣ほか、2007¹⁴⁾）。さらに、平成17年取りまとめ以降の検討を踏まえたより具体的な検討として、将来的な感度解析への利用を目的に、モデルサイトとして選定された地域の表層環境における物質移行解析を試行し、いくつかのパラメータ値を変えて計算される濃度分布に与える影響を検討した。また、表層環境における水理解析による計算結果を生物圏評価モデルへの入力値として利用するために、河川・湖沼・海域等への地下水および物質の流出入量が求められるようなモデル設定・境界条件について明らかにした（板津ほか、2009a¹⁵⁾）。

生物圏評価パラメータの設定については、感度解析的手法等を導入したパラメータの重要度分類を実施（加藤、鈴木、2008¹⁶⁾）するとともに、その成果をパラメータ設定手順の検討に反映し、パラメータの重要度、データベースの整備状況、データ入手可能性等を考慮しつつ特定の環境条件に対応したパラメータを設定する実用的な手順（図2.2-2）を構築した。これを地層処分研究開発第2次取りまとめで用いた生物圏評価パラメータセットに対して適用することで、今後更新が必要となるパラメータを明らかにした（Kato and Suzuki, 2007¹⁷⁾ ; Kato et al., 2009¹⁸⁾）。また、更新が必要なパラメータに関しては、更新に用いることが可能な既存情報を整理（データベース化を含む）するために、「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」（資源エネルギー庁、日本原子力研究開発機構、2006a¹⁹⁾、2009a²⁰⁾）の枠組みに沿って（独）放射線医学総合研究所と協力しつつ、我が国で取得されたデータを反映した新たなデータベース整備のための手順を示し（加藤ほか、2009²¹⁾）、これに基づき作業に着手した。

さらに、上記の表層環境での水理・物質移行の取り扱いや生物圏評価パラメータの設定を含めた、実

際 環境条件を反映した生物圏評価モデル構築のための総合的な作業フローを作成するとともに、フローに示される各作業の実施に利用可能な文献・統計等の情報項目を整理した（板津ほか，2009b²²⁾；図 2.2-3)。なお，原子力機構では，様々な地質環境条件に応じて計画立案，調査，モデル化を柔軟に実施し，状況変化に応じてこれらを変更できるための「判断支援エキスパートシステム (ES)」が搭載されている「次世代型サイト特性調査情報統合システム (ISIS)」を開発してきた（日本原子力研究開発機構，2010²³⁾。このシステムには，地層処分性能評価に用いられる地質構造，地球化学等の評価モデルを構築するための作業フローが作成されており，生物圏評価モデル構築のための作業フローについても，その一連として検討したものである。

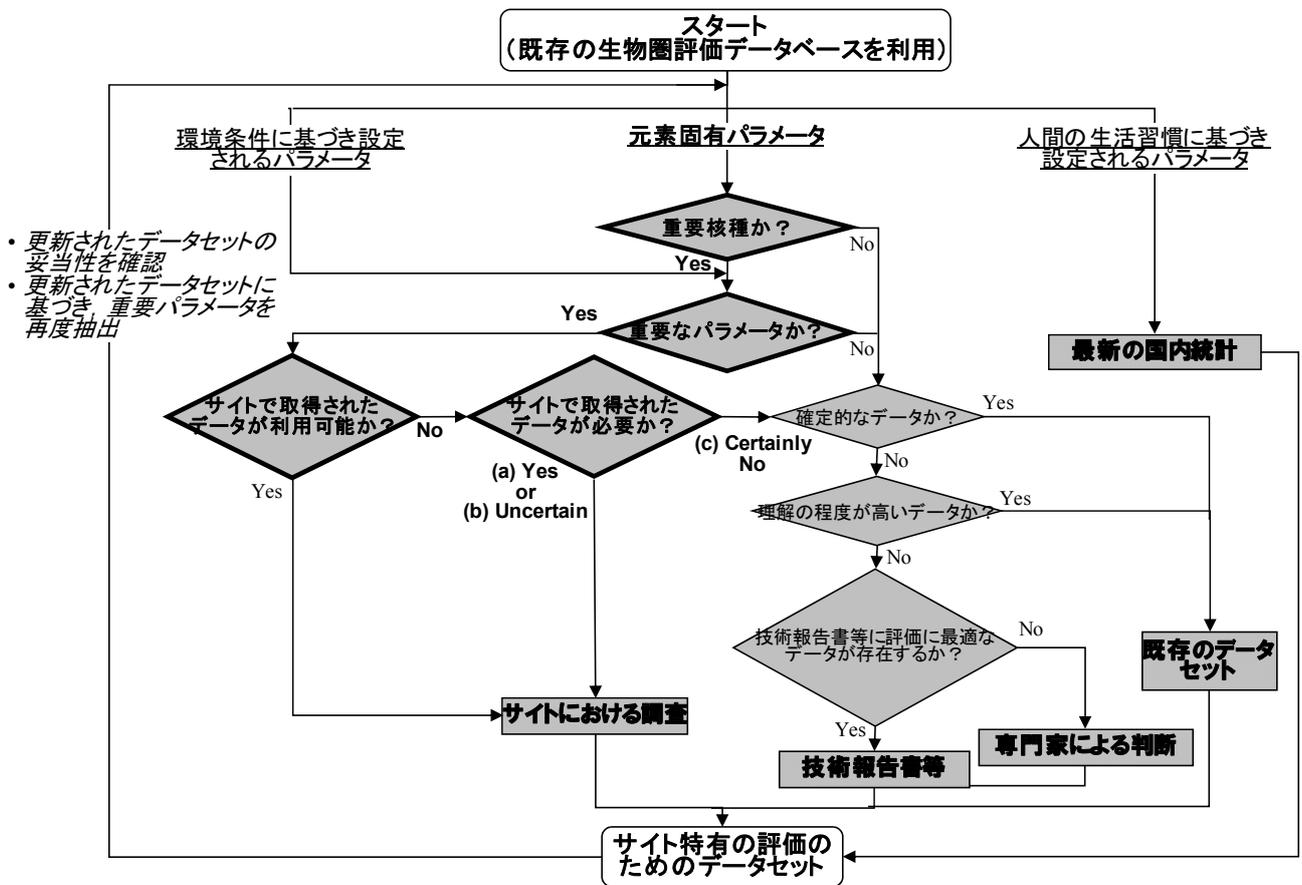


図 2.2-2 実際の表層環境の特徴を考慮した生物圏評価パラメータの設定フロー（Kato et al., 2009¹⁸⁾を和訳)

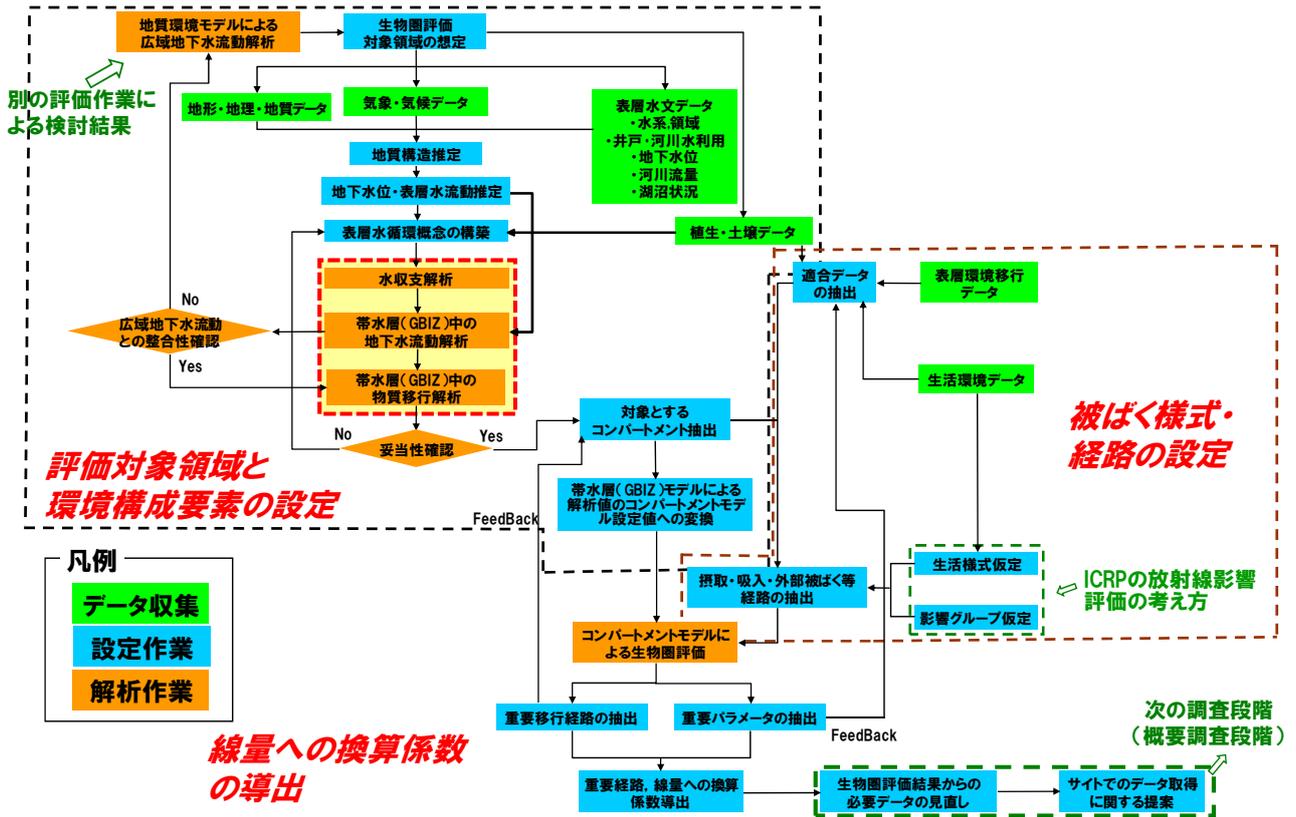


図 2.2-3 実際の表層環境の特徴を反映した生物圏評価モデル構築のための作業フロー（板津ほか、2009b²²⁾ を一部改訂）

2. 3 国内外における検討

2. 3. 1 余裕深度処分における安全評価

原子力安全委員会は、「余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方」（原子力安全委員会、2010a⁶⁾）において、表流水流動および将来における人間の生活圏の状態設定の考え方を示している。これを受けて、「放射性廃棄物埋設施設の安全審査の基本的考え方」を改訂し（原子力安全委員会、2010b²⁴⁾）、生活環境の状態設定として、被ばく経路ごとに「最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人」を評価対象とし、それらの様式化を求めている。ここでの様式化は、様式化のための前提条件を含めて、「生活圏における将来の人間の生活様式を、現在の評価対象地点周辺の関連する情報のほか、現在の我が国で一般的な生活様式を考慮して設定することをいう。」と定義されている（原子力安全委員会、2010a⁶⁾）。

また、埋設処分事業における検討としては、原子力安全委員会の要求（原子力安全委員会、2010b²⁴⁾）に対応した生活環境の状態設定について考察されている（清水ほか、2010²⁵⁾）。各個人の生活様式の設定にあたっては、評価対象とする期間において想定される気候の変動が、生活習慣や食生活に著しい変化を与える可能性がある場合は、その変化をできるだけ確からしく記述するか、線量評価の結果が合理的に保守的となるように様式化すべきと考えられるとしている。この考え方は、BIOMASS アプローチをベースとしていると言える。

また、将来の人間の生活様式の具体的な考え方としては、「埋設処分の安全評価の目的が現世代との相対的衡量にあることに着目し、生活圏の構成要素のうち将来の人間の生活様式については、現世代に対する安全評価において設定されている現世代のそれを前提にすることがもっとも適切とされている」としている（原子力安全委員会，2010a⁶⁾）。

2. 3. 2 諸外国における状況

諸外国の性能評価においては、ICRP や IAEA が示す原則等に基づき、安全基準・指針類における規定内容を定めている。また、その規程内容に基づき、生物圏の状態（将来的な変遷を考慮する場合にはそれを含む）を設定している。特に、北欧（スウェーデン、フィンランド）では、処分場サイトが選定され、サイトの特徴を考慮した生物圏評価手法の構築に関する検討が進んでいる。

例えば、スウェーデンの SR-Can プロジェクト (SKB, 2006a²⁶⁾) では、処分場候補地(当時)の Forsmark, Laxemar のサイトの状況を調査し、氷期-間氷期サイクルに伴う気候の変動を考慮して、期間ごとの生物圏の変遷とそれに伴う人間活動の変化を想定し、生物圏の状態として記述している (SKB, 2006b²⁷⁾, 2006c²⁸⁾)。また、生物圏評価を目的とした表層水理解析としては、スウェーデンの Forsmark について実施されたパーティクルトラッキングおよび移流分散解析の例がある (Gustafsson et al., 2008²⁹⁾)。ここでは、現況のサイト情報を用いて、解析地域における核種移行の特徴や分散・吸着の影響等について検討された。

