

第2章 英国における性能評価に関する調査

2.1 はじめに

英国における地層処分の計画及び実施の責任は、原子力廃止措置機関（NDA）が担っている。NDAは、安全かつ持続可能で、公衆が受け入れ可能な地層処分プログラムを実施する実効性のある実施主体を設置する目的で、NDA内に放射性廃棄物管理局（RWMD）を設置した。

英国では、2008年に英国政府が地層処分場のサイト選定方法などを提示した白書「放射性廃棄物の安全な管理－地層処分の実施の枠組み」（Cm.7386）を公表した。同白書では、地層処分場のサイト選定プロセスにおける段階を設定したものであり、机上調査の対象となるサイトを複数選定した上で、候補地での（ボーリング調査を含む）地表からの調査を実施し、最終的に1か所の優先的な場所を特定することになっている。

RWMDは地層処分場が確定し、操業を開始する前（2040年操業予定）に許可申請とともに、「処分システムセーフティケース」（DSSC）という、地層処分の安全性に関連する事項を説明した一連の文書を提出する必要がある。現在、RWMDはDSSCの開発を進めている所である。

処分システムセーフティケース（DSSC）は、①輸送セーフティケース（放射性廃棄物の輸送の安全性）、②操業セーフティケース（地層処分場の建設・操業の安全性）及び③環境セーフティケース（地層処分場の閉鎖後における長期安全性）の3つのセーフティケースから構成されている。また、これらのセーフティケースは、複数の安全評価報告書、様々な分野の研究報告書及びその他のサポート文書が基礎となっている（図2-1参照）。

2010年にRWMDが『一般的な条件での処分システムセーフティケース』（gDSSC）を公表した。現在、英国では処分サイトが決まっていないため、英国内に存在するような広範な地質環境及び処分場の設計を考慮した、サイトを特定しない、一般的な条件を用いて評価等を実施したものである。gDSSCは、図2-1の文書構造に沿ったレポート群である。

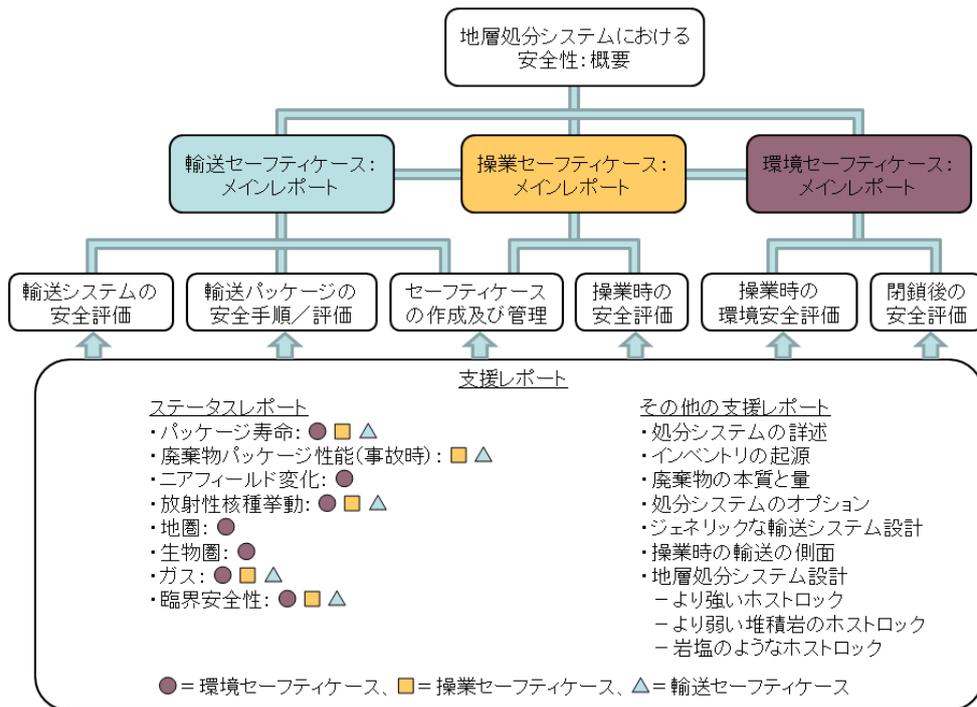


図 2-1 英国における DSSC (処分システムセーフティケース) の文書構造

2.2 目的

第 2 章では、図 2-1 の中から、英国における一般的な条件での閉鎖後安全評価 (PCSA) に関して、取りまとめを行った。一般的な条件での閉鎖後安全評価は、地層処分施設 (GDF) の閉鎖後の安全性に関する一般的な条件での放射線学的評価を取り扱ったものである。現在の一般的な条件の段階では、候補地の地質学的状況及び水理地質学的な状況に関する情報やそこに建設される可能性のある施設の設計は存在しない。従って、この種の情報が無いことから、全面的な性能評価を実施することに大きな意味はなく、現時点で本報告書を作成する主な目的は、いくつかの例を挙げることで、将来候補地として挙げられる場所に関する閉鎖後安全評価を実施する方法について、具体的な説明を行うことである。

また、今回の一般的な条件での閉鎖後安全評価は、英国のサイト選定プロセスの机上調査を行うための基礎をもたらすと同時に、将来のサイト調査プロセスに関するいくつかの鍵となる問題について、情報提供するものである。サイト選定プロセスが進展するにつれて、閉鎖後安全評価が反復的に開発されていくことが、RWMD の意図である。サイト選定プロセスの各段階において、閉鎖後安全評価から得られた知識が、RWMD の研究面でのニーズに関する情報提供、さらには、ある特定のサイトにおける GDF の最適化を支援するオプションの研究に関する情報提供に使用されることになる。

2.3 背景情報

2.3 節では、英国における地層処分に関する背景情報の一部を示す。2.3.1 では、地層処分対象として処分される放射性廃棄物について記述する。2.3.2 では、地層処分全般に使用される多重バリア概念について検討する。2.3.3 では、様々なタイプの物質の地層処分概念について具体例を挙げて記述する。2.3.4 では、廃棄物のパッケージ方法について取り扱う。

2.3.1 廃棄物

英国では、2008 年の英国政府の白書 (Cm7386) において、将来、地層処分の対象となる廃棄物のインベントリが見積もられている (表 2-1 参照)。この見積もられたインベントリは、「基準インベントリ」¹とされており、2007 年「英国放射性廃棄物インベントリ」(UKRWI) に基づき作成されたものである。この基準インベントリの中には、高レベル放射性廃棄物等の他、現時点では廃棄物に分類されていない、使用済燃料 (SF)、分離プルトニウム及びウランも含まれている。政府の政策では、基準インベントリに含まれる放射性物質を廃棄物とみなすべきかどうかの決定が下されるまで、RWMD は GDF の設計及び開発において、これらの物質が地層処分対象となる可能性を想定しておくことになっている。以下に、基準インベントリの構成を記載する。

- ・ **低レベル放射性廃棄物 (LLW)** : LLW は、建屋のがれき、土壌及び鋼鉄製の品目などにより構成される。その例として、原子炉及びその他の原子力施設の廃止及び解体、さらには原子力サイトのクリーンアップに伴って生じる骨組み、配管類及び補強材などが挙げられる。しかし現在のところ大部分の LLW は原子力施設の操業に伴って生じるものであり、主として紙、プラスチック及び金属スクラップなどで構成される。英国で発生する LLW のうち、GDF に引き渡されるのはごくわずかである。
- ・ **中レベル放射性廃棄物 (ILW)** : ILW は、広範囲にわたる物理的及び化学的な形態で存在している。この中には、金属、黒鉛、コンクリート及びその他のがれき、スラッジ、綿くず、そして油類などの様々な有機物質などが含まれる。その主要なものは金属製の品目であり、その例として、原子燃料のケーシング、原子炉構成要素、炉心から出される黒鉛、放射性液体流出物の処理に伴って生じるスラッジなどが挙げられる。
- ・ **高レベル放射性廃棄物 (HLW)** : HLW は当初、使用済燃料 (SF) の再処理の主要段階から核分裂生成物を含む濃硝酸溶液の形で発生する。HLW は現在「セラフィールド廃棄物ガラス固化プラント」(WVP) において、ステンレス製キャニスタ内のホウケイ酸

¹ この点に関して、現在のところ基準インベントリが 2007 年の UKRWI に基づいていること、したがって現状では、サイト近傍に建設される浅地中施設での貯蔵に基づくスコットランド政府の政策 (2007 年 6 月 25 日に発表されたもの) のもとで管理されることが予想される廃棄物も含まれている点には、注意するべきであろう。

ガラスに組み込まれている（ガラス固化）。2015年までには、今後発生が予想されている HLW の大部分がこの方法によって処理されているものと考えられる。HLW は短寿命核分裂生成物の崩壊が進むまで相当量の熱を発生させる。ガラス固化された HLW は少なくとも 50 年の間にわって一時貯蔵されることになっている。その目的は、この期間に放射性核種のかなりの部分で顕著な放射性崩壊が進むことにより、廃棄物を処分に適した状態にすることである。また移行及び処分に適した廃棄物パッケージをつくり出すために、この種の廃棄物に使用するキャニスタには追加的なパッケージが施される見込みである。

英国政府は、これらの廃棄物に加えて、将来のいずれかの時点で廃棄物と見なされることにより、処分対象となる基準インベントリに組み込まれる可能性のあるその他の放射性物質を指定している。これらの物質を次に示す。

- ・ **使用済核燃料 (SF)**：英国の既存の民生用原子炉で生じる使用済燃料の大部分は、プルトニウムとウランを分離するために再処理される。こうして分離プルトニウム及びウランは新しい燃料を作るために使用することができ、この場合には GDF に引き渡されることはない。しかし英国の改良型ガス冷却炉 (AGR) から取り出される使用済燃料の一部、そしてサイズウェル-B 加圧水型原子炉 (PWR) から取り出される全ての使用済燃料は再処理されない可能性があり、その場合には廃棄物として管理することになる。新たに原子力発電所新設プログラムが実行された場合には、さらに多くの使用済燃料が発生することになる。
- ・ **プルトニウム (Pu)**：英国における分離プルトニウムの在庫は、現在のところ廃棄物として宣言されておらず、備蓄されている。これは、この種のプルトニウムに将来何らかの用途が割り当てられる可能性が認められているためである。その例として、一部の原子炉燃料の製造における使用が挙げられる。しかしプルトニウムが GDF で処分されることになれば、まず適切かつ安定性の高い廃棄物固化体にする必要が生じる。今回の「一般的な条件での DSSC」の目的において RWMD は、分離プルトニウムが、HLW や使用済燃料 (SF) に関する処分概念と同じ概念のもとで処分できるような廃棄物固化体に変換されると仮定している。
- ・ **ウラン (U)**：在庫として維持されるウランは、燃料の製造を目的としたウラン鉱石の製錬及び使用済燃料の再処理の結果として生じるものである。これらの在庫の一部には、原子炉燃料の製造に適した濃縮ウランも含まれている。しかし量として見た場合、大部分のインベントリは燃料生産時の残滓である「劣化ウラン、天然ウラン及び低濃縮ウラン」(DNLEU²) (すなわち「テール」) によって構成される。一般的な条件での DSSC の目的において RWMD は、この DNLEU が LLW や ILW に関するものと同じ処分概念のもとで処分可能な安定性の高い廃棄物固化体に変換されるものと、さらには比較的量の少ない高濃縮ウラン (HEU) が、HLW/SF 処分概念と同じ概念のもとで処分可能な廃棄物固化体にされるものと仮定した。