フィンランドでは、さらに時間的変遷についてのモデル化をすすめ、土地の隆起や気候変動を考慮して地形と環境の変化を動的に扱う TESM (Terrain and ecosystems development modelling) の手法により、モデル地域の時間的変遷モデルを予測した (Hjerpe, et al., 2010³⁰⁾)。さらに、この結果から生物圏評価における核種移行計算に用いる時間的変遷を考慮した LSM (Landscape model) を作成し、1 万年後までの生物圏評価を行っている。一方、パラメータ設定に関しては、SR-Can プロジェクトと同様、元素(核種)の特性に依存しない、水理学的パラメータや生態系に関するパラメータの設定には、処分場サイトの特徴を反映したデータを用いることが記述されている。元素(核種)の特性に依存するパラメータ(元素固有パラメータ)に関しては、分配係数や農作物への移行係数、畜産物および海産物への濃縮係数を挙げており、IAEA の技術報告書等に記載されたデータをまとめた既往の文献(例えば、Karlsson and Bergström, 2002³¹⁾; Avila, 2006³²⁾) から設定している。

なお、C-14 の生物圏での移行に関しては、比放射能モデルを用いており、他の核種とは分けてモデル化されている。具体的には、炭素が二酸化炭素等のガス状で移行することや、動植物中に安定元素が含まれるため同位体希釈が行われることを考慮したものである (Hjerpe, et al., 2010³⁰⁾)。

さらに、安全評価において、地層処分に起因して人間が受ける線量を算出するにあたっては、ICRP が提唱する放射線防護の考え方を適用している。特に、ICRP の勧告には、決定グループの考え方について以下の記述がある。

「決定グループの大きさは、通常数十人である。大きな集団が均質に被ばくするような場合は、決定グループはもっと大きくなるかもしれない。極端な場合、例えば詳細に特徴づけることができないよう

な将来の状況を取扱う際、一人の仮想的な個人として決定グループを定義することが便利なこともある。(Publication 43; ICRP, 1985³³⁾, 日本アイソトープ協会, 1986³⁴⁾)」

「委員会は Publication 43 (ICRP, 1985³³⁾) における被ばく評価についての勧告が 一般的ガイダンスとしてあてはまると考えている。したがって委員会は、被ばくは決定グループにおける平均年線量に基づいて評価されるべきであると引き続き勧告する。決定グループとは、最高の年線量を受けると予想される集団における個人を代表する人々のグループであり、年齢、飲食物、および受ける年線量に影響する行動という観点からみて比較的均質であるように十分小さいグループである。(Publication 81; ICRP, 1998³⁵⁾, 日本アイソトープ協会, 2000³⁶⁾)」

つまり、決定グループとは、最も高い年線量を受けると予想される評価対象地域における住民のなかの個人を表す人間のグループ (人数規模としては数十人程度、大きな集団が均質に被ばくするような場合はもっと大きな集団も考慮可能; ICRP, 1985³³⁾) であり、放射性廃棄物処分の安全評価においては、行動様式等の点から見た比較的均質なグループを被ばくグループとして複数設定し、これら被ばくグループの中で最も高い年線量を受けると予想されるグループを決定グループとして定義していることが多い。なお、ICRP2007年勧告 (Publication 103; ICRP, 2007³⁷⁾) では「代表的個人」の概念を使用している。「代表的個人」とは、最も高い線量に被ばくする人々を代表する少数の個人と定義されている。これは、グループから個人という人数の変化の問題ではなく、極端なものを排除したいとの意向から設定された概念であることから、上記の被ばくグループの概念が大きく変わるものではない。

以上を整理すると、諸外国の性能評価においては、実際のサイトの環境条件に関する知見に基づき、表層環境および被ばくグループ/人間の生活様式を設定していることが示されている。将来的な変遷に関しては、地形の変化等による生物圏構成要素および核種移行プロセスの変遷や、人間の生活様式の変化について、現在の知見に基づく範囲で変遷を考慮するという事例も見られた。また、パラメータ設定に関しては、特に処分場サイトの特徴を反映すべきである水理学的および生態学的等の知見に基づくパラメータに関しては、現地で取得されたデータに基づき設定される一方で、元素固有パラメータに関しては、既往の情報を有効活用しつつ、処分場サイトの環境の特徴を反映したパラメータ設定を進めていることが示されている。

2. 4 生物圏評価の具体的な進め方と課題の認識

国内および海外における先行事例においては、サイトを特定しないジェネリックな評価手法をもとに、サイトの特徴を反映した生物圏評価のために必要な項目を課題として挙げ、評価手法の確立のための研究が行われている。特に、処分場サイトが選定されている北欧では、サイトを特定しない段階においては情報の設定が困難であった将来的な表層環境の変遷や水理現象等について、より具体的にそれらの情報を反映した生物圏評価が実施されている。また、原子力機構における既往の生物圏評価研究においては、サイトを特定せず我が国における多様な地表および地質環境条件に基づいて生物圏の評価解析ケースを想定し、その評価に必要な個々の関連する現象の取り扱いの考え方やモデル・データセットを中心

に整備している。また、環境の変遷（例えば、気候変動）による影響を考慮したシナリオを例示的に検討しつつ、希釈などの効果に大きく係わる実際のサイト条件に応じて核種流入域を設定するための手法など、サイトが特定された場合に必要となる評価手法の整備についても適宜実施している。

なお、生物圏評価では、処分場から放出された核種が表層環境に到達した際に、そこで生活する人間が受ける放射線影響を評価する。処分場由来の核種が表層環境に到達するまでには非常に長い時間がかかることから、評価対象期間は将来となり、環境条件が現在と異なることに対して、採用した評価手法が適切であることについて説明をする必要がある。このためには、時間変化を考慮した際の影響を把握しておくことが必要であることから、この評価手法の確立には、環境の時間的変遷を考慮する技術とともに与えられた環境条件における評価を可能とする技術が必要になる。後者の技術については、現状におけるサイトのできるだけ詳細な情報を用いて評価を試行するアプローチを採る。このアプローチは、時間的変遷を考慮する際の出発点となる情報を与えるとともに、環境の変化が核種の移行挙動に与える影響を考慮する際の拠り所となる情報を与えるものである。また、現在は地下水移行シナリオに関する手法が主な研究対象となっているが、これと並行して他のシナリオにおける手法に関する検討も始める必要がある。

以上の整理を踏まえて、具体的な地質環境が与えられた場合には、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とともに、長期にわたる評価に対応できるように、将来の表層環境における変遷を考慮した場合や、超長期の評価において考慮すべき安全指標や基準等に関する国際的な考え方（IAEA, 2006³⁸⁾）に基づき、生物圏評価を実施できるようにしておくことが要求されると考える。これらを念頭に置きつつ、生物圏評価研究に必要な研究項目を、実際の生物圏評価の進め方に従って抽出することとする。そこで、一般的な方法論に従った具体的な安全評価の進め方（OECD/NEA, 1991³⁾）を参考に、評価条件の設定、システムの理解（モデル構築にあたって必要となる生物圏における核種の移行挙動および人間の生活様式に関する自然および社会システムの理解）、モデル構築／パラメータ設定の観点から、項目毎に課題を抽出することとする。なお、本節では、上記の観点から生物圏評価の進め方とこれに関わる課題を広く取り上げることとする。ここに挙げた課題のうち、優先度が高く、原子力機構において性能評価の一環として実施すべきものについて、5ヵ年計画における課題として、具体的な研究の進め方を次章で示すこととする。

なお、地層処分研究開発第2次取りまとめでは、処分場から放出された核種が表層環境に到達し、人間に放射線影響を与えるのは、処分後数万年から数十万年後であるとされている。したがって、その時点までには、気候変動や隆起・侵食に伴い表層環境が変遷し、それに伴う人間活動や生活習慣の変化が生じることが想定される。しかしながら、衣食住や人間活動といった人間の生活様式の変化が想定できるのはせいぜい100年程度、自然事象に起因する気候、地形、植生、帯水層を含む水循環の変化が予測できるのはせいぜい1万年程度であり（IAEA, 1994³⁹⁾, 1999¹⁾）、超長期にわたる予測には大きな不確実性が含まれることとなる。そこで、評価対象期間を「現在（処分後100年程）」「近い将来（処分後1万年程度）」「遠い将来（処分後1万年以降）」という3つの軸に分け、それぞれの期間において生物圏評価の方法や評価結果の取り扱いに関する異なるアプローチを採ることを想定し、生物圏の状態設定やモデル構築／パラメータ設定に関する留意点や課題を評価対象期間ごとに整理しておく必要がある。評価対

象期間ごとのシステムの理解およびモデル構築／パラメータ設定の具体的な進め方と課題については、2.4.2および2.4.3において述べる。

2.4.1 評価条件の設定

(1) 評価対象期間ごとの生物圏の取り扱い

将来の変遷に関しては、過去から現在への地質環境の変遷に関する記述に基づき、将来の変遷に関する外挿を行うとともに、評価の前提として、人間の存在が将来まで続くことを仮定して人間が受ける線量を算出することとしている(例えば、SKB, 2006a²⁶⁾)。自然事象に起因する表層環境の変化に関しては、地質環境の長期安定性研究の成果を参照することにより、1万年程度までは、気候変化や地形変化をより現実的に想定した評価が可能となるが、それを超える期間については、気候変化や地形変化の「予測」結果をそのまま評価に適用することは困難であると考えられる。そのため、長期の評価においては、想定される代表的な気候条件や地形条件を踏まえ、これらの蓋然性の高い組み合わせによる表層環境の想定と予想される複数の経路の可能性について検討を行う必要がある。これらの想定を踏まえて、線量評価結果の上下限を押さえる手法や、調査の進展によっては複数の経路の重ね合わせ等の統計的な方法の適用による評価結果の提示方法が必要となる。

(2) 生物圏評価における不確実性の取り扱い

評価における不確実性の取り扱いは評価結果の信頼性に影響を与える。特に生物圏評価における不確実性は、評価結果である線量に直接的な影響を与えることから、不確実性の取り扱いについて予め整理しておき、実際に評価結果を提示する場合には、併せて結果の不確実性についての見解を示すことができるようにしておく必要がある。不確実性の取り扱いに関しては、国際的にも課題として認識されており、様々なアプローチが検討・議論されているところである。

そこで、不確実性の取り扱いに関するアプローチの端緒として、評価対象期間(現在、近い将来、遠い将来)ごとに、不確実性の要因、不確実性の表現方法、不確実性の生物圏評価への反映方法、についてそれぞれ考え得る項目を列挙し、整理する必要がある。このような分類は、不確実性はその要因が評価方法により異なり、要因に伴って表現方法が変わること、また、最終的には複数の要因による不確実性をまとめて生物圏評価に対して反映させることが求められることによる。

例えば、現在の表層環境条件に基づく生物圏評価における不確実性の要因、表現方法、生物圏評価への反映方法としては、以下のような点が例として挙げられる。

a) 不確実性の要因

- ・ 物性値の空間的なばらつき
- ・ 測定箇所のかたより
- ・ 解析における誤差

b) 不確実性の表現方法

- ・ 確率密度関数を用いたデータ数値の表現

- ・ 専門家の判断によるデータ数値の上下限値の提示
- c)生物圏評価への反映方法

- ・ 確率密度関数による線量の提示
- ・ 線量の上下限値の提示

上記の観点から、生物圏評価におけるシステムの理解やモデル構築／パラメータ設定等の具体的な取り組みを通じて、評価対象期間ごとの不確実性の取り扱いを整理しておくことが重要である。

2. 4. 2 システムの理解

(1) 現在の表層環境条件に基づくシステムの理解

生物圏評価においては、地表水（河川水・湖沼水等）・海水における核種の挙動について簡易化が図られ、例えば、生物圏コンパートメントモデルにおいては、地表水・海水コンパートメントに移行した核種については、比較的短時間で水中を拡散して濃度が低くなることを前提し、コンパートメントへの移行と同時に設定した一定水量で希釈されるとすることが多い。このような簡易化された方法に対し、評価の信頼性を確保するうえで、地下水と地表水・海水との水・物質移行プロセス、さらに地表水・海水中における水・物質移行プロセスに対する理解が必要になると考えられる。

実際にサイトが特定された場合は、河川や湖沼において局所的に物質が停滞するような流速の遅い箇所が発生するか、地下水から地表水・海水への物質流出域および流入域はどのように分布するか、また、水域に移行したあとの物質の拡散速度はどの程度か等を水・物質移行プロセスにおける個々の現象を検討したうえで、コンパートメントにおける設定を行うことが望ましい。また、沿岸域の生物圏評価において感潮河川（潮汐の影響を受ける河川）がある場合、測定される河川流量が不正確で水収支に使えないようなケースも想定される。

そのため、このような水・物質移行プロセスにおいて、生物圏評価の観点から問題となりそうな現象を抽出し、研究成果の現状を整理しておくとともに、その対処法を予め検討しておくことは有用である。

また、地層処分研究開発第 2 次取りまとめ等においては、地下水シナリオを主体として、すべての評価対象核種が地下水を媒体として生物圏に流入し、表層環境中を移行して、人間に到達する経路を想定した。しかしながら、余裕深度処分安全評価において考慮されているような土地利用およびガス移行シナリオを考慮する場合には、ガス状で環境中を移行し、吸入による被ばく等を主な経路とする核種を想定する必要がある。また、C-14 や Cl-36 は環境中を気体状で移行することから、地下水シナリオにおける核種移行モデルとは異なるモデル体系で評価する必要があるとの前提に立ち、例えば、BIOPROTA においては、これら核種の環境中移行に関する各国のモデルの比較等が行われている（Sheppard and Thorne, 2005⁴⁰⁾）。BIOPROTA の検討では、C-14 に関しては、多くの生物圏評価モデルで対象としている河川や湖沼等の表層水や井戸、海洋、人間が居住する土壌のみならず、大気や森林等を含む生態系全体をモデル化の対象領域としており、植物による二酸化炭素の取り込み／放出等を考慮する必要があるとしている。ガス状での核種移行（地下水によって生物圏にもたらされた核種が地表で揮発するといった現象を含む）に関しては、これまでの地層処分生物圏評価においては考慮していないことから、この

ような移行経路を設定する必要が生じた場合に必要、核種の挙動について把握しておく必要がある。一方、C-14 や I-129 等、自然界に安定元素が多く存在する核種に関しては、植物への核種の取り込みの際の同位体希釈の影響が指摘されている（資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構，2006b⁴¹⁾，2009b⁴²⁾）ことから、地層処分研究開発第 2 次取りまとめで取り扱ったような、移行係数に基づく核種移行モデルの是非を議論する必要があることが言われている。

さらに、被ばく経路の抽出に関しては、国際放射線防護委員会（ICRP）が提唱する放射線防護の考え方を踏まえたうえで、地域の特徴を反映した被ばくグループを抽出し、被ばく経路を漏れなく抽出することが求められる。1. 4 で述べたとおり、人間の生活様式については、100 年先の予測も困難であるものと考えられている。しかしながら、種として人類が極端に変貌するとは考えにくく、個人の活動に必須となる水や熱量の摂取量の変動は、現存の人類のそれと同等と仮定することは不合理ではないと考えられる（原子力安全委員会 原子力バックエンド対策専門部会，1997⁴⁾）。このことから、まずは、諸外国での検討や BIOMASS のアプローチ等を参照し、現世代の人々の生活習慣や活動の様式を踏まえて、サイトの特徴を考慮した生物圏評価において考慮すべき項目（被ばく経路設定と、モデル構築およびパラメータ設定に必要な情報とそのソース）を整理し、被ばく経路を抽出するための方法論を構築することが重要である。また、サイトの特徴を踏まえつつ、評価において考慮すべき被ばくグループの種類とその大きさを設定し、その中から、決定グループを抽出するための考え方を整理しておくことも肝要である。

また、再処理施設の平常時の線量評価等においては、評価対象となる地域における住民の生活習慣に関しては、地域における栄養調査等に基づいて設定が行われている。例えば、「再処理事業所 再処理事業指定申請書」（日本原燃株式会社，1989⁴³⁾）で引用された「六ヶ所村の社会環境調査結果報告書」（日本エヌ・ユー・エス株式会社，1990⁴⁴⁾）では、図書館や役場が所有する統計資料の調査に加えて、アンケート調査により社会・環境データの調査・収集が行われている（原子力安全基盤機構，2006⁴⁵⁾）。このような調査に基づくことで、評価対象地域における食物摂取量等を設定するだけでなく、地域特有の被ばく経路を抽出することも可能になると考える。したがって、現地における調査（統計資料調査，アンケート調査）において、地域の特徴を反映した生活習慣を特定するための調査方法を整理しておく必要がある。

以上のことを踏まえて、現在の表層環境条件に基づくシステムの理解に関わる課題としては、以下のものが挙げられる。

- ・ 生物圏評価の観点からの地下水と地表水・海水，および地表水・海水中の水・物質移行プロセスの検討
- ・ ガス状で移行する核種の移行
- ・ 核種の存在形態の違いや同位体の存在が環境での核種移行挙動に与える影響の把握
- ・ 決定グループ／被ばくグループの考え方の整理
- ・ 地域特有の生活習慣（特別な食習慣等）の把握

(2) 近い将来の表層環境条件を想定したシステムの理解

高レベル放射性廃棄物の地層処分は、深地層に処分された放射性廃棄物に含まれる放射性核種が地表まで移行し、人間に影響を与えうるまでの期間が極めて長いという特徴を有している。そのため、安全評価においては長期の処分環境の時間的変遷に関して何らかの対処が必要となる。

特に、生物圏評価においては、深地層で想定される緩慢な処分環境の変化に比較して、人間の生活様式のように、短期間においてもその変化が予想し難いものも含まれる。したがって、概要調査地区が選定され現地での調査が進められたとしても、そこで取得されたデータは将来的に変動することが容易に想像できることから、それらを直接用いた安全評価は、時間的変遷による変動を網羅的に考慮したものではない。

環境の時間的変遷を考慮した生物圏評価モデルの構築にあたっては、サイトにおける地形変化や気候変動等の推定に関する情報を参照して、表層環境の変遷を適切に記述する必要がある。また、BIOMASSアプローチの中で、評価条件に基づく生物圏の状態をどのように設定するかという観点から、変遷の取り扱い（連続的に捉えるか、非連続的に捉えるか）についても言及されている。このような表層環境の時間的変遷は、国内では具体的に扱われておらず、その推移を記述するための生物圏の状態の捉え方を検討しておくことは重要である。

生物圏評価における将来変遷予測においては、地形、地質の状態とともに水文的環境（地下水位、河川、湖沼、海岸線分布等）に関する三次元的な予測結果が必要になる。このような予測には、気候変動（海水準、降水量、気温変動等）、隆起・沈降運動の予測値をもとに、それらが地形、地質および水循環の変化を引き起こすメカニズムを理解しておく必要がある。ここで、重要となる現象として、与えられた地形、降水量、河川流量等の条件にもとづく降水、河川水、海水による侵食・堆積が挙げられる。この侵食・堆積現象は、斜面、河川地形、海底地形等の変化を引き起こし、細かい地形の凹凸を決めることになる。この他に、降水の流出率（降水量と河川流量の比）に影響を与える降水浸透能の土壌・植生条件による変化、気候変動が引き起こす土壌・植生条件の変化、また、これらの現象によって引き起こされる河川、湖沼分布の変化等が重要な現象として挙げられる。さらに気候変動が核種移行に及ぼす影響として、土壌への分配係数および植物への移行係数がどのように変動するかについての知見が必要になる。

なお、治山、ダム工事、潮受け堤防工事等の将来の人間活動が、表層環境に対して天然現象と同様の影響を与える場合も考えられる。このことについても、可能な範囲で表層環境への影響について類型化しておくことが必要である。

また、被ばく経路を設定する際の人間の生活習慣や活動の様式に関しては、地層処分安全評価の目的において、将来の生物圏の状態をどのように想定するかということを考慮したうえで、人間の生活習慣や活動の変遷を想定する必要があるかどうかを判断するとともに、想定する場合には変遷の記述方法について検討する必要がある。

以上のことを踏まえて、近い将来の表層環境条件を想定したシステムの理解に関わる課題としては、以下のものが挙げられる。

- ・ 気候変動、隆起・沈降運動の予測データの収集・整理
- ・ 与えられた条件における侵食・堆積量の予測
- ・ 土壌・植生条件と降水浸透能の関係の把握
- ・ 気候変動による土壌の性質／植生の変化の把握（温度、地下水位等との関係；耕作植物よび自生植物）
- ・ 地形・地下水位、河川・湖沼の流動特性の変化による河川、湖沼分布の変化予測
- ・ 気候変動による土壌への分配係数／植物への移行係数の変動（温度等との関係）
- ・ 環境条件／社会状況の変化に伴う人間の生活様式の変化の把握（モダンアナログの適用）

(3) 遠い将来の表層環境条件を想定したシステムの理解

遠い将来に関しては、人間の生活様式の変化はもちろんのこと、表層環境の変遷に関しても、過去からの外挿による予測の範囲を超えることから、(2)で述べた近い将来の表層環境条件の延長としてその変遷を捉えたうえで、様式化された生物圏評価モデルを構築するために必要となるシステムの状態を設定・記述する必要がある。

2. 4. 3 モデル構築／パラメータ設定

(1) 現在の表層環境条件に基づくモデル構築／パラメータ設定

地層処分研究開発第2次取りまとめにおける天然バリアからの核種の移行では、帯水層での分散による希釈、地層への収着等を考慮せず、河川に全量が流入することを想定した。しかし、帯水層中での核種の希釈、収着現象を考慮しないこと、および全量を一つの生物圏構成要素に流入させることは、シナリオによっては、必ずしも保守的に作用しない可能性や過度に保守的に作用する可能性がある。そのため、実際に特定されたサイトにおいて天然バリアから生物圏への核種移行を考える場合、核種の希釈、収着等の現象を考慮して、河川・海域等といった各生物圏構成要素への地下水および核種の流出入量を定量的に扱い、その結果を生物圏評価モデルに適用することが求められる。その場合、河川・海域等といった各生物圏構成要素への地下水および核種流出入量を定量的に扱える表層環境における水理・物質移行モデルを作成し、その解析結果を評価に利用することになる。

この「生物圏評価モデルへの適用」という条件が解析に課せられるため、ベースとして用いる通常の地下水汚染における解析手法に対して、モデルの設定や解析結果の処理、分散現象の解析手法、分散長の取り扱い等について新たに解決すべき技術的な課題が発生する。また、生物圏コンパートメントモデルを設定する際には、従来は考慮されていなかった水理・物質移行結果や土地利用条件等をサイト固有の情報を利用することが求められる。このような課題については、適宜選定した課題検討のためのサイトを例としてこれらを試行していく方法を採用することを予定している。なお、生物圏評価に利用することを目的とした表層環境における水理解析は、世界的にはスウェーデン (Gustafsson et al., 2008²⁹⁾)、フィンランド (Hjerpe et al., 2010³⁰⁾) 等で実施されている。

被ばく経路の設定に関しては、1. 4. 2において、評価対象となる地域における住民の生活習慣に関する現地調査がシステムの理解として有効であることを述べた。このような情報に基づき、サイトの

条件を反映した被ばく経路を設定するにあたっては、生活習慣に関する資料／調査に基づく被ばく経路の候補の抽出（摂取，吸入物の種類，職業や余暇活動を考慮）と，抽出した被ばく経路の分析（経路の重複はないか）を行う必要がある。なお，被ばく経路を設定するにあたっては，再処理施設の安全審査指針（原子力安全委員会，1985⁴⁶⁾）に示されるような代表的な被ばく経路のうち，地層処分においても考慮する必要がある農・畜産物摂取による内部被ばく等の経路を想定するとともに，地域の特徴を反映した被ばく経路が存在し，かつ，その経路が支配的となる可能性が否定できない場合には，それを漏れなく抽出するための方法論を構築しておく必要がある（例えば，摂取および吸入による内部被ばくと外部被ばくの被ばくモードに基づき，評価対象となる人々の習慣や行為といった生活様式を整理したリストに基づき，被ばく経路のチェックを行う等）。

地層処分生物圏評価において取り扱うパラメータは，「環境条件に基づき設定されるパラメータ（例：河川流量，灌漑水量）」，「人間の生活習慣に基づき設定されるパラメータ（例：食物摂取量，呼吸率や居住地における滞在時間）」，「元素固有パラメータ（例：土壌への分配係数，農作物への移行係数，畜産物・海産物への濃縮係数）」に分類することが可能である。原子力機構における既往の生物圏評価では，環境条件および生活習慣に基づき設定されるパラメータ（河川流量や灌漑水量，食物摂取量等）に関しては，我が国の統計資料等から，我が国の一般的な状況を表す値を引用した。これらのパラメータについては，余裕深度処分安全評価の考え方においても，「可能な限り評価対象地点及びその周辺の関連する情報や国内の統計データに基づき設定すること」とされている。したがって，現地調査の必要性（評価結果への感度等を考慮）と取得実現性を検討し，サイトで取得すべきデータリストを提示したうえで，適宜調査計画に反映することが重要となる。現地調査の必要性を議論するにあたっては，既往の生物圏評価パラメータに対する感度解析等による重要度分析の結果（加藤・鈴木，2008¹⁶⁾；Kato et al., 2009¹⁸⁾）等を参照しつつ，生物圏評価パラメータの重要度について議論しておく必要がある。一方，土壌への分配係数や農作物への移行係数，畜産物・海産物への濃縮係数等，元素固有パラメータに関しては，地層処分研究開発第2次取りまとめ等の既往の検討を行った時点では，我が国のデータが十分に整備されていなかったことから，諸外国の性能評価報告書等で用いられている値を中心に引用した。文献調査および概要調査段階における迅速なパラメータ設定の実施という目的において，あらかじめ，わが国における既往研究において取得されたデータを整理しておく一方で，既存の資源の有効活用の観点から，地層処分研究開発第2次取りまとめ等において利用した諸外国の環境条件で取得されたデータを，我が国の生物圏評価におけるパラメータとして利用可能であるかどうかを確認しておくことも有効である。具体的には，国内外で取得された既往の研究結果から，我が国における地層処分生物圏評価パラメータを設定する際に活用可能な情報を収集し，評価への適合性を判断できる根拠とともに整理，データベース化しておくことが課題として挙げられる。