² 「劣化、天然及び低濃縮ウラン」(DNLEU) という表現は、分離されたウランの英国における在庫物質を表すものとして用いられる。また「劣化ウラン」(DU) という用語もしばしば、英国で蓄積された分離ウランの在庫物質を示すために用いられる。

表 2-1 英国政府の白書 (Cm7386) の基準インベントリ

廃棄物名	注	梱包済み容量		放射能量 (2040年4月1日時点)	
		立方メートル	%	テラベクレル	%
高レベル放射性廃棄物	1,2,3,5	1,400	0.3%	36,000,000	41.3%
中レベル放射性廃棄物	1,2,5	364,000	76.3%	2,200,000	2.5%
(地層処分対象となる) 低レベル放射性廃棄物	1,2,5	17,000	3.6%	<100	0.0%
使用済燃料	1,4,5	11,200	2.3%	45,000,000	51.6%
プルトニウム	1,4,5	3,300	0.7%	4,000,000	4.6%
ウラン	1,4,5	80,000	16.8%	3,000	0.0%
合計		476,900	100	87,200,000	100

注

1. 放射性物質と廃棄物の量は 2007 年版英国放射性廃棄物インベントリの量と一致する。
2. 既存の、国の低レベル放射性廃棄物処分場での処分に適さない HLW、ILW、LLW の推定梱包量は、将来変更される可能性のある 2007 年版 UKRWI から引用した。
3. HLW の梱包済み容量は、現在、固化した HLW が貯蔵されている容器を処分するための施設が実施された時点で増加する可能性がある。
4. プルトニウム、ウラン、使用済燃料の推定梱包量は 2005 年版の CoRWM ベースライン・インベントリから引用した。但し、これらの量は将来変更される可能性がある点に注意せよ。

表 2-1 の数字は推定値に過ぎず、その裏付けとなる様々な仮定が今後変化する可能性がある」と強調されている。設計及び評価を行うためには、個別の廃棄物パッケージの特徴に関するより詳細な情報が必要である。このため、RWMD は「基準インベントリ」(Baseline Inventory) とは別に「派生インベントリ」(Derived Inventory) を作成している。この派生インベントリは、基準インベントリに基づくものであるが、様々な情報は基本的にパッケージごとに示しており、必要に応じて、放射性崩壊の影響が考慮に入れられている。

地層処分を実施する必要がある最終的なインベントリに関しては、依然として重要な不確実性の発生源が存在しており、RWMD のプログラムにおいて、検討されている。この不確実性の中には、現行の基準インベントリで特定している廃棄物及び物質の体積並びに、放射性廃棄物の含有量に関する不確実性に加えて、これらの廃棄物及び物質を発生させる原子力プラントの将来の操業シナリオに関する不確実性も含まれている。なお、国防省 (MoD) が所有している使用済燃料、プルトニウム及びウランについては、現状の基準インベントリに含まれていないが、追加する可能性を含め、新たなプログラムを構築する可能性について検討されている。

また、将来処分が必要となる可能性のある量を示唆するために、「上限インベントリ」(Upper Inventory) が作成されている。上限インベントリは、現時点ではまだ発生してい

ない廃棄物や物質の見積もりに関する量及び組成、あるいは既存施設における将来の操業に関連する量及び組成に伴う不確実性を許容できるものとなっている。

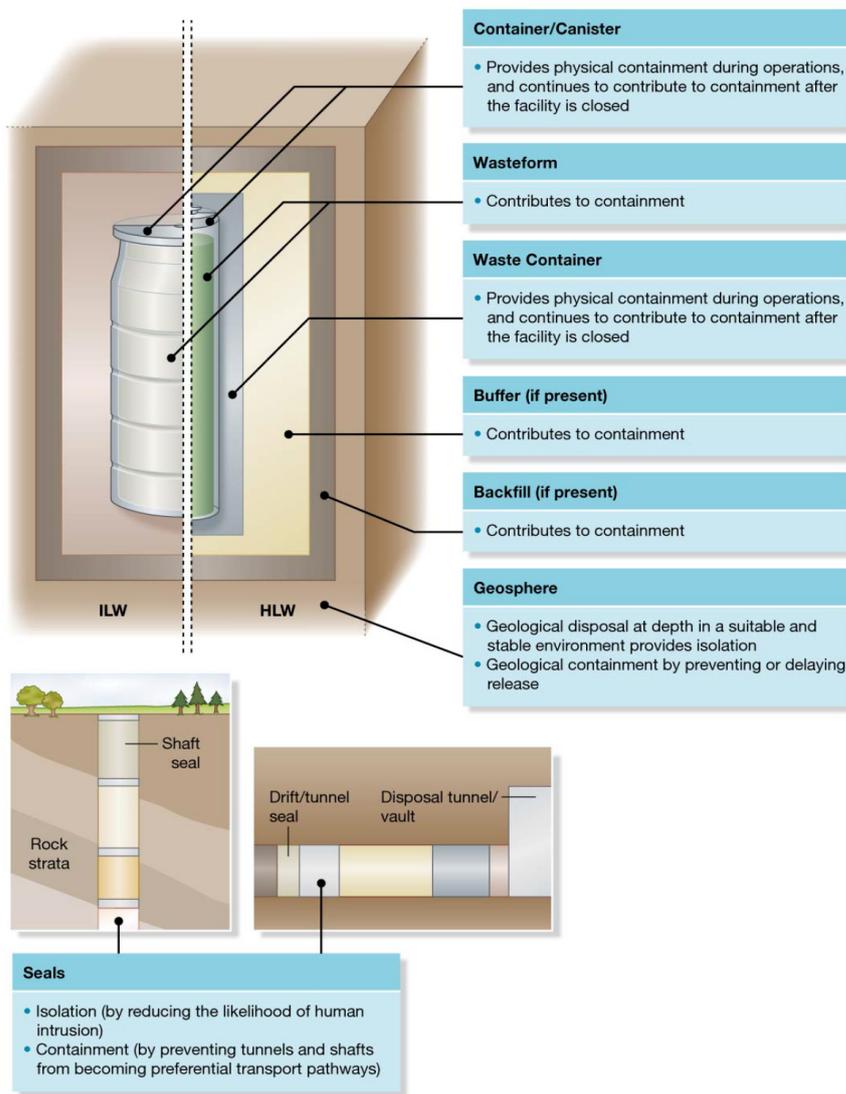
2.3.2 多重バリアシステム

放射性廃棄物の地層処分に関しては、「接近可能環境から廃棄物を隔離すること」と「廃棄物に含まれる放射性核種を閉じ込めること」という 2 つの高次元の安全目標が設計されている。この隔離及び閉じ込めという目標を長期間に渡り確保するために、地層処分施設は一つの多重バリアシステムとして設計される。これらのバリアは全体として、地圏によってもたらされる天然バリアとの組み合わせにおいて、放射性核種が生物及び環境に被害をもたらす可能性のある量で地表環境に放出されることを防ぐ役割を果たす。

上述したように、処分における多重バリア概念は、安全性を確保するため、「廃棄物の隔離」及び「廃棄物に含まれる放射性核種の閉じ込め」の実現を目指すものである。

- ・ **RWMD** が使用する「隔離」という用語は、人間及び地表環境から廃棄物を排除することを意味する。適切な環境にある地下深部で実施される地層処分は、意図的なものではない、あるいは、許可されていない人間の侵入が発生する見込みを低減することにより、この隔離をもたらす。適切な深度にあり、長期間にわたって安定している地質環境での処分は、気候及びその他の自然環境における様々な事象の影響から処分施設の隔離を実現するだけでなく、廃棄物からの直接的な放射線に対する遮へいを自然環境にもたらす。
- ・ **RWMD** が使用する「閉じ込め」という用語は、安全概念によって必要とされる期間にわたり、多重バリアシステムの様々な部分の内部に放射性核種を保持することを意味する。放射性核種の減衰によって、当該システムに存在する放射性核種は次第に低減することになる。処分概念は、多くの放射性核種にとって、放射性核種及びその娘核種が人工バリアシステム内で取るに足らない放射能レベルにまで減衰する時点までの閉じ込めをもたらすことができる。しかし、処分施設における人工バリアは、時間の経過とともに、次第に劣化し、徐々にその閉じ込め性能を失っていくことになる。それ以降の閉じ込めは、地層バリアによってもたらされる。地層バリアは、人工バリアシステムからの少量の長寿命放射性核種が放出した場合であっても、その移動を遅らせる役割を担う。また、適切な深度の安定した環境に、地層処分施設を配置することで、人工バリアが保護されると同時に、人工バリアがより長期間にわたりその閉じ込め性能を維持できるようにする上で役立つことになる。

図 2-2 に、多重バリアシステムの概略図を示した。主要バリアとは、以下のものを指す。



0857_02_A104

図 2-2 多重バリアシステムの概略図

- ・ 廃棄物形態：廃棄物がその処分にとって、適切なものとなるよう調整することによって実現される形態である。
- ・ 廃棄物容器：調整された廃棄物は、一つの容器に収納される（この容器は「キャニスタ」と呼ばれる）。これにより「廃棄物パッケージ」と呼ばれるものが構成される。
- ・ 緩衝材または埋め戻し材：ここで用いる「緩衝材」または「埋め戻し材」とは、処分施設で定置された廃棄物容器の周囲に設置される物質のことをいう。これに加えて、その他のタイプの「塊状埋め戻し材」が、掘削されたアクセス坑道、立坑または坑道にシーリング・システムを用いて充填するために必要とされる。
- ・ 地圏：ここで用いる「地圏」とは、地層処分施設が建設場所となるだけでなく、接近可能環境へと戻る放射能の移動に対する重要なバリアの一つとなる地質環境の事をいう。この地圏は、隔離をもたらすだけでなく、地球表面において（氷河作用の例に見られるような自然の原因、あるいは人間の行為の結果として）起こり得る極端な変化から定置後の廃物を保護することになる。

多重バリア地層処分システムの様々な構成要素は、様々な異なるタイムスケールにわたり、異なったやり方で閉じ込め及び隔離といった高次元の安全目標の達成に寄与する。RWMD は、環境セーフティケースに関する規制ガイダンス、さらにはその他の国レベルのプログラムにおける実践に適合する形で、多重バリアシステムのそれぞれの構成要素の安全機能を定義する。これにより、安全を確保するためには、どのようなバリア構成要素を実現すべきであるかが示される。その他の「バリア」（すなわち、「パッケージの経時変化」、「ニアフィールドの経時変化」及び「地圏」）に関する状況報告書では、特定の安全機能の性質、さらには安全性を実現する上でこれらの機能が果たし得る役割について、具体的な地層処分概念の事例を挙げて、さらに詳細に検討されている。