以上のことを踏まえて，現在の表層環境条件に基づくモデル構築／パラメータ設定に関わる課題としては，以下のものが挙げられる。

- ・ 生物圏評価を目的とした表層水理・物質移行解析
- ・ 水理・物質移行解析結果，地理情報（土地利用条件等）を利用したコンパートメント設定

- ・ サイトの条件を反映した被ばく経路の設定
- ・ サイトの条件を反映した生物圏評価パラメータの設定

(2) 近い将来の表層環境条件を想定したモデル構築／パラメータ設定

近い将来における生物圏評価について、現在を対象とした場合と同様にモデルにおける水理・核種移行結果を評価に利用する場合は、隆起・沈降運動、気候変動予測に基づいて表層環境の予測モデルを作成する必要がある。その場合、前節で述べた隆起・沈降および侵食・堆積による地形変化等のメカニズムを考慮し、さらに連続的なモデル・境界条件の変化に対応した地下水流動が考慮された表層環境予測モデルが必要になる。そして、このモデルに基づき、現在の表層環境条件に基づくモデル構築で培った技術を利用して予測された将来における核種移行解析を行うことになる。

実際に表層環境予測モデルを構築する場合、各メカニズムに着目したいくつかの個別のモデルを構築し、最終的に全てのメカニズムを統合したモデル構築を図る事が現実的である。このような個々のメカニズムに着目したモデル構築については、既に原子力機構内における地質環境の長期安定性に関する研究の一環として、例えば河川および海域の侵食・堆積による地形変化モデル（草野ほか、2010⁴⁷⁾が作成されている。今後は、このような個々のモデルの特性や研究の進展を把握するとともに、他に必要なモデルの構築方法や個々のモデルの統合方法について検討していく必要がある。

また、サイトにおける表層環境の変遷を考慮した場合、環境の変遷に基づき、人間の生活様式（食習慣や余暇活動等）が変化することが考えられる。例えば、鈴木ほか（2006）¹³⁾において気候の寒冷化（冷帯気候およびツンドラ気候）を想定した生物圏評価モデルを構築した際には、気候条件に合致した社会活動（農業および漁業習慣）が行われることを仮定した。例えば、ツンドラ気候においては、サイトにおいて米が栽培されなくなることを想定し、地産地消ではなくなるとして、生物圏評価における被ばく経路から削除した。将来の人間の生活様式を予測することは困難であり、人間が摂取する食物の種類の変化等をもっともらしく予測することは不可能である。したがって、人間の代謝や生理学的事項、摂取熱量等は将来にわたっても継続するという仮定を置き、現在の環境条件で想定される被ばく経路をベースとしつつ、環境の変遷に基づき設定可能な範囲での生活様式の変化を考慮して、被ばく経路を設定する必要がある。

さらに、近い将来の表層環境条件を考慮したパラメータ設定に関しては、気温や地形の変化によって影響を受けるパラメータを抽出するとともに、日本国内もしくは諸外国における環境条件を反映したデータをアナログとして用いることを想定し、表層環境の変遷に基づくパラメータ変動を考慮したデータベースを整備しておく必要がある。

以上のことを踏まえて、近い将来の表層環境条件を想定したモデル構築／パラメータ設定に関わる課題としては、以下のものが挙げられる。

- ・ 表層環境における変遷の予測モデル構築
- ・ サイト条件の変遷を反映した被ばく経路の設定（表層環境の変遷に基づき設定可能な範囲での人間の生活様式の変化を考慮）

- ・ 表層環境の変遷に基づくパラメータ変動を考慮したデータベースの整備（国内外のデータを参照）

(3) 遠い将来の表層環境条件を想定したモデル構築／パラメータ設定

遠い将来を対象とした生物圏評価では、近い将来の場合のようにモデルを用いた連続的な表層環境の予測は行わず、蓋然性の高いと思われるいくつかの表層環境条件を仮定して、その条件において評価を行う可能性が高い。そのため、評価に用いる表層環境については具体的に三次元的な条件設定が明らかになっているわけではなく、大まかな地形・気象等の環境条件が設定されていることを前提に生物圏評価モデルを構築しなければならないと思われる。

その場合、生物圏評価モデルに必要な環境条件に基づき設定されるパラメータ（河川流量等）やコンパートメント構成は、近い将来を対象にした生物圏評価における環境条件の変遷とその際に用いた生物圏評価モデルの関係を把握し、その関係性から推定して、遠い将来における生物圏評価モデルの構築に適用する。このような近い将来における生物圏評価における環境条件の変遷と生物圏評価モデル設定の関係を把握し、遠い将来における評価に適用する方法については、今後実際の解析により試行していくことが必要な課題である。ただし、ここで得られる結果は不確実性が大きくなるため、結果の提示方法についても検討していく必要がある。

また、遠い将来の環境条件を想定した生物圏評価においては、その時点での人間の生活様式を想定することは到底不可能であり、IAEAのTECDOC (IAEA, 1999¹⁾)やBIOMASSアプローチ (IAEA, 2003²⁾)において示されているように、様式化の考え方に基づいて仮想的な被ばくグループ（もしくは個人）を想定し、現在および近い将来における生物圏の状態をアナログとして適用することにより、人間の生活様式を設定することとなる。このとき、過小評価とならないことはもちろんのこと、過度に保守的な評価結果とならないことも目指す必要があり、合理的で保守的な被ばく経路の設定に関する具体的な考え方を整理しておく必要がある。

以上のことを踏まえて、遠い将来の表層環境条件を想定したモデル構築／パラメータ設定に関わる課題としては、以下のものが挙げられる。

- ・ 環境条件の変遷と生物圏モデル設定の関係の把握
- ・ 様式化に基づく仮想的被ばくグループ（もしくは個人）の設定（合理的かつ保守的な被ばく経路の設定を含む）

2. 4. 4 課題のまとめ

2. 4. 1 から 2. 4. 3 で述べた課題について表 2.4-1 に整理する。

表 2.4-1 生物圏評価における課題（評価対象期間を軸とした分類）

	現在（処分後 100 年程度まで）	近い将来（処分後 1 万年程度まで）	遠い将来（処分後 1 万年以降）
評価条件の設定	<ul style="list-style-type: none"> 評価対象期間ごとの生物圏の取り扱い 生物圏評価における不確実性の取り扱い 	<ul style="list-style-type: none"> 近い将来（処分後 1 万年程度まで） 	<ul style="list-style-type: none"> 遠い将来（処分後 1 万年以降）
システムの理解	<ul style="list-style-type: none"> 生物圏評価の観点からの地下水と地表水・海水、および地表水・海水中の水・物質移行プロセスの検討 ガス状で移行する核種の移行 核種の存在形態の違いや同位体の存在が環境での核種移行挙動に与える影響の把握 決定グループ／被ばくグループの考え方の整理 地域特有の生活習慣（特別な食習慣等）の把握 	<ul style="list-style-type: none"> 気候変動、隆起・沈降運動の予測データの収集・整理 与えられた条件における侵食・堆積量の予測 土壌・植生条件と降水浸透能の関係の把握 気候変動による土壌の性質／植生の変化の把握（温度、地下水位等との関係；耕作植物および自生植物） 地形・地下水位、河川・湖沼の流動特性の変化による河川、湖沼分布の変化予測 気候変動による土壌への分配係数／植物への移行係数の変動（温度等との関係） 環境条件／生活習慣の変化に伴う人間の生活様式の変化の把握（モダンナログの適用） 	<ul style="list-style-type: none"> 同左
モデル構築／パラメータ設定	<ul style="list-style-type: none"> 生物圏評価を目的とした表層水理・物質移行解析 水理・物質移行解析結果、地理情報（土地利用条件等）を利用したコンパートメント設定 サイトの条件を反映した被ばく経路の設定 サイトの条件を反映した生物圏評価パラメータの設定 	<ul style="list-style-type: none"> 表層環境における変遷の予測モデル構築 サイト条件の変遷を反映した被ばく経路の設定（地表環境の変遷に基づき設定可能な範囲での人間の生活様式の変化を考慮） 表層環境の変遷に基づくパラメータ変動を考慮したデータベースの整備 	<ul style="list-style-type: none"> 環境条件の変遷と生物圏モデル設定の関係の把握 様式化に基づく仮想的被ばくグループ（もしくは個人）の設定（合理的かつ保守的な被ばく経路の設定を含む）

3. 当面 5 カ年における研究

3. 1 課題と目標

「独立行政法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標（中期目標）」（文部科学省，経済産業省，2010⁴⁸⁾）では，地層処分研究開発の第 2 期中期計画期間の目標のひとつとして，高レベル放射性廃棄物の処分技術に関する研究開発において，「工学技術や安全評価に関する研究開発を実施し，これらの成果により地層処分の安全性に係る知識ベースの充実を図る」こととしている。なお，第 2 期中期計画期間は，平成 22 年（2010 年）4 月 1 日から平成 27 年（2015 年）3 月 31 日までの 5 年間として，平成 17 年度から平成 22 年度までの第 1 期中期計画期間に引き続き設定されている。また，この目標を受けて，「独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）」（日本原子力研究開発機構，2010b⁴⁹⁾）では，地層処分研究開発の今期中期計画期間の計画のひとつとして，「地層処分深地層の研究施設等を活用して，実際の地質環境条件を考慮した現実的な処分場概念の構築手法や総合的な安全評価手法を整備する」ことを挙げている。なお，我が国における地層処分研究開発を計画的かつ効率的に進めるために，経済産業省資源エネルギー庁は 2005 年に「地層処分基盤研究開発調整会議」を設置し，中長期的かつ体系的な視点での研究開発計画の検討・調整を行ってきた。さらに，2006 年には，「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」（資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構，2006a¹⁹⁾）および「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」（資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構，2006b⁴¹⁾）が策定され（2009 年に改訂（資源エネルギー庁，日本原子力研究開発機構，2009a²⁰⁾, b⁴²⁾），関係する研究開発機関は，これらの計画に基づき各分野における研究開発を実施している。

上記の中期目標および中期計画を受けて，生物圏評価の当面 5 カ年における研究目標を「表層環境を考慮した生物圏モデル構築フローと我が国の特徴を考慮した移行パラメータの整備」とした。これは，「サイト条件が与えられた場合に現地情報を利用した生物圏評価を行うために現段階で必要とされる手法の開発と知識ベースの構築」を図るものである。この目標に基づき，2. 4 で挙げた課題を整理しつつ，「与えられる地表・地質環境の条件およびそれらの長期的変遷と整合的な生物圏評価の考え方の整理，評価手法の確立」の観点から，2. 4 で述べた「現在の表層環境条件に基づくモデル構築／パラメータ設定」および「近い将来の表層環境条件を想定したモデル構築／パラメータ設定」を主な対象とし，当面 5 カ年における研究課題①～③として，以下のように設定した。

- ① 表層環境における水理・物質移行の 3 次元解析結果や文献情報等に基づく生物圏評価モデル構築の試行による，モデル構築フローの整備
- ② 我が国の環境条件を反映した生物圏評価パラメータの設定に向けたデータベースの整備
- ③ 長期的な変遷を考慮した生物圏評価の考え方の整理とモデル構築

なお，「現在におけるモデル構築／パラメータ設定」については，「生物圏評価パラメータの設定に向けたデータベース整備」について扱う研究課題②と生物圏モデル構築におけるそれ以外の一連の作業に関わる研究課題①に分割した。

次項以降に，各研究課題の実施内容として，具体的な計画および進め方を示す。

3. 2 実施内容

3. 2. 1 表層環境における水理・物質移行の 3 次元解析結果や文献情報等に基づく生物圏評価モデル構築の試行による、モデル構築フローの整備

(1) 目的

本課題の目的は、サイトの現況に関するできる限り詳細な情報を用いて生物圏評価を行うために現段階で必要とされる手法を開発し、その成果を生物圏モデル構築フローおよび手順書に反映させることである。このような現況データを用いた評価は、将来に対する評価についての基礎となるものである。なお、生物圏モデルでは、その構築手法が複雑で内容も多岐に渡るため、生物圏モデル構築フローに示された各手順について、より詳細にその内容を解説した文書である「手順書」を作成し、フローに基づいて実際に作業を実施する際の指針とする。また、「生物圏評価パラメータ設定のためのデータベース整備」に関する課題は、研究課題②で扱うため本研究課題から除外する。

地層処分研究開発第 2 次取りまとめにおけるレファレンスケースでは、保守的な評価となる可能性が高いとされたことから、天然バリアからの放射性核種の移行において、帯水層での分散による希釈、地層への収着等を考慮せず、河川に全量が流入することを想定している。しかし、このような想定は、シナリオによっては、必ずしも保守的に作用しない可能性や逆に過度に保守的に作用する可能性がある。

そのため、実際に特定されたサイトにおいて天然バリアから生物圏への核種移行を考える場合、水理現象（核種の希釈、収着等）を考慮し、その結果を生物圏モデルに適用して、より現実に近いと考えられる評価をすることが求められる。本研究課題では、これまで生物圏評価において扱うことの少なかった表層環境における実際の水理現象や土地利用条件等に関する地域情報のコンパートメント設定への適用に着目し、これらを考慮して生物圏モデルを構築する際の技術的な課題やその対応についてあらかじめ検討し、生物圏モデル構築フローおよび手順書に役立てることを目的とする。

(2) 実施内容

本課題では、生物圏モデル構築の方法論検討のために選定した地域について、昨年度までに作成したモデル構築フロー（図 2.2-3）に従って実際の評価に必要な作業を行うとともに、その作業に必要な課題について対応する方法を採る。本課題の作業は、モデル構築フローのうち、生物圏コンパートメントの設定作業に関わるが、この作業については、地層処分研究開発第 2 次取りまとめの段階から地域情報をもとにした水理解析作業が追加されている。

本研究で検討する生物圏評価に必要な作業については、大きく

- 1) 表層環境における水理・物質移行解析
- 2) 生物圏コンパートメントモデル作成

に分けられる。

表層環境における水理・物質移行解析は、対象領域が通常の地下水汚染等に比べて非常に広範囲になり、解析期間が長期になる。また、その成果を生物圏モデルの設定において利用できるようにするためには、河川、河川堆積層、湖沼、湖沼堆積層、海域、海域堆積層等の生物圏コンパートメントとなる要

素が表層環境モデルに組み込まれ、さらに計算結果からこれら各コンパートメントへの地下水・核種の流出量を取り出せることが必要になる。また、河川・湖沼・海域等は三次元的に分布しているため、表層環境モデルは三次元で作られる必要がある。これらのことから、生物圏評価における水理・物質移行解析では、通常の地下水汚染解析にはない技術的な課題が発生する。また、地層処分研究開発第2次取りまとめでは、サイトを特定せず、ジェネリックな表層環境を想定して生物圏コンパートメントを作成したが、水理・物質移行解析結果や人口や土地利用等の地域情報を利用したコンパートメント設定方法については、まだ具体的な検討がされていない。

(3) 細目課題

本研究の作業には、新規性のある内容が含まれており、それぞれに検討すべき細目課題が生じることになる。これら作業ごとに生じる細目課題について、表 3.2-1 にまとめた。これらは、優先的に実施するランク（優先度）を決め、今後 5 カ年の各年度において、研究の進展状況や残された課題、新たに発生した課題等について見直すようにする。

各課題の優先度の基準としては、表層水理解析の結果を利用した生物圏モデル構築までを行うために最低限必要となる一連の作業に関する課題を最も高い優先度である A とし、さらに解析を高度化するために必要な課題を優先度 B、将来的に必要な可能性がある課題を優先度 C とする。

以下でそれぞれの細目課題について紹介する。

表 3.2-1 表層環境における水理・物質移行の3次元解析結果や文献情報等に基づく生物圏評価モデル構築およびパラメータ設定の試行による、モデル構築フローの整備における細目課題

作業	細目課題	優先度
1) 表層環境における水理・物質移行解析	1-1) 数値分散の発生しない物質移行解析手法の開発(ランダムウォーク法プログラム作成)	A
	1-2) 分散長設定方法の検討	A
	1-3) 河川・湖沼・海域堆積層の物性値設定	B
	1-4) 広域地下水流動モデルと表層環境地下水流動モデルの連結	B
	1-5) 海底地下水湧出に関する検討	C
2) 生物圏コンパートメントモデル作成	2-1) 表層水理解析結果の生物圏コンパートメントモデル設定への適用	A
	2-2) 生物圏コンパートメントの平面領域設定	B

1) 表層環境における水理・物質移行解析

1-1) 数値分散の発生しない物質移行解析手法の開発

現在、通常の物質移行解析では差分法または有限要素法が用いられることが多いが、これらは、移流

分散問題を解く際に数値分散が発生する。数値分散は、解析において人為的に発生する分散であり、これがあると分散係数が設定した値より見かけ上大きくなる。数値分散の大きさはペクレ数 Pe の大きさによるため、その抑制にはペクレ数を一定値以下にすることが推奨されており、例えば、地下水モデルに関する書籍 (Anderson and Woessner, 1994⁵⁰) では 1 以下にすることが薦められている。

分散係数 D の設定に分散長 α_L を用いる場合、ペクレ数とセルまたはメッシュの格子幅 Δx の関係は

$$Pe = \Delta x / \alpha_L$$

となり、ペクレ数 1 以下の条件を満たすには、格子幅を分散長以下にする必要がある。そのため、分散長の値が小さく解析領域が大きい場合、セルまたはメッシュ数が増加し、計算が不可能になったり計算時間が極度に増加したりすることがある。特に空間スケールの大きい三次元モデルを使用し、長期間に渡る物質移行解析を実施する場合は、この問題は計算実施に対して大きな障害となる。生物圏評価に用いるような物質移行解析の場合、平面範囲が数 10km×数 10km 程度になる可能性があり、その場合に例えば格子幅を 10m とするとセルまたはメッシュ数は千万~億単位となってしまい、計算に支障をきたす可能性が高い。

縦分散長は一般に移行距離に比例するとされているので、解析領域が大きい場合、領域の大きさにあわせて移行距離および分散長が大きくなるのであれば、この問題を回避できる可能性もある。ただし、分散長は、移行距離が大きくなってもある程度以上の値にはならない可能性が高いこと、および分散長の不確実性が大きく、値に幅をもたせて検討するために解析できる分散長の下限を小さくしておく必要があることから、この可能性のみに期待することは避けることが望ましい。

そのため、通常の差分法または有限要素法とは異なる数値分散を抑制できる解析方法についても検討しておく必要がある。このような数値分散の抑制は、例えばスウェーデンにおける生物圏評価 (Gustafsson et al., 2008²⁹) でも、課題の一つとして挙げられている。そのような解析方法のひとつとして、ランダムウォーク法が挙げられる。

ランダムウォーク法は、地下水流速ベクトルから求められる移流ベクトルに分散を考慮したばらつきを加えることにより、分散の効果を粒子による移流解析で代用させる方法であり、数値分散が発生しないという利点がある。ただし、解析精度を確保して空間的に滑らかな粒子数密度の分布が得るには多数の粒子を発生させる必要があるため、求める滑らかさによっては計算時間が多くかかる。また、分散係数が大きな場合、計算のタイムステップの関係から、他の計算方法より時間がかかってしまう等の欠点がある。このため、条件によって適宜解析方法を選択する必要があるが、数値分散の発生しないランダムウォーク法を解析方法の選択肢の一つとして持つておくことは、異なる解析方法の精度の確認をするうえでも有用である。

ランダムウォーク法は、いくつかの市販ソフトに組み込まれているが、現在本研究における地下水流動解析で使用しているソフト MODFLOW については、対応するランダムウォーク法プログラムは市販されていない。そのため、本課題では、MODFLOW の解析結果に対応できるようなランダムウォーク法プログラムを作成し、生物圏評価に利用することを試みるとともに、現在のランダムウォーク法の技術動向を調査し、より発展させた機能を随時追加していくようにする。

1-2) 分散長設定方法の検討

通常の地下水汚染等における物質移行解析では、分散長は物質の移行距離に比例した値（1/10～1 倍程度）で与えられ、移行距離は、解析対象時間内に最終的に物質が移行した距離とみなされることが多い。地下水における物質移行では、物質の希釈の程度は分散長の影響を大きく受け、例えば、瞬間注入した物質が地下水により移行する際に形成されるプルームの最大濃度は、他の条件を変えない場合、分散長に反比例することになる。

地下水汚染等では、移行距離は数 100m 程度である場合が多いが、生物圏評価に用いるような物質移行解析の場合は数 10km 程度になる可能性がある。実際のサイトにおいて、トレーサ試験等による分散長の測定が可能な場合であっても、試験時の移行距離は実際に想定される生物圏評価領域での移行距離に比べて限られた範囲になることが予想される。そのため、実測値を解析に適用する場合は、分散長と移行距離との関係性を理解したうえで、その値を理論的に拡張して用いることになる。この関係性について、分散長は、単純に移行距離に比例するのではなく、一定の距離を流下するまでは増加するが、それを過ぎれば一定の分散長値に収束する傾向が指摘されている（中川，2009⁵¹⁾）。生物圏評価を目的とした物質移行の解析者は、分散長の設定にあたって、このような関係性を的確に把握するため、分散現象に関する理論的な背景を理解しておく必要がある。

本課題では、分散長に関する既存文献を整理して、そのメカニズムや実測方法、実測値の精度、解析において分散長を設定する場合の根拠等についての考え方をまとめ、解析者が適切に分散長を設定できるとともに、適切な実測方法の提案ができるようになるための参考資料を作成することを目的とする。

1-3) 河川・湖沼・海域堆積層の物性値設定

生物圏評価では、河川・湖沼・海域等の水域の底部における堆積層は、表層環境を移行してきた核種の生物圏への流入口となるため、その特性が重要になる。特に透水係数・収着係数等の物性値は、河川・湖沼・海域等への地下水や核種の流出入量に影響を与える。しかし、堆積層に着目してこのような物性値をまとめた資料がないため、文献調査によりこれらのデータについて整理する。

1-4) 広域地下水流動モデルと表層環境地下水流動モデルの連結

表層環境における地下水流動は、天然バリアから表層環境へ流出入する地下水の影響を受けることになる。そのため、天然バリアにおける地下水流動を支配するより広範囲な広域地下水流動モデルの解析結果が表層環境における地下水流動解析モデルに影響を与え、相互の解析結果に矛盾が生じないようにする必要がある。この 2 つのモデルを連結する方法として、表層環境地下水流動モデルにおける境界条件を広域地下水流動モデルの解析結果から与えるネスティングと呼ばれる方法が採られることが多い。

本課題では、ネスティングのプログラムを作成するとともに、広域地下水流動モデルと表層環境地下水流動モデルの連結を実際に行い、適切なモデル連結方法を検討する。

1-5) 海底地下水湧出に関する検討

海底地下水湧出は、最近の地下水学における大きな課題の一つであり、いくつかの学術雑誌で特集テー

マとなっている（海洋出版株式会社，2001⁵²⁾，日本地球化学会，2005⁵³⁾）。生物圏評価対象領域が沿岸である場合，海底は天然バリアから移行してきた核種の流出先と成り得るため，生物圏評価の観点からも海底地下水湧出は重要な課題である。特に海底地下水湧出量は，最終的な核種の移行先について河川・湖沼等と海域との分配を左右する重要な値となる。

海底地下水湧出量は地下水流動モデルにより計算することができるが，その際の計算値が現実的に妥当であるかを評価することは，モデル設定の妥当性を評価するうえでも重要である。ただし，サイトにおいて海底地下水湧出量を高い精度で実測することが困難である可能性があるため，既存文献により海底地下水湧出量の一般的な値，および場所による値の違いとその原因を把握しておくことは有用である。また，モデルにおいて計算される海底地下水湧出量は，設定された塩淡水境界面形状に影響を受けると思われる。しかし，塩淡水境界面形状をサイトにおいて正確に実測し，モデルに一意的にデータとして与えることは，現状では困難であると思われる。そのため，塩淡水境界面について一般的な性質を既存文献から把握するとともに，実際の地域情報から作成したモデルにおいて，これらをパラメータとして変化させ，海底地下水湧出量の変化との関係を検討しておくことが望まれる。

そこで，本課題では

- ・ 海底地下水湧出量，塩淡水境界面，沿岸域における密度流に関する文献調査
- ・ 適宜選定した地域における塩淡水境界面形状と海底地下水湧出量との関係の検討を行うことにする。

2) 生物圏コンパートメントモデル作成

2-1) 表層水理解析結果の生物圏コンパートメントモデル設定への適用

表層水理解析結果を生物圏コンパートメントモデル設定へ適用する場合，モデル設定値として利用できるよう解析結果を適切に整理する必要がある。解析により，表層水理モデルのセルひとつひとつについて地下水，核種の流出入量が与えられ，その結果や地域情報等を参考にして，生物圏コンパートメント領域を設定する。ひとつの生物圏コンパートメントに該当するセルは多数になるため，生物圏コンパートメント範囲に応じてセルを抽出し，抽出したセルへの地下水流出入量等の解析結果を生物圏コンパートメントにおける値に変換するプログラムが必要になる，本課題ではそのようなプログラムの作成を含めて，表層水理解析結果の生物圏コンパートメントモデル設定への適用方法を検討する。