2.3.3 地層処分概念の事例

現段階のプログラムで RWMD は、適切である可能性がある広範な処分概念についての検討を進めている。その目的は、地層処分の実施プログラムのいくつかの適切な決定ポイントにおいて、十分な情報に基づくオプション評価を実施できるようにすることにある。RWMD は、この作業に基づき、3 件の一般的な地質条件に対応する概念の具体例を示した。この中には、地層処分施設より上に位置する可能性のあるいくつかの岩石層に関連したバリエーションが含まれる。RWMD は、これらの具体例となる概念を次に挙げる目的に使用している。

- ・ 処分システムの機能及び技術面での要件に関する RWMD の理解を深めること。
- ・ 設計要件に関する RWMD の理解をさらに深めること。
- ・ GDF の安全性、環境、社会及び経済面での影響の程度を明らかにする作業やその評価を支援すること。
- ・ RWMD の研究・開発プログラムの開発と、その優先順位の設定を支援すること。
- ・ 地層処分に要する可能性のあるコストに関する RWMD の分析を支援すること。及び
- ・ 廃棄物所有者が提案する廃棄物パッケージ処分可能性評価を支援すること。

RWMD は、上記の目的のためだけに、具体例となる概念を提示した。すなわち、RWMD は必ずしもこれらの具体例となる概念のいずれかが、関連する地質条件において、RWMD が使用する概念となることを意図していない。現段階では、いかなる地層処分概念も除外されてはいない。

表 2-2 に、ここで具体例として挙げた概念を列記した。この表に添えた注記は、これらの具体例の選定の鍵となった根拠を示している。RWMD が現段階で行っている安全評価調査では、2008 年の英国政府の白書（Cm7386）の内容に従い、GDF が幾つかの設備を同一サイトに集めた「併設施設」となる可能性も想定されている。

このことは、表 2-2 に ILW/LLW 及び HLW/SF に関する具体例として示した処分概念が、単一のサイトに併設される可能性があることを意味している。これは、現段階における評価目的にとって合理的かつ保守的なアプローチと見なされている。

表 2-2 各廃棄物のタイプに応じて例示した地層処分概念の例

母岩	例示のために挙げられた地層処分概念 ^d	
	ILW/LLW	HLW/SF
比較的高強度の岩石 ^a	英国の ILW/LLW 概念 (英国、NDA)	KBS-3V 概念 (スウェーデン、SKB 社)
比較的低強度の堆積岩 ^b	オパリナスクレイ処分概念 (スイス、Nagra)	オパリナスクレイ処分概念 (スイス、Nagra)
蒸発残留岩 ^c	WIPP 層状岩塩処分概念 (米国、DOE)	ゴアレーベン岩塩ドーム処分概念 (ドイツ、DBE テクノロジー社)

- a) 比較的高強度の岩石：英国のILW/LLW処分概念とスウェーデンの使用済燃料を対象としたKBS-3V処分概念が選択した理由は、これらの概念の場合、英国の背景情報との関連で入手される情報が豊富なことにある。
- b) 比較的低強度の堆積岩：長寿命ILW、HLW及び使用済燃料を対象とするオパリナスクレイ処分概念が選択された理由は、最近行われたOECD原子力機関のレビューにおいて、Nagra（スイス）の処分概念評価作業が、利用可能な知識のレベルに関して最先端のものと見なされていることにある。しかしフランスのANDRAがカロビアン=オックスフォーディアン粘土層における計画のために開発している一つの処分概念に関しても同様に広範な情報が利用可能であることにも留意すべきであろう。この概念に対しては、国際的なピアレビューによって強力な支持が表明されている。RWMDは今回の具体的な説明の基礎としてオパリナスクレイ処分概念の例を使用することにしたが、Andraのプログラムから得られる情報も活用する予定である。さらにRWMDは、ベルギーのスーパーコンテナ概念（ブルクレイ層におけるHLW及び使用済燃料の処分にに基づくもの）から得られる情報も活用してゆく予定である。
- c) 蒸発残留岩：米国ニューメキシコ州の層状岩塩母岩を利用した超ウラン廃棄物（TRU）（長寿命ILW）の処分概念に基づく廃棄物隔離パイロット・プラント（WIPP）が選択された理由は、この米国環境保護庁（EPA）が認定した、そして現時点で既に操業中である施設からきわめて豊富な情報が入手可能なことにある。またドイツのDBE-テクノロジー社が開発した岩塩ドーム母岩におけるHLW及び使用済燃料の処分概念が採用された理由も、この概念に関して利用可能な情報量が大きいことにある。
- d) 計画設定の目的において、劣化ウラン、天然ウラン及び低濃縮ウランに関する例示のために挙げられた処分概念は、ILW/LLWに関するものと同一であると仮定されている。またプルトニウム及び高濃縮ウランに関するものは、HLW/SFに関するものと同一と仮定されている。

ここで一般的な地質条件を使用しているからといって、いずれかの固有のサイトが検討されているわけではない。母岩に関する記述は、3種類の一般的な岩型に対応している。これらの岩型は英国内に存在し、英国及び国際的に実施された調査に基づき、高レベル放射性廃棄物等（HAW）向けの処分施設の受け入れに関して適格なものである可能性があるかと判断されたものである。これらの岩型は、次のように記述される。

- ・ 高強度岩—この種の岩石は一般に、結晶質火成岩、変成岩、あるいは地質学的に見て比較的古い堆積岩によって構成される。この種の岩石の場合、何らかの流体移動が生じたとしても、それは主として岩石の境界部分（しばしば「不連続」と呼ばれる）を通じて起こる。このカテゴリーに該当する岩石の良い例として、花崗岩が挙げられる。
- ・ 低強度堆積岩—この種の岩石は一般に、地質学的に比較的若い堆積岩で、流体移動が起こった場合でも主として岩盤自体を通じて起こるものによって構成される。このカテゴリーに含まれる岩石の良い例として、様々なタイプの粘土岩が挙げられる。
- ・ 蒸発岩—この種の岩石の典型的なものとして、「硬石膏」（無水硫酸カルシウム）、「ハーフライト」（岩塩）またはその他の溶存塩を含む水塊の水が蒸発した結果として生じる「蒸発岩」が挙げられる。

これらの具体例として挙げた地層処分概念については、『GDF 設計報告書』で記述されている。図 2-3 に、多重バリアを構成する一般的な条件の GDF の概略図を示した。

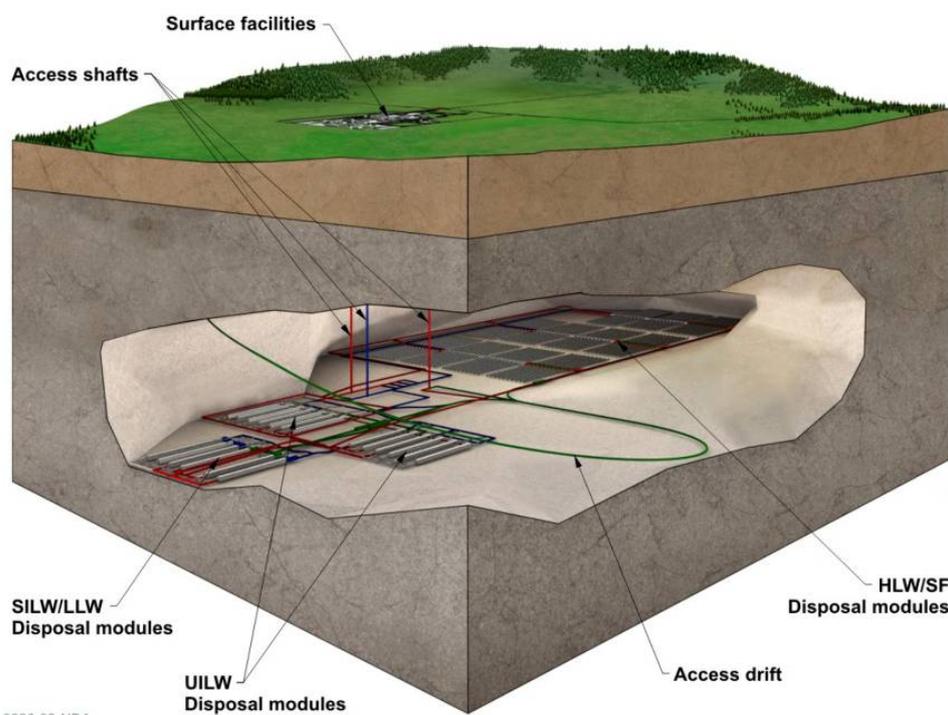


図 2-3 英国の全ての高レベル放射性廃棄物等（HAW）を対象とする一般的な条件の（すなわち特定の母岩に関するものではない）GDF の概略図（SF：使用済燃料、UILW：未遮蔽 ILW、SILW：遮蔽 ILW。）

2.3.4 廃棄物パッケージ

一部の廃棄物は、地層処分を予想して既に調整され、パッケージングが施されている。RWMD は、廃棄物パッケージが実際に製造される前に、廃棄物パッケージング提案の評価を通じて廃棄物パッケージング・サイトを支援するという、重要な役割を担っている。法令順守書処分可能性評価プロセスの適用を通じて、RWMD は製造された廃棄物パッケージが予想された輸送面でのニーズに適合したものとなるだけでなく、地層処分施設において処分に関するセーフティケースとの整合性の取れたものとなる点について、信頼を構築するために、廃棄物パッケージング事業者と協力して作業を行うことになっている。この中には、国家的及び国際的な基準に基づき、輸送及び処分に関して見込まれる要件に照らして開発されてきたパッケージ仕様が遵守されていることの立証が含まれる。

このプロセスの適用を通じて RWMD は、2つの廃棄物パッケージ関連バリア（廃棄物形態及び廃棄物容器）が輸送及び処分に関するセーフティケースの開発との関わりにおいて検討され、開発することになる。これらのセーフティケースをまとめて、「処分システムセーフティケース」(DSSC)と呼んでいる。RWMD が廃棄物パッケージがこれらのセーフティケースを遵守したものになる点に納得した場合、このことが法令順守書の発行によって示される。パッケージングプランがまだ全面的には開発されていない廃棄物及び物質に関しては、一般的な条件での DSSC との関わりにおいて、廃棄物形態及び廃棄物容器、さらに、これらのバリアの特徴及び性能に関する様々な仮定を設定しておく必要があった。これらの仮定の概要について、以下にまとめる。なお、詳細な情報は「GDF 設計報告書」に示されている。

(1) ILW 及び DNLEU

ILW（中レベル放射性廃棄物及び地層処分が予定される LLW（低レベル放射性廃棄物））は、一般的な廃棄物パッケージ仕様の遵守が確保される方法によってパッケージすることになっている。したがって、一般的に定義された標準化された廃棄物容器の一つと、当該廃棄物と結びついた放射性核種の適切な固定化が確保される調整プロセスが使用されることになる。

現在、DNLEU（劣化ウラン、天然ウラン及び低濃縮ウラン）処分に関するパッケージング・オプションの調査が実施されている。現在のところ RWMD は、GDF 計画策定及びセーフティケース開発との関連において、酸化ウランの形で圧縮され、500 リットル・ドラム

または容量が 3m³のボックス容器を用いてパッケージングされた DNLEU が、ILW 処分区域に処分される設計を評価対象としている。これらのパッケージング面での仮定は、2008 年の英国政府の白書の内容と整合するものである。しかし、実際のパッケージング方法がこれとは異なったものとなる可能性があること、また最適化もなされていないことが、認識されている。

(2) HLW、SF、HEU 及び Pu

現段階で、HLW（高レベル放射性廃棄物）、SF（使用済燃料）、HEU（高濃縮ウラン）及び Pu（プルトニウム）に関する調整及びパッケージング・プロセスに関して、一定数の仮定が設定されている。その目的は、一つのベースラインを提示するとともに、これらの処分可能性の評価を行うことにある。

- HLW の調整は、「廃棄物ガラス固化プラント（WVP）キャニスタ」として知られるステンレス鋼製のキャニスタ内に、ホウケイ酸ガラスを用いて固定化することによって行われる（ガラス固化プロセス）。また GDF 開発の現段階では、これらが処分前に高健全性容器のオーバーパックに収納されるものと想定されている。
- SF が廃棄物として取り扱われる場合、燃料集合体は高健全性処分容器のオーバーパックの収納されるものと想定されている。「加圧水型原子炉」（PWR）燃料は、完全な燃料集合体の形で直接パッケージングされる。「改良型ガス冷却炉」（AGR）燃料の場合には、解体が実施された上で、黒鉛スリーブ、支持格子及びブレースと呼ばれる留め具は ILW として別途処理される。さらに残る燃料ピンは、ステンレス鋼製「バスケット」内で燃料束と一緒に圧密される。及び
- Pu 及び HEU が廃棄物として取り扱われる場合、これらはチタン・ベースのセラミック製パックにされ、幾つものパックが一つのステンレス鋼製の缶容器に収納された上で処理されるものと想定されている。これらの缶容器は大型キャニスタ（WVP キャニスタに類似したもの）内にガラスを用いて封入され、その上で処分に適した高健全性容器にパッケージングされる。

上述したパッケージングに関する仮定は、2008 年の英国政府の白書の内容と整合したものである。しかし実際のパッケージングがこれとは異なったものとなる可能性があること、さらには最適化がなされていないことは、認識されている。

高健全性廃棄物容器の製作にどのような材質が適切であるかを明らかにする調査が、現在実施されている。HLW や SF に関しては、初期の作業によって、銅製廃棄物容器を用いたパッケージングが検討されている。

2.4 地層処分施設

2.4 においては、一般的な条件での閉鎖後安全評価で用いたインベントリの様々な特性に関する情報を提示するとともに、異なった母岩地質環境に関して具体例となる地層処分施設的设计について解説する。

2.4.1 処分インベントリ

一般的な条件での閉鎖後安全評価（PCSA）の計算では、「派生インベントリ」が使用されている。派生インベントリでは、多数の放射性核種がリストアップされているが、これら放射性核種の全てが、PCSA における地下水への放出や移行との関わりにおいて、放射線学的に重要だというわけではない。これら放射性核種の一部の半減期は、地層処分施設（GDF）から放出され、接近可能環境にまで地下水移行する間に、崩壊が起こる程、短いものである。また、そのような放射性核種以外にも、初期インベントリに含まれる放射エネルギーが極めて低水準などの理由で検討が必要となる可能性の低いものがある。このため、インベントリ・データ及び生物圏モデルで得られた結果が、一般的な条件での PCSA で明示的に検討する必要のない放射性核種を特定するスクリーニング調査において、利用されている。

このスクリーニングでは、一般的な条件での PCSA において放射線学的に重要となり得る 50 種類の放射性核種が特定されている。また、このスクリーニングの対象は、地下水経路に限定されている。また、気相における移行、あるいは意図的ではない人間侵入の結果として、放射線学的影響を生じさせる可能性のある放射性核種に対して、再度、スクリーニングを実施しなければならない。

表 2-3 及び表 2-4 に、それぞれ ILW と HLW の地層処分概念の例において、スクリーニングをした結果、レファレンスケースの派生インベントリとして、地下水経路において評価対象に組み込むべきものと判断された 50 種類の放射性核種を示した（GDF の閉鎖後期間が開始される時点をも 2150 年と想定した上で、放射性崩壊に関する調整が加えられている）。

表 2-3 2150年の時点におけるILW、LLW及びDNLEUの放射性核種インベントリ(TBq)

Radionuclide	UILW	SILW	LLW	DNLEU
^3H	1.99×10^1	3.00×10^1	3.12×10^{-1}	
^{10}Be	3.85×10^{-1}	4.08×10^{-3}	3.39×10^{-8}	
^{14}C	1.47×10^3	6.11×10^3	1.05×10^1	6.52×10^{-8}
^{36}Cl	1.01×10^1	2.49×10^1	9.30×10^{-2}	2.61×10^{-10}
^{41}Ca	4.54×10^0	1.37×10^1	3.01×10^{-2}	
^{59}Ni	9.13×10^3	8.59×10^1	1.38×10^{-2}	
^{63}Ni	3.92×10^5	4.68×10^3	5.68×10^{-1}	2.39×10^{-8}
^{79}Se	1.32×10^{-1}	6.60×10^{-5}		1.16×10^{-8}
^{90}Sr	1.38×10^4	1.94×10^{-1}		5.95×10^{-5}
^{93}Zr	1.62×10^2	3.55×10^{-2}		
$^{93\text{m}}\text{Nb}$	2.28×10^2	1.65×10^0	1.12×10^{-3}	3.96×10^{-7}
^{94}Nb	2.23×10^2	3.37×10^0	4.83×10^{-5}	7.75×10^{-6}
^{93}Mo	6.44×10^1	1.96×10^0	1.37×10^{-3}	
^{99}Tc	1.08×10^3	2.89×10^{-1}	2.81×10^{-4}	4.57×10^{-1}
^{107}Pd	5.09×10^{-1}	1.51×10^{-5}		
$^{108\text{m}}\text{Ag}$	1.63×10^3	3.14×10^{-1}	1.15×10^{-3}	
$^{121\text{m}}\text{Sn}$	3.86×10^1	2.84×10^0	2.33×10^{-2}	2.97×10^{-5}
^{126}Sn	5.81×10^0	2.26×10^{-5}		2.71×10^{-5}
^{129}I	7.13×10^{-1}	1.05×10^{-5}		1.12×10^{-9}
^{135}Cs	9.96×10^0	4.26×10^{-4}		2.88×10^{-8}
^{137}Cs	3.12×10^4	1.54×10^0		9.57×10^{-5}
^{151}Sm	1.72×10^3	1.58×10^{-1}	8.72×10^{-3}	
^{152}Eu	2.29×10^1	5.50×10^{-3}	8.33×10^{-3}	2.82×10^{-7}
^{210}Pb	4.39×10^1	2.15×10^{-2}		2.80×10^{-2}
^{226}Ra	4.38×10^1	2.14×10^{-2}		4.15×10^{-2}
^{228}Ra	4.26×10^{-1}	7.52×10^{-3}		6.07×10^{-7}
^{227}Ac	3.25×10^{-1}	1.42×10^{-3}		9.68×10^{-2}
^{228}Th	8.49×10^{-1}	8.39×10^{-3}		5.98×10^{-7}
^{229}Th	3.08×10^{-2}	6.54×10^{-4}		4.34×10^{-5}
^{230}Th	1.08×10^{-1}	7.52×10^{-6}		1.26×10^0

Radionuclide	UILW	SILW	LLW	DNLEU
²³² Th	4.26×10^{-1}	7.52×10^{-3}		6.41×10^{-7}
²³¹ Pa	1.81×10^{-1}	1.43×10^{-3}		1.22×10^{-1}
²³³ U	1.77×10^0	3.64×10^{-2}		2.95×10^{-3}
²³⁴ U	2.49×10^1	3.39×10^{-3}		8.94×10^2
²³⁵ U	7.73×10^{-1}	3.21×10^{-4}		3.88×10^1
²³⁶ U	1.86×10^0	4.04×10^{-5}		8.38×10^1
²³⁸ U	2.16×10^1	9.59×10^{-3}		1.98×10^3
²³⁷ Np	1.08×10^2	3.36×10^{-3}		9.19×10^{-4}
²³⁸ Pu	2.00×10^3	2.40×10^{-1}		5.13×10^{-3}
²³⁹ Pu	1.23×10^4	2.48×10^0		1.57×10^{-2}
²⁴⁰ Pu	1.17×10^4	1.64×10^0		2.08×10^{-2}
²⁴¹ Pu	6.10×10^2	5.35×10^{-2}		1.48×10^{-3}
²⁴² Pu	7.36×10^0	9.65×10^{-4}		2.32×10^{-5}
²⁴¹ Am	3.51×10^4	4.74×10^0		6.94×10^{-2}
^{242m} Am	1.04×10^2	3.37×10^{-4}		
²⁴³ Am	2.12×10^1	9.03×10^{-5}		
²⁴³ Cm	1.85×10^0	2.25×10^{-6}		
²⁴⁴ Cm	4.83×10^0	7.66×10^{-6}		
²⁴⁵ Cm	4.81×10^{-2}	2.03×10^{-7}		
²⁴⁶ Cm	8.65×10^{-3}	3.09×10^{-7}		

表 2-4 2150年の時点における HLW、SF、PU 及び HEU の放射性核種インベントリ (TBq)

Radionuclide	HLW	PWR	AGR	Pu	HEU
³ H		3.40×10^1	6.39×10^1		
¹⁰ Be	3.89×10^{-2}	7.39×10^{-4}	3.01×10^{-2}	8.38×10^{-11}	
¹⁴ C	6.12×10^3	8.32×10^1	1.51×10^3	3.73×10^{-6}	
³⁶ Cl	9.96×10^{-1}	7.93×10^{-1}	3.41×10^0		
⁴¹ Ca	1.14×10^{-1}	1.32×10^{-2}	3.56×10^{-1}		
⁵⁹ Ni	2.61×10^0	1.80×10^2	9.73×10^3		
⁶³ Ni	1.12×10^2	1.05×10^4	5.74×10^5		
⁷⁹ Se	4.90×10^0	1.74×10^0	5.01×10^0	7.51×10^{-7}	
⁹⁰ Sr	5.01×10^5	2.13×10^5	5.51×10^5	2.98×10^{-3}	
⁹³ Zr	5.17×10^2	1.59×10^2	4.40×10^2	3.59×10^{-6}	