2-2) 生物圏コンパートメントモデルの平面領域設定

生物圏コンパートメントモデルを設定する場合，平面のある範囲について河川・湖沼等をコンパートメントとして表現することになる。地層処分研究開発第2次取りまとめでは，評価対象地域を一つのコンパートメント群（河川等の1種類のコンパートメントが一つずつ含まれるコンパートメントのグループ）で代表させていたが，サイトが特定されている場合は，地域を平面的に分割し，各分割領域についてコンパートメント群を作成する方が適切に線量を計算できる可能性がある。そのため，本課題では，生物圏コンパートメントモデルにおける適切な平面領域設定方法を検討する。

この課題は、コンパートメントモデルの過度な複雑化を避け、かつ過度に保守的にならないモデル設定を行うために重要である。検討方法としては、表層水解析結果とともに土地利用条件等の地域情報を用いて、複数パターンの生物圏コンパートメントモデルを作成して生物圏評価を行い、線量の違いを調べることを予定している。土地利用条件等の地域情報については、コンパートメントモデルの作成に必要な情報を選択し、その情報の入手方法について調査する。地域情報については、数値データになっていないものも多く存在するため、例えば紙媒体の図面から GIS データへの変換方法等についても検討する。

3. 2. 2 我が国の環境条件を反映した生物圏評価パラメータの設定に向けたデータベースの整備

(1) サイトの環境条件を反映した生物圏評価パラメータ設定のための具体的な方法論の構築

地層処分生物圏評価において取り扱うパラメータは非常に数が多く、これらすべてをサイトにおいて取得することは、非常に大きな労力となる。そこで、2. 4. 3に示したようなパラメータの分類（環境条件に基づき設定されるパラメータ、人間の生活習慣に基づき設定されるパラメータ、元素固有パラメータ）と既往の生物圏評価パラメータに対する感度解析等による重要度分析の結果（加藤・鈴木，2008¹⁶⁾；Kato et al., 2009¹⁸⁾）に基づき、現地調査の必要性（評価結果への感度等を考慮）と取得実現性を検討するとともに、事業段階に応じてサイトで取得することが必要となるデータリストとして提示する。

(2) 我が国における生物圏評価の元素固有パラメータ設定に向けたデータベースの整備

元素固有パラメータに関しては、評価に用いるパラメータの数が膨大であることから、サイトが特定されていない現段階の研究開発において、我が国における多様な環境条件を反映したデータベースを作成しておくことにより、文献調査段階および概要調査段階での迅速な生物圏評価パラメータ設定に資することが可能である。その際、引用データの信頼性を担保するためにも、データの背景情報（採取された場所や気候状態等の取得条件、農作物や畜産物であればその種類、データ測定方法等）を把握しておく必要がある。また、国内で取得されたデータが利用できない場合には、国外で取得されたデータを引用することや、化学的類似性等を考慮して、他元素等の適切なデータで代用することも考えられる。生物圏評価パラメータ設定のための国際的なデータソースとしては、情報に関しては、IAEAの Technical Reports Series（例えば、No.472; IAEA, 2010⁵⁴⁾）や TECDOC（例えば、TECDOC-1616; IAEA, 2009⁵⁵⁾）がある。国内のデータに関しては、次に述べる経済産業省資源エネルギー庁委託事業の研究成果が参照可能である。

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業として進められている「放射性廃棄物共通技術調査等委託費放射性核種生物圏移行評価高度化調査」では、我が国の環境条件のもとで、沿岸域での核種挙動評価や TRU 廃棄物処分に係わる重要核種（C-14, I-129）挙動評価、生物圏移行パラメータ推定手法の開発およびデータベースの高度化・拡充が実施されている。そこで、この事業において取得された生物圏移行データ（土壌への分配係数や農作物への移行係数、海産物への濃縮係数）を中心として、我が国で取得された生物圏移行データを、地層処分生物圏評価のパラメータ設定に活用すべく、第 1 期中期計画期間から

引き続き、データベースの整備を進めることとする。なお、本検討は、(独)放射線医学総合研究所(資源エネルギー庁委託事業受託者)との共同作業により行う。具体的な進め方としては、既存のデータベース(地層処分研究開発第2次取りまとめ等で生物圏評価パラメータを設定した際に用いた参照情報等)の利用可能性の検討と、資源エネルギー庁委託事業において取得された我が国における生物圏移行データに基づくデータベース構築として、第1期で作成したテンプレート(加藤ほか, 2009²¹⁾;表3.2-2)に基づき、情報を整理する。本テンプレートでは、生物圏評価パラメータ設定のために必要な参照情報項目を「分類」として抽出した。「分類」欄には、引用文献に関する情報、測定試料(土壌、堆積物、海水、農作物、畜産物、海産物等)の性状を表す情報、測定試料の採取条件および実験条件、数値情報を記載した。次に、「分類」を特徴づける「項目」欄を作成し、「分類」を詳細化・具体化した。本テンプレートに基づき、土壌への分配係数および農作物への移行係数といった陸域における元素固有パラメータについて、データベースの整備に着手しており、これを継続する。また、環境条件に基づき設定されるパラメータ(河川流量や灌漑水量等)に関しては、処分場サイトにおいてデータを取得することが望ましいことから、既往の生物圏評価において用いたパラメータの詳細な設定根拠等を本データベースに格納し、処分場サイトで取得したデータに基づくパラメータ設定に反映させることとする。

表 3.2-2 生物圏評価パラメータ設定のためのデータベース項目のテンプレートの例

分類	項目	単位	内容
パラメータ	パラメータ名	パラメータごと	例) 分配係数
	コンパートメント/農作物/畜産物/海産物	-	例) 表面土壌
	元素	-	例) Se
文献	文献ID	-	文献ごとにID番号を付与
	著者(発行年)	-	西暦年
	頁/図表番号	-	該当文献のどのデータを参照したかを明示
固相(土壌, 堆積物)の特性	土地利用	-	例) 水田, 畑, 牧草地等
	分類	-	例) 黒ボク土, 褐色土, グライ土等
	含水率	%	数値情報
	pH	H ₂ O	数値情報
	塩基置換容量	meq/100g-dry	数値情報
	陽イオン交換容量	meq/100g-dry	数値情報
	置換性Ca	meq/100g-dry	数値情報
	置換性K	meq/100g-dry	数値情報
	活性Al	g/kg	数値情報
	活性Fe	g/kg	数値情報
	EC	μS/cm	数値情報
	全炭素割合	%-dry	数値情報
	有機体炭素割合	%-dry	数値情報
	粘土含量	%-dry	数値情報
	全窒素割合	%-dry	数値情報
	Al _o	g/kg	数値情報
	Fe _o	g/kg	数値情報
	元素濃度	mg/kg	数値情報; 当該元素の実測データ
	その他	適宜	数値情報; その他の重要な実測データ
	液相の特性	種別	-
元素濃度		ppm	数値情報; 当該元素の実測データ
pH		H ₂ O	数値情報
Eh		mV	数値情報
その他		適宜	数値情報; その他の重要な実測データ
農作物/畜産物/海産物の特性	種類	-	農作物) 玄米, 小麦, ニンジン等 畜産物) 牛, 豚, 鶏等 海産物) ヒラメ, ワカメ等
	部位	-	農作物) 葉, 茎等 畜産物) 肉, レバー, 乳, 卵 海産物) 筋肉等
	飼料の種類(畜産物のみ)	-	例) 牧草, 糠, デントコーン等
	元素濃度	mg/kg	数値情報; 当該元素の実測データ
測定試料の採取条件	採取地	-	都道府県名, 市町村名等
	採取年	年	西暦年
	季節	-	春夏秋冬
実験条件	実験方法	-	例) フィールド観測, トレーサ実験等
	測定対象	-	核種名or元素名
	実験温度	°C	数値情報
	実験期間	日	数値情報
	サンプル処理方法	-	例) 風乾○日間, ○○°Cオープンで○時間
数値情報	推奨値	パラメータごと	数値情報
	標準偏差	パラメータごと	数値情報
	統計種別	-	例) 算術平均, 幾何平均, 中央値
	最小値	パラメータごと	数値情報
	最大値	パラメータごと	数値情報
	サンプル数	-	統計処理に用いたサンプル数
参照情報	二次引用文献	-	著者, 発行年, 文献タイトル等
その他	備考	-	上記以外で特記すべき事項

(3) 地層処分生物圏評価情報管理システムの構築

原子力機構における既往の生物圏評価において取り扱った一連の情報(解析条件, 概念モデルおよび数学モデル, データセット, 解析結果等)は, 評価条件に応じてさまざまな解析ケースを設定していることや, 各解析ケースにおいても, 経路ごとの数学モデルや, 元素や核種ごとのパラメータを設定していることから膨大な量となるため, これらの情報をアーカイブとして格納し, 効率的・効果的に管理するためには, Microsoft Access 等のアプリケーションソフトを用いたデータベースシステムを導入する必

要がある。このことを踏まえて、平成 21 年度までに、情報の一括管理や迅速、簡易な抽出等が可能な機能性の高いデータベースシステムである情報管理システムのうち、データ登録、検索・閲覧機能を中心とした基本的な機能までを構築した。生物圏評価情報管理システムの概観を図 3.2-1 に示す。

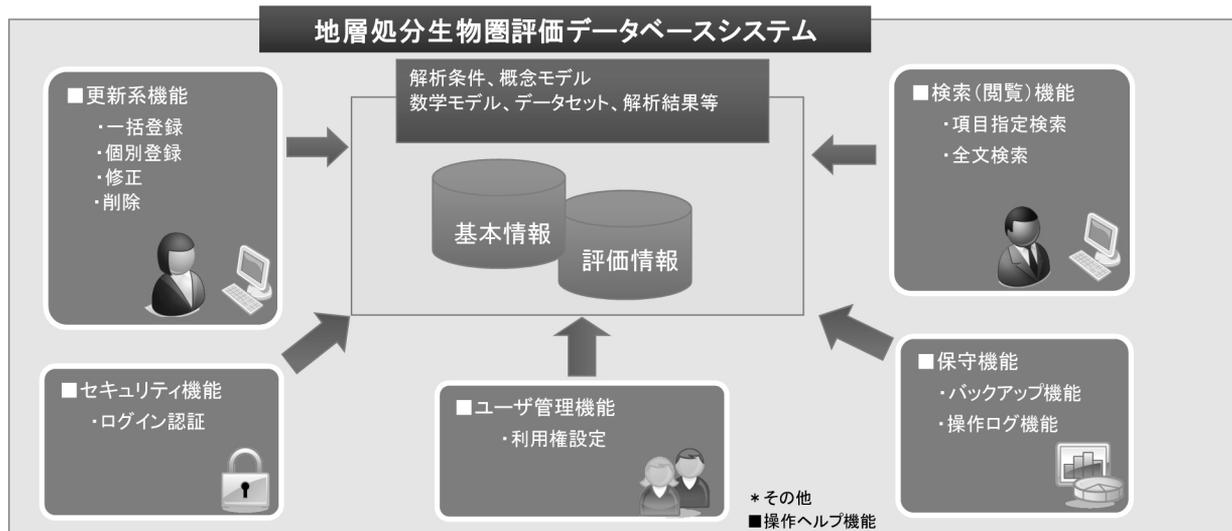


図 3.2-1 生物圏評価情報管理システムの概観

情報管理システムの構築にあたっては、図 3.2-2 に示すような開発スケジュールに基づき、登録・閲覧・検索・編集・出力等からの基本的な操作機能を有するシステムを構築した。第 1 期中期計画期間までに、図 3.2-2 に示す 2 次開発までの登録・閲覧・検索・編集・出力等からの基本的な操作機能の構築をほぼ終えており、生物圏評価研究に関する研究開発報告書や学会発表等の基本情報と、それに付随する評価情報（解析に用いた数学モデルやパラメータセット、解析結果等）を格納・参照するための基本的なシステムを構築した。