Radionuclide	HLW	PWR	AGR	Pu	HEU
^{93m} Nb	5.04×10^2	1.89×10^2	5.01×10^2	3.50×10^{-6}	
⁹⁴ Nb	1.28×10^{-1}	8.06×10^1	7.47×10^2	1.11×10^{-7}	
⁹³ Mo	1.39×10^{-1}	5.52×10^0	3.43×10^1	5.67×10^{-10}	
⁹⁹ Tc	2.13×10^3	9.48×10^2	2.90×10^3	2.77×10^{-5}	
¹⁰⁷ Pd	2.63×10^1	1.04×10^1	2.56×10^1	2.17×10^{-7}	
^{108m} Ag	1.95×10^{-3}	2.46×10^{-1}	4.37×10^0	3.06×10^{-9}	
^{121m} Sn	8.26×10^2	1.17×10^1	6.69×10^0	4.58×10^{-7}	
¹²⁶ Sn	1.93×10^2	6.63×10^1	1.50×10^2	1.42×10^{-6}	
¹²⁹ I	4.91×10^{-2}	2.51×10^0	5.62×10^0	6.23×10^{-8}	
¹³⁵ Cs	1.74×10^2	3.61×10^1	1.66×10^2	1.68×10^{-6}	
¹³⁷ Cs	7.94×10^5	3.76×10^5	8.87×10^5	4.97×10^{-3}	
¹⁵¹ Sm	3.80×10^4	9.41×10^3	1.17×10^4	1.67×10^{-4}	
¹⁵² Eu	9.67×10^{-1}	4.50×10^{-1}	1.62×10^{-1}	4.23×10^{-9}	
²¹⁰ Pb	2.51×10^{-3}	2.04×10^{-3}	9.28×10^{-3}	2.08×10^{-4}	1.22×10^{-4}
²²⁶ Ra	3.13×10^{-3}	3.36×10^{-3}	1.42×10^{-2}	3.50×10^{-4}	1.76×10^{-4}
²²⁸ Ra	3.11×10^{-8}	3.68×10^{-7}	1.64×10^{-5}	3.68×10^{-9}	
²²⁷ Ac	6.08×10^{-3}	2.20×10^{-3}	1.02×10^{-2}	2.88×10^{-5}	3.21×10^{-4}
²²⁸ Th	1.37×10^{-4}	1.59×10^0	2.05×10^{-1}	4.34×10^{-9}	
²²⁹ Th	1.32×10^{-4}	2.09×10^{-4}	9.81×10^{-4}	4.59×10^{-5}	
²³⁰ Th	4.80×10^{-2}	1.37×10^{-1}	4.70×10^{-1}	1.50×10^{-2}	4.94×10^{-3}
²³² Th	3.11×10^{-8}	3.75×10^{-7}	1.65×10^{-5}	4.08×10^{-9}	
²³¹ Pa	6.12×10^{-3}	2.46×10^{-3}	1.15×10^{-2}	4.17×10^{-5}	3.95×10^{-4}
²³³ U	1.84×10^{-2}	2.51×10^{-2}	1.02×10^{-1}	9.77×10^{-3}	
²³⁴ U	3.34×10^{-1}	1.55×10^2	3.91×10^2	1.83×10^1	3.20×10^0
²³⁵ U	8.66×10^{-4}	3.83×10^{-1}	1.94×10^0	2.41×10^{-2}	1.11×10^{-1}
²³⁶ U	7.43×10^{-3}	1.60×10^1	6.37×10^1	1.04×10^0	
²³⁸ U	2.44×10^{-2}	1.36×10^1	6.43×10^1	1.15×10^{-4}	7.35×10^{-4}
²³⁷ Np	3.37×10^1	4.40×10^1	1.08×10^2	3.02×10^1	
²³⁸ Pu	5.96×10^2	1.65×10^5	1.64×10^5	2.28×10^4	
²³⁹ Pu	2.01×10^2	2.03×10^4	3.31×10^4	1.51×10^5	
²⁴⁰ Pu	5.80×10^2	4.38×10^4	8.42×10^4	2.17×10^5	
²⁴¹ Pu	3.68×10^1	1.29×10^4	2.07×10^4	1.38×10^4	
²⁴² Pu	6.82×10^{-1}	1.62×10^2	6.89×10^2	2.65×10^2	
²⁴¹ Am	2.05×10^5	2.17×10^5	5.66×10^5	6.04×10^5	

Radionuclide	HLW	PWR	AGR	Pu	HEU
^{242m} Am	4.48×10^2	7.04×10^2	2.77×10^3		
²⁴³ Am	1.21×10^3	2.87×10^3	6.01×10^3		
²⁴³ Cm	3.55×10^1	1.33×10^2	2.27×10^2		
²⁴⁴ Cm	3.94×10^2	4.88×10^3	3.87×10^3		
²⁴⁵ Cm	1.56×10^1	1.01×10^2	3.20×10^1		
²⁴⁶ Cm	3.42×10^0	3.97×10^1	1.07×10^1		

2.4.2 地層処分概念

2.3.3 では、3 件の地層処分概念事例を示した。2.4.2 では、それぞれの設計に関係して、より詳細な情報を示す。それぞれのタイプの一般的な母岩について RWMD は、海外機関から入手した概念を適切に作り替えることにより、いくつかの地層処分施設（GDF）の設計を示した。これらの地層処分概念事例は、人工バリア及び天然バリアの両方を使用するものであり、これらのバリアが全体として、必要とされるレベルの放射性核種の長期隔離、閉じ込め及び移動制限を実行する役割を担う。RWMD は、ILW/LLW 及び HLW/SF（Pu、DNLEU 及び HEU を含む）に関して、レファレンスケースのインベントリに基づく GDF 設計を作成するために、計画策定面を基礎として、「派生インベントリ報告書」を使用した。これらのオプションが現在、概念的なものとみなされていること、さらには現実のサイトが利用可能となった時点で、具体的なサイト、概念及び廃棄物固有の GDF が設計されることに注意すべきであろう。なお、GDF 開発に関する RWMD の計画策定の詳細は、「実施に向けたステップに関する報告書」に記載されている。

3 件の地層処分概念事例において、廃棄物の調整は、その処分に先立って実行されるものと仮定している。ILW の場合、調整には化学的な処理や減容または圧縮が含まれる可能性がある。その上で、大部分の廃棄物は、セメント固化され、派生インベントリで仕様が定義された一定範囲の標準的または、非標準的なパッケージが形成される。UILW パッケージは、500 リットルのドラム、3m³ のドラム、3m³ のボックス容器、さらには β/γ 雑固体廃棄物貯蔵（MBGWS）ボックス容器などで構成される。SILW パッケージは、4m のボックス容器、2m のボックス容器、さらにはウィンズケール改良型ガス冷却炉（WAGR）ボックス容器などで構成される。LLW パッケージは、2m 及び 4m ボックス容器で構成され、DNLEU は 500 リットルのドラムを用いて、ILW としてパッケージングされるものと想定されている。HLW/SF パッケージング・オプションに関する記述は、派生インベントリの関連する節に見いだすことができる。いずれの設計も、それによって得られる廃棄物パッケージが、廃棄物の安全な取り扱い、貯蔵、輸送及び処分に関して合理的に予見可能な要件の全てを確実に満たすものである（ここで「処分」という用語は、GDF で実施される全ての活動を含むものとする）。それぞれの概念に共通する設計面での仮定は、次のようになっている。

- これらの設計では、母岩が、鉛直方向にも水平方向にも、当該施設を受け入れる上で十分な範囲を備えているものと仮定されている。

- ・ 処分施設は、単一の地表サイトを伴うものとして実現される。
- ・ 当該施設は、処分のために ILW/LLW、HLW/SF、DNLEU、HEU 及び Pu を受け入れ、移動させるよう設計される。
- ・ ボールト及び横坑にアクセスするために、3 本の立坑が使用されることになっている（蒸発岩の場合には 4 本）。この横坑は、全ての廃棄物を地下に移動させるために用いられる。
- ・ ILW/LLW 処分区域と HLW/SF 処分区域とを分離するために、両者の間に最低でも 500m の距離が設けられる。
- ・ ボールトの設計及び建設は、これらが操業期間を通じて力学的に安定した状態を保つように実施される。
- ・ 将来の同意が成立した時点で、GDF は閉鎖され、シーリングされる可能性がある。

ILW/LLW 及び DNLEU

- ・ 「標準廃棄物輸送容器」(SWTC) に収納された ILW 廃棄物容器を地表から処分ボールト・レベルまで移動させるために、立坑を使用することができる。
- ・ UILW は、遠隔操作装置を用いて、ボールト内に定置される。
- ・ 高強度及び低強度堆積岩に関する概念において、RWMD は、ILW/LLW ボールトの埋め戻し及びシーリングを実施することを検討している。その際には、廃棄物が定置された後に、セメント質グラウトが用いられる。

高強度岩の場合、RWMD は Nirex³の「レファレンス・ボールト埋め戻し材」(NRVB) を用いた埋め戻しを検討している。この NRVB は、高強度及び低強度堆積岩に関する概念において、施設閉鎖後に放射性核種のニアフィールド内での閉じ込めに関して重要な役割を担う。これらのケースでは、埋め戻し作業によって、埋め戻し材の化学条件が確実に適切なものとされなければならない。したがって RWMD は、廃棄物パッケージの周囲における隙間形成を最小限にするだけでなく、壁岩と床部分の間の割れ目、亀裂及び収縮の発生を最小限にすることになる。NRVB が使用される場合、調整済みの廃棄物の体積に対する埋め戻し材の比率は、ILW 及び LLW のケースでは約 1:1 と予想されている。しかし RWMD は、この比率がサイト固有のものであることを認識している。

³ Nirex は、以前は英国環境・食糧・農村地域省 (Defra) と貿易産業相の両方の管轄下に置かれていた組織である。その目的は、政府の政策を支援する形で、英国内での放射性物質の長期管理のために、安全で、環境面で健全であり、公衆にとって受け入れ可能なオプションを開発するとともに、これらのオプションに関する助言を提供することであった。政府が 2006 年 10 月に CoRWM に示した回答により、Nirex の様々な機能の NDA への組み込みが開始された。この作業は 2007 年 3 月に終了している。

HLW/SF、Pu 及び HEU

「HLW/SF」という分類には、廃棄物の再処理によって生じたガラス固化 HLW や AGR 及び PWR から取り出された使用済原子炉燃料などが含まれている。RWMD はさらに、Pu と HEU の処分も検討している。これらは、SF の場合と同様に、現時点では廃棄物として分類されていない。現段階では、HLW/SF に関する処分概念は決定されていない。しかし幾つかの国際的な HLW/SF 概念では、廃棄物形態（ガラス固化体または SF）、処分容器、圧縮されたベントナイト緩衝材で構成される「人工バリアシステム」（EBS）が検討されている。RWMD は、かなりの期間にわたって絶対的な閉じ込めをもたらすために、安定した廃棄物形態及び高健全性金属容器の仕様を検討している。ベントナイト緩衝材は、処分容器を（例えば岩石の剪断運動から）保護するだけでなく、放射性核種移行に対する拡散バリアを形成する。それぞれの設計において、次に挙げる仮定が採用されている。

- ・ HLW/SF 及び Pu/HEU の封入が、別々のサイトで廃棄物発生者によって実施される。処分施設で封入が実施されることはない。
- ・ 横坑では、地表から処分場レベルまで、廃棄物容器が「処分容器輸送容器」に収容された形で移動される。

RWMD は、これらの仮定が今回の一般的な条件の段階においては高次元のものであることを認識している。しかし RWMD は、GDF プログラムが進展するにつれて修正及びオプショニアリングを行うことになる。サイト特性評価プログラムから入手されるデータは、当該システムの理解を深める上で役立つ。またこの種の情報は、適切な GDF 設計を選択するために、さらにはその最適化を行うために利用される。リスクが合理的に実行可能な限り低く（ALARP）なるようにするためには、設計を最適化するための要素を数多くの検討する必要があるほか、その詳細はそれぞれのサイトごとに異なったものとなる可能性がある。この中には、廃棄物パッケージ、緩衝材、埋め戻し材及びシール材、GDF のレイアウト及び廃棄物の定置、現位置の地質条件と調和する EBS の設計、地圏、地表施設及び輸送システムなどが含まれる。以下の項において、それぞれの地質条件のタイプに関連する地層処分概念事例に関する設計面での特徴を示した。

(1) 高強度岩

図 2-4 に、高強度母岩に関する地層処分概念事例の平面図を示した。この施設は、深度 650m の単一レベルに建設されるものと想定されている。設計面での仮定は、以前に Nirex の ILW/LLW とスウェーデンの SF を対象とした SKB KBS-3V の概念のために開発した「段階的な地層処分場概念」(PGRC) に関する設計パラメータに基づいている。鍵となる特徴及び計画策定面での様々な仮定について、以下にまとめた。

ILW/LLW 及び DNLEU

- ・ 合計で 19 ヶ所の処分ボルト(その横断面は、およそ幅 16m×高さ 300m×長さ 16m) が、UILW 及び DNLEU のために用意される。そのうちの 6 ヶ所は DNLEU 向けのものになると仮定されている。
- ・ 合計で 6 ヶ所の処分ボルト(およそ幅 16m×高さ 15m×長さ 300m のもの) が、遮蔽された ILW 及び LLW のために用意される。
- ・ 埋め戻し材比率を 1:1 とした場合、約 120 万 m³ の NRVB が必要となる。この量には、ILW 及び LLW ボルトの頂部スペースに用いられる充填材も含まれる。

HLW/SF、Pu 及び HEU

高強度岩における HLW/SF 向けの地層処分概念の具体例(スウェーデンの KBS-3V の概念に基づくもの)では、廃棄物及び SF が鋳鉄インサートを伴う銅製容器に封入されることが想定されている。その上でこの銅製容器は、一連の処分坑道沿いに掘削された鉛直方向の定置孔に定置され、それぞれベントナイト緩衝材によって取り囲まれる。

- ・ 処分坑道の長さは約 300m であり、入り口は一カ所だけである。その寸法は、幅 10m×高さ 7m で、それぞれの坑道は不適切な位置が排除される可能性を考慮した上で、約 44 ヶ所の定置孔を掘削できる。合計で 30 ヶ所の処分区域(1 区域につき坑道が 10 本掘削される)に配置する必要がある処分坑道は、合計で 296 本である。
- ・ 定置孔の中心線の間隔は、6.5m とされる。緩衝材にはベントナイト・ブロック及びリングが用いられる。定置孔内で達成される必要のある廃棄物体積に対する緩衝材体積の比率について、特定の数値は設定されていない。
- ・ HLW/SF 及び Pu/HEU に使用される処分坑道の埋め戻しは、ある坑道にある全ての定置孔に廃棄物が収容された時点で実施される。この埋め戻しには混合比が 70:30 の砕石/ベントナイト混合物が使用され、必要に応じて設置される隔壁の間には、高度に圧縮されたベントナイト・シール材が用いられるものと仮定されている。ここで使用されるベントナイトの種類は、当該サイトに存在する地下水の塩度に左右される場合がある。定置孔の内張りに必要とされるベントナイトの量は約 28 万 5,000m³ である。また、処分坑道の埋め戻しに必要とされる埋め戻し材の量は約 230 万 m³ である。

GDF 占有投影面積（フットプリント）

派生インベントリの廃棄物量を収容する GDF のフットプリントは約 5.6km² となり、以下のもので構成される。

- UILW ボールト：34 万 6,000m²
- SILW/LLW ボールト：8 万 9,000m²
- HLW/SF 及び Pu/HEU 定置坑道：224 万 6,000m²、及び
- 車道ならびに支援区域：291 万 m²。

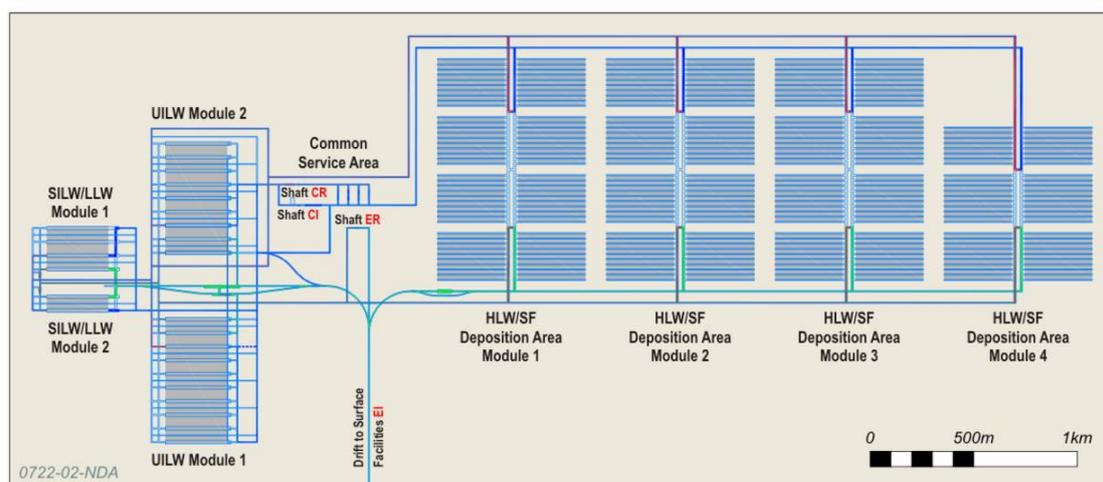


図 2-4 高強度岩における GDF レイアウトの理想化された平面図の一例

(2) 低強度堆積岩

低強度堆積岩に建設される施設的设计で鍵となる仮定は、ILW/LLW 及び HLW/SF 向けの Nagra の概念との関連で開発された設計パラメータに基づくものである。ここで挙げた概念例では、母岩が低強度堆積岩であり、その上に比較的透水性の高い堆積岩が位置していること、そして当該施設は深度 500m にある単一レベルに建設されることが想定されている。以下において、鍵となる特徴及び計画策定面での仮定についてまとめる。

HLW/SF、Pu 及び HEU

低強度堆積岩における HLW/SF 処分のための具体例となる地層処分概念では、平行方向に配置された処分坑道に、炭素鋼鉄製の廃棄物容器を水平方向に定置した上で、その周囲をベントナイト粘土緩衝材で取り囲む方法が採用されている。

- 合計で 99 本の処分坑道が必要となる。
- 処分坑道は直径が 2.5m、長さが 800m のものとされ、全体が岩石で構成される 40m の柱石によって分離される。
- HLW/SF 及び Pu/HEU 向けの処分坑道の埋め戻しは、砂とベントナイトの混合比が 70 : 30 の混合材を用いて行われる。必要とされるベントナイト（ブロック及び埋め戻し材）の量は、約 35 万 4,000m³である。
- 処分坑道は、砂とベントナイトの混合材（混合比は 70 : 30）で満たされ、必要に応じて配置される隔壁の間には高度に圧縮されたベントナイト・シール材が使用される。また立坑は圧縮されたベントナイトで満たされる。

GDF フットプリント

派生インベントリに示された廃棄物量を収容する GDF に必要なフットプリントは約 10.3km²であり、次に挙げるものによって構成される。

- UILWホールト：58万6,000m²
- SILW/LLWホールト：26万7,000m²
- HLW/SF及びPu/HEU定置坑道：330万1,000m²、及び
- 車道ならびに支援区域：614万5,000m²。

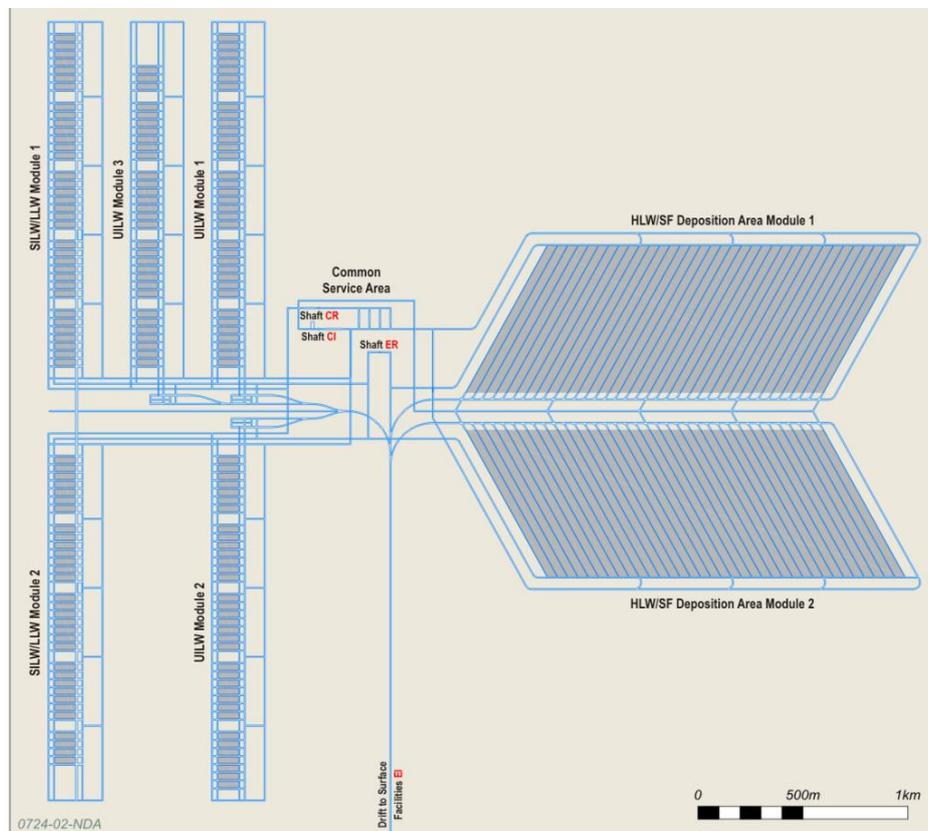


図 2-5 低強度堆積岩 GDF のレイアウトの理想化された平面図の一例

(3) 蒸発岩

蒸発岩に建設される施設の設計に関する仮定は、米国の WIPP 概念 (ILW/LLW)、またドイツのゴアレーベン施設 (HLW/SF) のために開発された設計パラメータに基づくものである。ゴアレーベン施設に関しては、2 種類の設計オプションが検討された。すなわち、岩塩ドームの坑道内に掘削される横抗において軸方向にキャニスタを定置し、このキャニスタの周囲の埋め戻し材として破碎岩塩を用いてする方法と、300m の深層ボーリング孔内にキャニスタを処分する方法である。