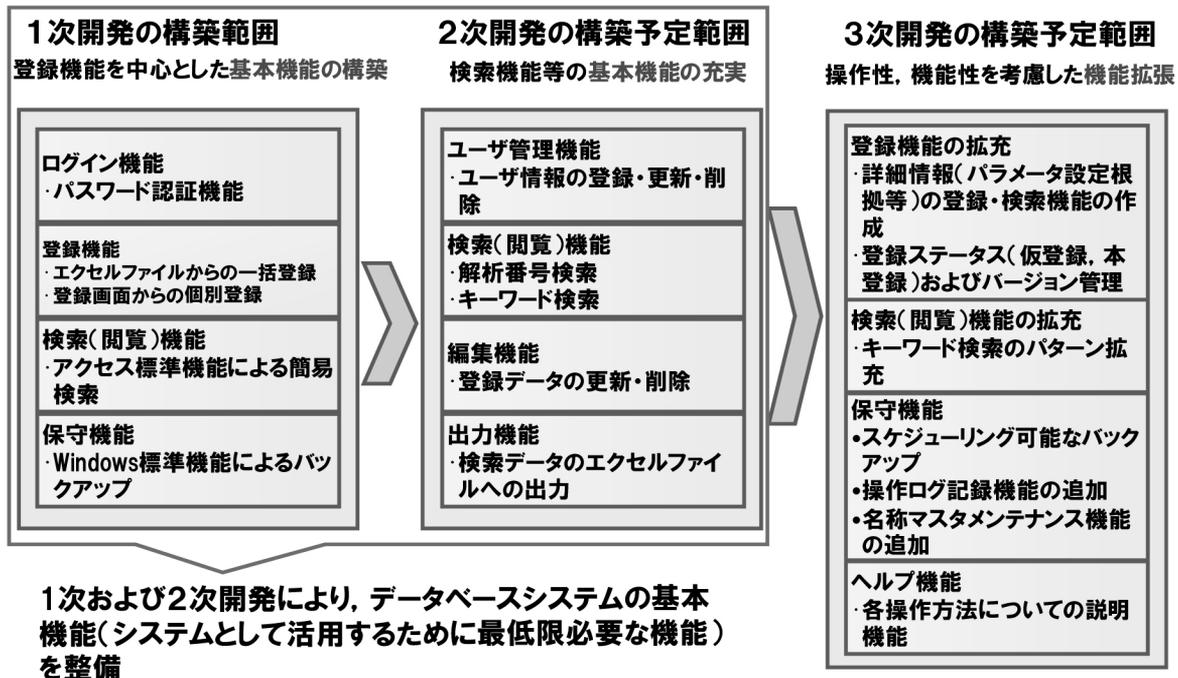


図 3.2-2 システム構築のスケジュール

第 2 期中期計画期間においては、本システムに、パラメータ設定における迅速かつ適切な情報の抽出を可能とするために検索・閲覧機能を拡充することにより、生物圏評価パラメータの設定根拠に関する透明性と追跡性を向上させる。

本情報管理システムは、原子力機構が開発している技術情報統合システム (JGIS ; 河内ほか, 2008⁵⁶⁾) や知識マネジメントシステム (JAEA KMS ; 大澤ほか, 2008⁵⁷⁾) において行う研究開発の実績管理や、知識ベースの管理において、個別研究の成果に関する情報とリンクさせることにより両システムとの連携を図ることが可能である。

(4) 線量算出のための実効線量係数等の整備

地層処分生物圏評価においては、内部被ばく（経口摂取／吸入摂取）および外部被ばくに対する線量係数を用いて、人間が体内に取り込んだ（もしくはさらされた）核種量を線量に換算している。現行の国内法令では、ICRP1990 年勧告 (ICRP, 1990⁵⁸⁾) に準拠し、経口摂取および吸入摂取に対する実効線量係数が定められている (科学技術庁, 2000⁵⁹⁾)。これを受けて、鈴木ほか (2006) ¹³⁾において、現行の国内法令に基づき、線量への換算係数を算出した。一方、外部被ばくに関しては、地層処分研究開発第 2 次取りまとめ等において、入浴および作業（農作業、漁業）に起因する水および土壌からの被ばくを想定した。外部被ばく線量を算出するにあたっては、ICRP1990 年勧告での体系に基づき算出された水および土壌からの外部被ばく線量換算係数 (Macdonald and Laverock, 1996⁶⁰⁾) を採用した。今後の生物圏評価においては、土地利用シナリオにおける作業者の被ばくといった、既往の評価と異なる線源の幾何形状を考慮した線量を算出する必要が生じることが考えられる。そこで、我が国における生物圏評価パラメータ設定のためのデータベース整備の一環として、クリアランスレベル評価のための外部被ばく

線量換算係数算出等に広く利用されている計算コード（例えば、QAD や MCNP）による外部被ばく線量換算係数の整備を行う。

3. 2. 3 長期的な変遷を考慮した生物圏評価の考え方の整理とモデル構築

余裕深度処分の安全評価に関する考え方（原子力安全委員会，2010a⁶⁾）では，生物圏の様式化に関する考え方が述べられており，特に，地質環境に係る長期変動事象の状態設定（表層環境に係わる部分としては，表流水流動の状態設定）に関する取り扱いについては以下のことが示されている。

表流水流動

1) 基本設定

将来の表流水流動は，海水準変動，気温・降水量，及び地形変化等に関する基本設定に基づいて設定する。

2) 変動設定

将来の表流水流動は，海水準変動，気温・降水量，及び地形変化等に関する変動設定のほかに，希釈水流量に直接的に影響する流出域の状況設定に係る不確かさを考慮する。

表層環境における核種移行に関しては，時間変遷に伴う変動の影響を大きく受けるものであることから，長期安定性研究の成果等を踏まえつつ，状態の変化を記述する方法を準備するとともに，評価の目的に応じて変遷をどう取り扱うかについて検討しておくことが重要である。特に，変遷の連続性の取り扱いに関しては，BIOMASS アプローチの一部として示される「評価条件に基づき生物圏の状態を設定するためのステップ」（図 3.2-3；図 2.1-1 の再掲）において，生物圏の状態変化を連続的に表現するか，もしくは離散的に表現するかを判断する部分があり，いずれの場合にも生物圏の状態を記述する場合には，適切な生物圏の状態とその変遷（変遷に関しては連続的な取り扱いの場合のみ）を選択することが求められている。

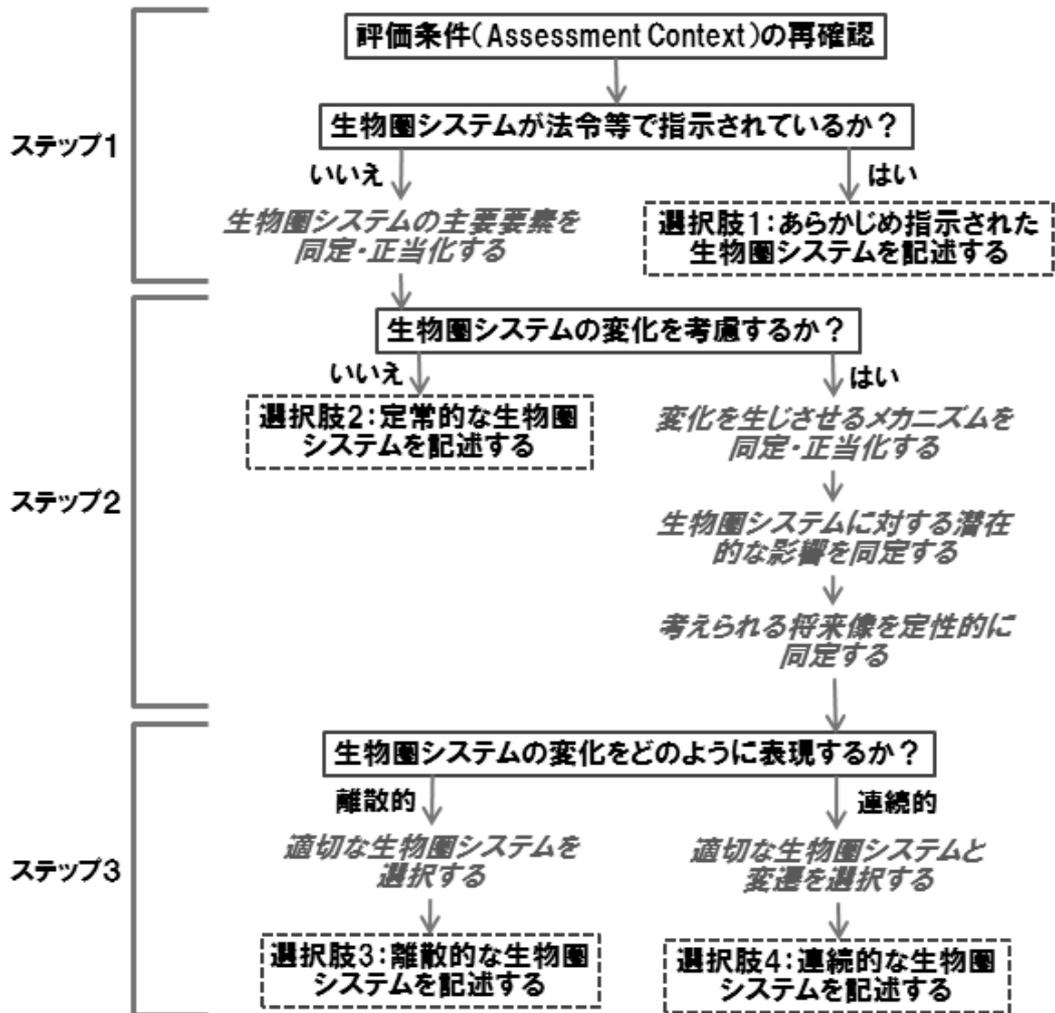


図 3. 2-3 評価条件に基づき生物圏の状態を設定するためのステップ (図 2. 1-1 の再掲)

また、将来の人間の生活様式に関しては、余裕深度処分の安全評価に関する考え方（原子力安全委員会、2010a⁶⁾）に「現世代に対する安全評価において設定されている現世代のそれを前提にすることがもっとも適切」との記述があり、「現世代の人間の生活様式を前提に被ばく経路を想定し、それぞれの被ばく経路ごとに人間への影響の程度を同じく現世代の人間の生活様式を前提に評価すること」を「様式化」と定義している。余裕深度処分の安全評価においては、環境条件の変化による人間の生活様式（生活習慣や食生活）の変化は考慮せず、現在の評価対象地点や日本国内において想定される一般的な生活様式の範囲内で様式化することが求められている。日本国内における一般的な生活様式を想定するにあたっては、生活習慣や食生活の多様化による幅があることが想定される。将来の人間の生活様式の変動幅が、日本国内における一般的な生活様式に包含されているのであれば、結果として、将来の人間の生活様式の変動を考慮していることとなる。また、人間の生活様式の変遷に関しては、表層環境の状態と整合の取れた設定を前提としたうえで、モダンアナログの考え方³⁻¹⁾を適用し、現世代の人間の生活様式に関する情報を参照することにより、適度に保守的な設定を行うことも可能であると考え。地層処分生物圏

³⁻¹⁾ モダンアナログの考え方は、将来起こり得る天然現象やそれに起因する地質環境条件の変化を、現在の現象や周辺の地質環境条件から把握する考え方である（川村ほか、2010⁶¹⁾）。

評価においては、現状の土地利用状況や統計情報に基づき、生活様式や食生活を記述し、被ばく経路を設定できる手法を準備しておく一方で、表層環境の状態と整合が取れる範囲において生活様式の変化（例えば、気候の寒冷化により自給自足が不可能な作物に関しては、その摂取の経路を削除する等）を考慮することも選択肢としておくことができるよう、生物圏の様式化について整理しておく必要があると考える。

そこで、将来の変遷を考慮した生物圏評価モデル構築にあたっては、まず、長期変動現象に伴い地形、気温、水収支等がどのように変化するかについて、地質環境の長期安定性研究の成果等を用いて記述するとともに、その変化が生物圏での核種移行にどのような影響を与えるかについて、モデルを用いた例示的な解析を実施して、影響の程度を把握することとする。これを踏まえて、適切な生物圏の状態とその変遷を設定する上で考慮すべき現象と留意すべき点を抽出するとともに、長期変動事象を連続的に取り扱うことで、人間が受ける線量に与える影響の上下限を把握するために、どのような現象を押さえておく必要があるかについて検討する。このことにより、離散的な取り扱いを選択した場合においても、連続的な現象の変動に基づく影響の上下限の把握により、考慮すべき変遷の状態のスナップショットを適切に選択することが可能となる。

なお、長期変動事象の想定に関しては、気候変動や地形変化に係る研究成果等を利用し、連続的な事象の変化に伴う表層環境の変遷の記述方法について検討する。

以上のことから、本研究での到達目標を以下のように設定する。

- ・ 連続的な環境の変化（地形や気温、水収支の変化）を考慮した表層環境の変遷を記述する際の留意点の整理（GBIや移行経路に影響を与える因子の抽出およびその影響評価を含む）
- ・ 表層環境の連続的な変遷の検討結果に基づく、生物圏の状態設定手法の提示（線量への影響の上下限を押さえるために、生物圏における地形や気温、水収支等のうち、どのような現象の変化が重要で、評価において考慮すべきであるか）
- ・ 時間的変遷を考慮した生物圏評価における様式化の考え方の提示（表層環境や人間の生活様式の変遷をどのようにモデルの設定に反映するか）

さらにこれらの検討を受けて、将来の地質環境の変遷に伴う、表層環境の状態変化の記述方法や将来の人間の生活様式や活動（行為）に関する様式化の考え方を具体的に提示する。例えば、将来にわたって人間の食習慣が変化するかどうかに関しては、代表的な植物の栽培北限（南限）等を参照することにより、気候等の変動に伴って、現在の人間が常食している農作物が、対象とする場所において採取可能であるかどうか（自給自足の仮定が可能か、それとも市場希釈を考慮する必要があるか）を判断するための材料を得ることができると考える。また、現在の気候状態における対象地域の表層環境条件（地形や植生、土地利用状況等）を記述するとともに、モダンアナログの考え方をを用いて、現存する国内外の参照地域における表層環境の状態を記述することによって、将来的な変遷を考慮した表層環境の状態を設定することができ、これに基づき、人間の活動の様式を記述することが可能となると考える。