英国の HLW 及び使用済燃料の性質及び量を考慮した上で、水平方向の坑道において、処分キャニスタに収納された廃棄物を水平方向に定置するやり方を選択した。

また、650m の深度にあり、その上に比較的透水性の高い堆積岩が位置する層状ハーライト (岩塩) における単一レベルの概念が採用されるものと仮定した (図 2-6)。また以下において、鍵となる特徴及び計画策定面での仮定についてまとめる。

ILW/LLW及びDNLEU

- ・ 合計で167カ所のUILWボルト (高さ5m、長さ100m及び幅10m) が必要とされる。この中には、DNLEUの処分のために必要な52カ所のボルトが含まれる。
- ・ 合計38カ所のボルトが、SILW/LLWの処分に必要とされる。これらのボルトは、幅が10m、高さが5.5m、長さが90mとなる。
- ・ ILW/LLWボルトの埋め戻しは行われぬ。これは、何らかの空隙がある場合にも、岩石層自体がそれを満たすことができるためである。酸化マグネシウムの袋が、廃棄物パッケージの最上部に置かれる。

HLW/SF、Pu及びHEU

HLW を対象とするゴアレーベンの処分概念は、おそらく 300m までの長さの鉛直方向のボーリング孔を使用するものである。この種のボーリング孔の掘削場所としては、層状堆積物層よりも、岩塩ドーム層の方が適切である。RWMD が想定した地層処分概念事例は、処分坑道において廃棄物容器を軸方向に定置し、坑道自体は碎石岩塩で埋め戻す方法に基づいている。これは、粘土岩内で HLW/SF 処分を実施する Nagra の概念に類似したものである。ゴアレーベン概念では、廃棄物容器の直接処分が想定されている。

- ・ 合計で99カ所の処分坑道が必要とされ、処分キャニスタは3mの間隔を置いて、水平方向に定置される。

- ・ 処分坑道の長さは800mとなろう。その寸法は、幅4.5m×高さ3.5mとされる。また処分坑道の中心線の間隔は約40mとなる。
- ・ 砕石岩塩を用いた処分坑道の埋め戻しは、HLW/SF廃棄物容器が定置されるのに従って実施される。

GDFのフットプリント

派生インベントリで考慮されている廃棄物量を収容する GDF のフットプリントは約8.8km²であり、以下に挙げるものによって構成される。

- ・ UILWホールト : 60万5,000m²
- ・ SILW/LLWホールト : 14万2,000m²
- ・ HLW/SF及びPu/HEU定置坑道 : 331万1,000m²、及び
- ・ 車道及び支援区域 : 469万m²

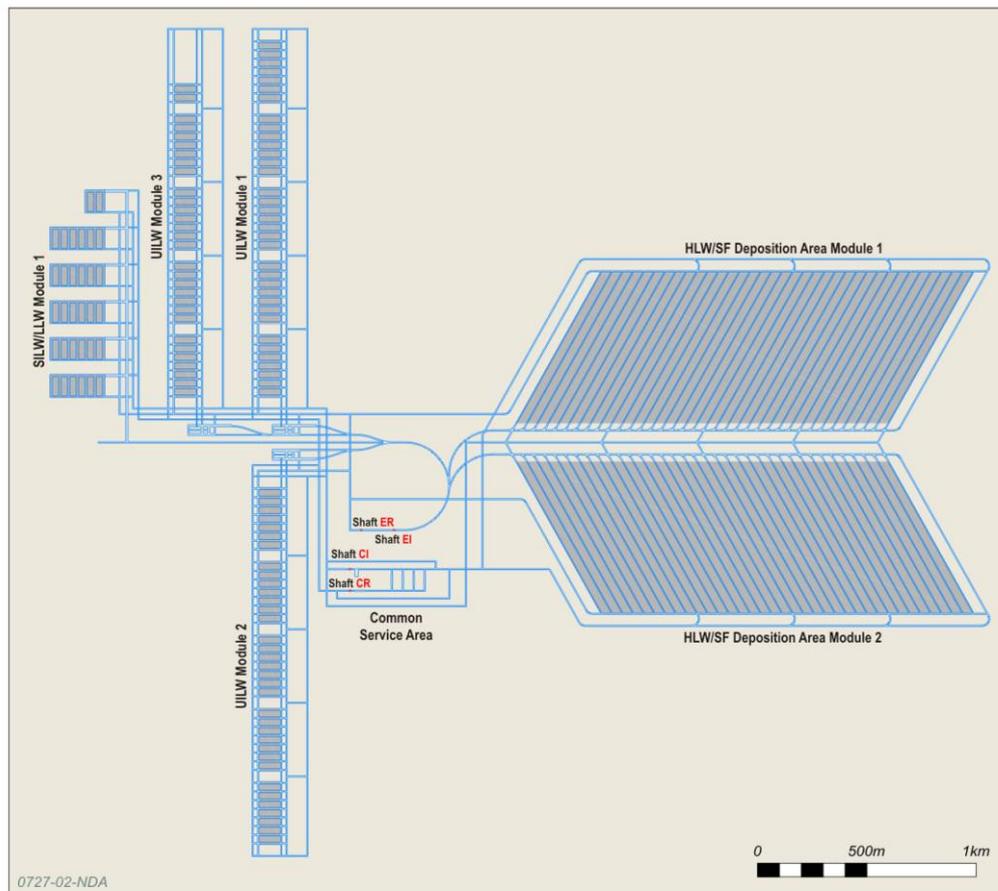


図 2-6 蒸発岩を母岩とする GDF レイアウトの理想化された平面図の一例

2.5 アプローチ方法

2.5 では、RWMD が性能評価に使用しているアプローチ及び地層処分施設（GDF）に関するセーフティケースの作成における寄与について説明する。また、性能評価で取り扱われることになる英国の地層処分に関する規制ガイダンスについて記述する。RWMD は、システム挙動に関する理解を深めるために、RWMD 及び海外で実施されてきた作業について検討する。そのために使用されたモデル及びパラメータの両方に不確実性が存在し、性能評価のための極めて長い期間（数十万年まで）における不確実性の計算が実施されている。RWMD は、これらがどのように取り扱われているかについて説明する。

2.5.1 閉鎖後性能評価に関する規制面での背景

閉鎖後安全評価（PCSA）は、操業環境安全評価（OESA）とともに、環境セーフティケース（ESC）を支援するものである。ESC では、地層処分施設（GDF）における放射性廃棄物処分の許可に関連する環境安全面での規制及び要件を取り扱われなければならない。この中には、「許可要件に関するガイダンス」（GRA）に含まれる詳細な規制面での「原則及び要件」が含まれ、これは、GDF に関するセーフティケースの管理と放射線学的及び技術的側面を包含するものである。PCSA は特に要件 R6、R7 及び R9 の履行を目的としている。これらの要件の内容を次に示す。

囲み記事1：GRA要件R6、R7及びR9

要件R6：許可期間終了後のリスクガイダンス・レベル

許可期間終了後に、最大のリスクを受ける人間を代表する一人の個人が一つの処分施設から受けることが評価される放射線学的リスクは、 10^{-6} /年（すなわち1年間に100万の1）というリスクガイダンス・レベルと適合したものであるべきである。

要件R7：許可期間終了後の人間侵入

地層処分施設の開発者/操業者は、許可期間終了後の人間侵入の生起可能性は極めて低いと仮定すべきである。しかし開発者/操業者は、その生起可能性をさらに低下させる実用的な措置が見いだされた場合には、それについて検討し、実行に移す必要がある。また開発者/操業者は、許可期間終了後の人間侵入によって生じる潜在的な影響についても評価しなければならない。

要件R9：環境放射能

開発者/操業者は、許可期間及び許可期間終了後の両期間において、処分施設が接近可能環境に及ぼす放射線学的影響を調査するために、接近可能環境のあらゆる側面が適切に防護されていることを示すことを目的として、評価を実施しなければならない。

許可要件に関するガイダンス（GRA）では、地層処分施設（GDF）に関連する放射線学的及び非放射線学的な危険性の評価が要求されている。この中には次のものが含まれる。

- 許可期間終了後の公衆に対する放射線学的リスク。この中には起こり得る気体放出、地下水への放出、破壊的なものとなり得る自然事象（例えば、氷河作用及び気候変動の結果として生じる侵食など）や人間侵入に伴って生じるリスクが含まれる。この評価に関する安全処置として、GRAの要件R6では、最も大きなリスクにさらされる人々を代表する個人に関して算出された放射線学的リスクとの比較すべきものとして、1年あたり 10^{-6} というリスク・ガイダンスレベルが設定されている。
- GDFに対する意図的でない人間侵入が生じさせる、当該侵入を行う個人、当該侵入事象に伴う放出の影響を受ける区域の人々及びその他の生物に対する放射線量面での影響。この評価ではさらに、より広範な地理的な意味における人間侵入の影響と、当該処分システムの長期的な挙動に及ぼす人間侵入の影響を検討する必要がある。GRAの第6.3.40項では、人間侵入が発生した場合、「このリスクガイダンス・レベルは、放射性核種がバリアを越えて分散し、希釈のメカニズムが作用する場所に適用される。この中には、処分システム内の人間の行為によって擾乱が生じた部分も含まれる。」と記載している。
- 臨界。例えば中性子連鎖反応を生じさせる核分裂性物質の局所的な蓄積が起こる可能性が重要な懸念とはならないことを明示する必要があり、さらには一つのバリエーション・シナリオとして、想定された臨界事象が処分システムの性能に及ぼす影響について調査する必要がある。
- 起こり得る放出に伴って接近可能環境に対して（例えば生息地の質の低下を招くことによって生じる影響）、あるいは人間以外の種に対して生じ得る放射線学的な危険性]。現在のところ環境に関する放射線防護について国際的に確立された規準は存在しないが、これは現在様々な調査が進められている領域の一つであり、評価される時点で最良の利用可能な情報を用いて、接近可能環境に対するGDFの影響に関する結論を導き出すことになる。
- 公衆及び環境に対する非放射線学的リスク。GDFに処分される放射性廃棄物には、非放射線学的な危険をもたらす構成成分が含まれる可能性がある。有害廃棄物の処分に関する国家基準が定められており、GDFが非放射線学的な危険性に関してもこれらの基準と同水準以上の厳格な防護レベルを実現することが、明示される必要がある。この点に関する証明は、主として設計及び工学に基づく筋の通った論拠を通じて実施される見込みであるが、この論拠を裏づけるために幾つかの計算を行う必要が生じる可能性もある。