上記の考え方を踏まえたうえで、時間的変遷を考慮した定量的な生物圏評価の実施に向けて、モダン

アナログの考え方に基づく、将来の生物圏状態を想定した場合のモデル構築手法を検討する。

3.3 年度展開

平成 22 年度から平成 26 年度までの各研究課題の年度展開を表 3.3-1 に示す。

表 3.3-1 生物圏評価研究における各課題の年度展開

年度 研究課題	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度
① 表層環境における水理・物質移行の 3 次元解析結果や文献情報等に基づく生物圏評価モデル構築の試行による、モデル構築フローの整備	実際の環境条件を反映したモデル構築の試行による、モデル構築のための手順書の作成（モデル構築フローの解説書としての位置付け）	モデル構築の試行と手順書作成の継続	時間的変遷を考慮したモデル構築を視野に入れたフローの改訂と試行（必要に応じて）	③に統合	③に統合
② 我が国の環境条件を反映した生物圏評価パラメータの設定に向けたデータベースの整備	データベース記載項目の確定と入力情報の収集	データベース入力情報収集の継続 データベースの情報を用いたパラメータ設定の留意点等整理	データベースの情報に基づくジェネリックなパラメータセットの見直し	③に統合	③に統合
③ 長期的な変遷を考慮した生物圏評価の考え方の整理とモデル構築	生物圏評価の課題抽出（特に、時間的変遷を考慮した生物圏評価の考え方の整理）	時間的変遷を考慮した生物圏評価シナリオの記述	時間的変遷を考慮した生物圏評価概念モデルの構築（①のモデル構築フローを用いた試行として）	時間的変遷を考慮した生物圏評価の試行（H24 の検討に基づく、数学モデル・パラメータの設定を含む）	継続

4. おわりに

放射性廃棄物地層処分の生物圏評価研究を対象として、国内外におけるこれまでの研究から得られた知見（国際プロジェクト等において検討された方法論を含む）に基づき、今後の生物圏評価研究の進め方を示した。また、当面 5 カ年を目途に原子力機構において実施すべき下記の 3 つの研究課題を特定した。

- ① 表層環境における水理・物質移行の 3 次元解析結果や文献情報等に基づく生物圏評価モデル構築の試行による、モデル構築フローの整備
- ② 我が国の環境条件を反映した生物圏評価パラメータの設定に向けたデータベースの整備
- ③ 長期的な変遷を考慮した生物圏評価の考え方の整理とモデル構築

なお、本報告書に示した課題の中には、表層環境での水理・物質移行の現象理解に関わるものや、我が国の生物圏評価に適用可能なデータベースの整備、長期の地質環境の変遷を考慮した生物圏評価モデルの構築等、地下水流動解析や環境放射能、長期安定性研究の成果を適切に反映する必要があるものを含んでいる。これらについては、原子力機構内外における各分野の専門家等との連携により、検討を進める予定である。

参考文献

- 1)IAEA (1999): “Critical Groups and Biospheres in the Context of Radioactive Waste. Disposal, Fourth report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal”, IAEA-TECDOC-1077.
- 2)IAEA (2003): "Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal, Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSESSment (BIOMASS) Programme, Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS), IAEA-BIOMASS-6, 2003.
- 3)OECD/NEA (1991): “Review of safety assessment methods, A report of the performance assessment advisory group of the radioactive waste management committee.”
- 4)原子力安全委員会 原子力バックエンド対策専門部会 (1997) : “高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について” .
- 5)核燃料サイクル開発機構 (1999) : “我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”, JNC TN1400 99-020.
- 6)原子力安全委員会 (2010a) : “余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方”, 平成22年4月1日.
- 7)原子力発電環境整備機構 (2004) : “高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性-「処分場の概要」の説明資料-”, NUMO-TR-04-01.
- 8)原子力安全委員会 放射性廃棄物安全規制専門部会 (2000) : “高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について” .
- 9)総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 (2003) : “高レベル放射性廃棄物の安全規制に係る基盤確保に向けて” .
- 10)BIOPROTA (2005): “Modelling Processes at the Geosphere Biosphere Interface Zone”, A report prepared within the international collaborative project BIOPROTA: Key Issues in Biosphere Aspects of Assessment of the Long-term Impact of Contaminant Releases Associated with Radioactive Waste Management.
- 11)電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構 (2005) : TRU 廃棄物処分技術検討書, 第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02.
- 12)核燃料サイクル開発機構 (2005) : “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—, 分冊3 安全評価手法の開発”, JNC TN1400 2005-016.
- 13)鈴木祐二, 加藤智子, 牧野仁史, 大井貴夫 (2006) : “TRU 廃棄物処分に特有な放射性核種を考慮した生物圏評価データセットの整備と線量への換算係数の算出”, JAEA-Data/Code 2006-011.
- 14)稲垣学, 加藤智子, 吉田英爾, 小山田潔, 深谷友紀子, 鈴木祐二, 大井貴夫 (2007) : “表層での水理・物質移行を考慮した生物圏における評価に関する検討”, JAEA-Research 2007-029.
- 15)板津透, 稲垣学, 加藤智子, 鈴木祐二, 小山田潔, 江橋健, 川村淳, 蛭名貴憲, 宮原要 (2009a) : “表

層環境を考慮した生物圏評価手法の検討”， JAEA-Review 2009-015.

- 16)加藤智子, 鈴木祐二 (2008): “地層処分生物圏評価における感度解析による重要パラメータの抽出に関する検討”, JAEA-Research 2008-021.
- 17)Kato, T. and Suzuki, Y. (2007): “Extended Biosphere Dataset for Safety Assessment of Radioactive Waste Geological Disposal”, Proceedings on the International Symposium on Environmental Modeling and Radioecology, Rokkasho, Aomori, Japan, October 18-20, 2006, ISBN 978-4-9980604-9-9 C3040, pp.336-339.
- 18)Kato, T., Suzuki, Y. and Ohi, T. (2009): “Development of the Methodology on Priority of Element-specific Biosphere Parameters for Geological Disposal Applicable to Any Proposed Repository Site.” Jpn. J. Health Phys., 44(1), pp.72-79.
- 19)資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構 (2006a): “高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画” .
- 20)資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構 (2009a): “高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画 (平成 20 年度版)” .
- 21)加藤智子, 鈴木祐二, 田上恵子, 石川奈緒, 内田滋夫, 稲垣学, 宮原要 (2009): “地層処分生物圏評価用データベース更新の進め方について”, 日本原子力学会 2009 年春の年会予稿集 D21.
- 22)板津透, 加藤智子, 稲垣学, 鈴木祐二 (2009b): “表層環境を考慮した生物圏評価手法の検討”, 日本原子力学会第 24 回バックエンド夏期セミナー資料集.
- 23)日本原子力研究開発機構 (2010): “平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術調査 地質環境総合調査技術高度化開発 報告書”, 平成 22 年 3 月.
- 24)原子力安全委員会 (2010b): “第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方”, 平成 22 年 8 月 5 日.
- 25)清水智史, 中居邦浩, 河田陽介 (2010): “低レベル放射性廃棄物埋設施設の安全評価における生活環境の状態設定に関する一考察”, 日本原子力学会第 25 回バックエンド夏期セミナー資料集.
- 26)SKB (2006a): “Long-term Safety for KBS-3 Repositories at Forsmark and Laxemar - a first evaluation”. Main report of the SR-Can project, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB TR-06-09.
- 27)SKB (2006b): “The Biosphere at Forsmark, Data, Assumptions and Models Used in the SR-Can assessment”, SKB R-06-82.
- 28)SKB (2006c): “The Biosphere at Laxemar, Data, Assumptions and Models Used in the SR-Can assessment”, SKB R-06-83.
- 29)Gustafsson, L., Sassner, M. and Bosson, E. (2008): “Numerical modelling of solute transport at Forsmark with MIKE SHE”, SKB R-08-106.
- 30)Hjerpe, T., Ikonen, A.T.K. and Broed, R. (2010): “Biosphere Assessment Report”, POSIVA 2010-03.
- 31)Karlsson, S. and Bergström, U. (2002): “Element Specific Parameter Values Used in the Biospheric Models of the Safety Assessments SR97 and SAFE”, SKB R-02-28, Svensk

Kärnbränslehantering AB.

- 32)Avila, R. (2006): “Model of the Long-term Transfer of Radionuclides in Forests”, SKB TR-06-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 33)ICRP (1985) : “Principles of Monitoring for the Radiation Protection of the Population”, ICRP Publication 43, Pergamon Press.
- 34)日本アイソトープ協会 (1986) : “公衆の放射線防護のためのモニタリングの諸原則”, ICRP Publication 43, 丸善.
- 35)ICRP (1998): “Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste”, ICRP Publication 81, Pergamon Press.
- 36)日本アイソトープ協会 (2000) : “長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告”, ICRP Publication 81, 丸善.
- 37)ICRP (2007): “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, ICRP Publication 103, Pergamon Press.
- 38)IAEA(2006): “Geological Disposal of Radioactive Waste”, IAEA Safety Requirements, No. WS-R-4.
- 39)IAEA (1994): “Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories, First Report of the INWAC Subgroup on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal”, IAEA-TECDOC-767.
- 40)Sheppard, S. and Thorne, M. C. (2005): “Key Issues in Biosphere Aspects of Assessment of the Long-term Impact of Contaminant Releases Associated with Radioactive Waste Management, THEME 2: Task 3: Model Review and Comparison for C-14 Dose Assessment”.
- 41)資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構 (2006b) : “TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画” .
- 42)資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構 (2009b) : “TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画 (平成 20 年度版)” .
- 43)日本原燃株式会社 (1989) : “再処理事業所 再処理事業指定申請書”, 平成元年 3 月, 平成 14 年 2 月補正.
- 44)日本エヌ・ユー・エス株式会社 (1990) : “六ヶ所村の社会環境調査結果報告書” (1990 年 12 月) .
- 45)原子力安全基盤機構 (2006) : “最近の社会・環境データを用いた平常時被ばく線量評価に関する報告書”, 平成 18 年 7 月, JNES/SAE06-052, 06 解部報-0052.
- 46)原子力安全委員会 (1985) : “再処理施設安全審査指針”, 昭和 61 年 2 月 20 日.
- 47)草野友宏, 浅森浩一, 黒澤英樹, 谷川晋一, 二ノ宮淳, 根木健之, 花室孝広, 安江健一, 山田国見, 石丸恒存, 梅田浩司 (2010) : “地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書 (平成 20 年度)”, JAEA-Research 2009-072.
- 48)文部科学省, 経済産業省 (2010) : “独立行政法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標 (中期目標), 平成 22 年 4 月 1 日” .
- 49)日本原子力研究開発機構 (2010b) : “独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するた

めの計画（中期計画）、認可：平成 22 年 3 月 31 日”。

- 50)Anderson, M. P. and Woessner, W. W. (1994)：“地下水モデル 実践的シミュレーションの基礎”，共立出版株式会社。
- 51)中川啓（2009）：“地下水のトレーサー試験 8.3 節 トレーサー試験結果を利用した不均質場の評価方法”，技報堂出版。
- 52)海洋出版株式会社（2001）：“海底地下水湧出”，月刊地球 No.270。
- 53)日本地球化学会（2005）：“特集「沿岸海底湧水の地球科学」”，地球化学，Vol.39, No.3。
- 54)IAEA (2010): “Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments”, IAEA Technical Reports Series No.472.
- 55)IAEA (2009): “Quantification of Radionuclide Transfer in terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments Details”, IAEA TECDOC Series No. 1616.
- 56)河内進，大井貴夫，川村淳，石原義尚，蛭名貴憲（2008）：“品質管理およびプロジェクト管理機能を考慮した JGIS の機能高度化”，JAEA-Data/Code 2008-006。
- 57)大澤英昭，梅木博之，牧野仁史，高瀬博康，イアン・マッキンレー，大久保博生（2008）：“地層処分技術に関する知識マネジメントシステムの設計概念”，火力原子力発電，Vol.59, No.6, pp.26-33。
- 58)ICRP (1990): 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, Vol.21, No.1-3, Pergamon Press, Oxford.
- 59)科学技術庁（2000）：“ICRP1990 年勧告の取り入れ等による放射線障害防止法関連法令の改訂（平成 12 年 10 月 23 日公布）”。
- 60)Macdonald, C. R. and Laverock, M. (1996): “External ICRP 60 Dose Conversion Factors for Air and Water Immersion, Groundshine and Soil”, TR-739, COG-96-106.
- 61)川村淳，牧野仁史，笹尾英嗣，新里忠史，安江健一，浅森浩一，梅田浩司，石丸恒存，大澤英昭，江橋健，小尾繁，柴田雅博，稲垣学（2010）：“高レベル放射性廃棄物地層処分に係わる天然現象影響に関する研究”，JAEA-Research 2010-027。

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

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

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

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

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

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

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

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

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