規制組織は、主要な安全指標のための規準を設定している（例えば、線量率またはリスクなどに関するもの）。国際的なガイダンスでは、セーフティケースにおける線量率及び/またはリスク指標の計算を支援するために補完的な安全指標を使用することを勧告している。RWMD の評価では、GDF の安全性と個別バリアの性能を評価するために使用できる

放射線量及びリスクを超えた追加的な性能尺度を考慮することになる（例えば、放射性核種フラックスなど）。

2.5.2 システム挙動に関する理解

RWMD が評価に使用する方法論は、IAEA や経済協力開発機構・原子力機関（OECD-NEA）が設定し、国際的に受け入れられている方法論に適合した正式な開発プロセスに基づくものである。RWMD は、安全性、システムの変遷に伴う代替シナリオ、さらには時間依存性プロセス（気候変動に関連するものなど）の明確な表現に関連する全ての「特性、事象及びプロセス（FEP）」の体系化された解析を検討した。このアプローチでは、地層処分施設（GDF）のシステム全体と、当該システムに予想されるか自然に生じる経時変化について記述するレファレンスケースまたは基本シナリオが定義される。RWMD は、確率論的事象（すなわち発生する可能性も発生しない可能性もある FEP）の影響を表現する幾つかのバリエーション・シナリオを定義している。また RWMD は、将来の人間の行動及び環境に関する記述を表現するために「様式化されたシナリオ」を使用する。その例として、IAEA の BIOMASS プロジェクトによって開発された「レファレンス生物圏」が挙げられる。シナリオ開発方法及び実施に関して OECD/NEA が行った 1 件の調査において、FEP 及びシナリオに基づくアプローチが、将来の予測に伴う不確実性に対処する上で最も基礎的な方法であるという結論が示されている。

2.5.3 不確実性の取扱い

放射性廃棄物の長期管理の解決策として、地層処分が選ばれた重要な理由は、きわめて長いタイムスケールにおいて、地表から人間がアクセス可能な状態で廃棄物を維持することに伴う大きな不確実性を排除するためである。RWMD は、適切に選択された地質学的サイトが、将来のきわめて長い期間にわたり比較的安定した状態を維持するだけでなく、放射性物質の効果的な閉じ込めを実現することに関して、多大な信頼を抱いている。

しかし RWMD は、数十万年にも及ぶタイムスケールにわたり、地層処分システムに作用する様々なプロセスに回避することのできない大きな不確実性が伴うこと、さらにはこれらの不確実性に関して地層処分施設（GDF）を支援するための性能評価において適切な処理を行う必要があることを、認識している。

地層処分システムには、性能評価に影響を及ぼす可能性のある不確実性を持った様々な

地域が沢山ある。

- 処分システムの将来の状態に関する不確実性：GDFとその環境に長いタイムスケールにわたって生じる経時変化に関して、確実な把握が実現しているわけではない。したがって性能評価では、将来の経時変化に関して一定範囲の異なったシナリオを検討する必要がある。
- データに関する不確実性：利用可能なデータが不完全であるか、不正確であるか、そもそも利用可能でない可能性があり、これに伴って性能評価に必要なパラメータにも不確実性が生じる。原則として、より多くの測定を行うか（候補地の岩石特性の場合）、より多くの研究所実験を行う（溶解度などの化学パラメータの場合）ことにより、これらのパラメータの不確実性を低下させることができる。しかし、一部の不確実性（例えば、遠い将来に存在する可能性のある化学条件の範囲の不確実性など）は、低減することはできない。また性能評価に必要とされる一部のパラメータは、不確定であるだけでなく空間的なばらつきを伴う特性（例えば岩石の透水係数）に関するものとなる。
- モデルに関する不確実性：RWMDは、大部分のプロセスを適切なレベルで理解できていると考える一方で、一部の関連性の高い「特性、事象及びプロセス」（FEP）に関する理解や、これらのFEPがどのような相互関係にあるのかについての理解は不正確なものである可能性があり、このことが概念モデルの選択及び作成における不確実性を生じさせている。あるモデルが実際に観察されたデータへの適合を示したとしても、プロセスが適切に理解されていないか表現されていないならば、そのモデルは、観察の範囲外の状況に関する結果の計算において誤解を招くものである可能性がある。関連するプロセスが適切に理解され、表現されるようにするためにRWMDは、「特性、事象及びプロセス」（FEP）アプローチを開発した。さらなる信頼を実現するためにRWMDは、必要に応じて保守的な仮定を採用している。すなわちRWMDは、評価を有効な形で単純化することができる場合、あるいは裏付けとなるデータが不足している場合には、放射線学的なリスクが過小評価されるのではなく、過大評価される傾向を伴う仮定を設定することができる。
- 人間の行動に関する不確実性：人間の行為はかなりの程度まで予測不可能なものであり、処分システムの性能及びそれが及ぼす効果に顕著な影響を与える可能性がある。例えば、将来人々は水を手に入れるために井戸を掘ったり、GDF区域で掘削作業を実施したりする可能性がある。また人間の活動によってGDF周辺のランドスケープが変化する可能性があるほか、習慣の変化に伴ってGDFが将来の世代の人々に与える放射線学的な効果に影響が生じることも考えられる。

RWMDには、全ての不確実性を完全に解決することなどできない。したがってRWMDは、こうした不確実性を管理する方法を見いだす必要がある。その中にはRWMDが、選択した処分概念の設計を最適化するにつれて、こうした不確実性を「設計により排除してゆく」やり方が含まれるだろう。処分システムの将来の状態及び将来の人間の行為に伴う不

確実性は、シナリオ開発を通じて処理することができる。RWMD は、この種の不確実性を処理するために体系化されたアプローチを開発しており、2.5.3 (1) でこの点について検討する。また、上記の不確実性以外のタイプの不確実性を取り扱う一定数の方法を用意しており、2.5.3 (2) においてこの点について検討する。さらに 2.5.3 (3) で、不確実性を処理するための確率論的アプローチについて詳しく説明する。

(1) シナリオの開発

RWMD は、今後行われる性能評価で詳細に取り扱われるシナリオの開発に役立つ FEP 解析アプローチを開発した。このアプローチは、国際的なレビューにおいて肯定的な評価を得ている。同様のアプローチは、世界の様々な組織によって採用されている。この方法では、GDF 概念の性能との関連性の高い全ての FEP に関する系統的な解析によって、1 件の基本シナリオに加えて、GDF に起こり得る経時変化を定義する一定数のバリエーション・シナリオが特定されることになる。それぞれのシナリオは一定範囲の概念モデル（シナリオに採用された FEP に関する知識に基づいて開発されたもの）によって表現される。また数学モデルがそれぞれのシナリオに関する概念モデルから開発され、ソフトウェアで実行される。

FEP の特定及び解析を通じて、地層処分システムの性能に影響を及ぼす関連要素に関する詳細な記述がなされる。しかし、以下のものを含む様々な不確実性が存在することになる。

- ・ 様々な FEP の間の相互作用（結合プロセスにつながる可能性がある）に関連する不確実性と、概念的及び数学的モデルにおいてそれらを表現する方法に伴う不確実性。
- ・ GDF 及びその環境における将来の経時変化に関する不確実性。及び
- ・ 将来の人間の行為及び挙動に関する不確実性。

RWMD は、これらの不確実性と、GDF 及びその環境に将来起こる経時変化に関する不確実性に対し、様々なシナリオを検討することによって対処する。この評価の中心は、基本シナリオに置かれる。この基本シナリオでは、閉鎖時の処分システムの特徴と、当該システムに時の経過とともにどのような変化が生じると予想されるかが記述される。基本シナリオからの逸脱（発生する可能性も発生しない可能性もある FEP によって引き起こされ

るもの) は、バリエント・シナリオとして検討される。

RWMD は、たとえ完全な FEP 解析を実行できたとしても、正しい FEP がモデルにおいて正しく表現されているかどうかに関する不確実性を完全に排除できないことを認識している。様々な FEP の間の相互作用ではなく、FEP 自体が特定の評価で取り扱われる具体的な条件において正しく表現できない可能性に伴う不確実性は、常にある程度残ることになる。

このために RWMD は、慎重なアプローチを採用することになる。これにより RWMD は、モデル化に対する合理的なアプローチを維持する一方で、GDF から生じる放射線学的なリスクを過小評価することなく、過大評価することになる。このアプローチの一つの要素に、確率「1」を基本シナリオの発生に対して適用することがある。比較的高い条件付きピーク・リスクを与えるものと評価されたバリエント・シナリオに対しては（その原因となる FEP の確率を反映する形で）1 未満の確率が割り当てられる。こうして基本シナリオにバリエント・シナリオ表現を追加することにより、全ての確率の合計が 1 を超えることになる。こうした慎重なアプローチによって評価における基本シナリオの役割が大きくなり、このことは、詳細な検討の対象とする必要があるのは、基本シナリオのそれを超過する条件付きリスクを伴うバリエント・シナリオだけとなることを意味する。

包括的な定量評価において RWMD は、結果の提示に際し、リスク・ガイダンスレベルとの比較のために、基本シナリオに関して計算したものだけでなくバリエント・シナリオに関連するリスクも提示することになる。したがって、性能評価における全面的な検討対象とする必要があるのは、基本シナリオに関して算出されたリスクを上回るリスクにつながるバリエント・シナリオ（それが発生している場合）だけである（RWMD は基本シナリオに、それよりも低い放射線学的影響を伴うバリエントを効果的に包含させている）。

今回の一般的な条件での評価では候補地の地質学的状況に関する知識が得られていないため、RWMD は優先的な概念を設定していない。したがって RWMD は、検討対象となるシナリオに関して幾つかの仮定を設定しなければならなかった。RWMD は、今回の評価において、地下水経路が基本シナリオの一部として取り扱われるものと想定した。一部の地質条件では、気体の放出が重要な意味を持つ可能性がある。これらのケースについて RWMD は、基本シナリオの一部として気体経路も取り扱うことになる。GDF への人間侵入ならびに臨界の可能性については、バリエント・シナリオとして検討されている。

将来の評価では、どのシナリオについて定量的な評価を行い、どのシナリオについて定

性的な検討を行うべきかに関する決定を行う必要がある。上述したシナリオに加え、地質学的条件及び立地場所に応じて、地圏及び生物圏で起きた重要な変化に対応してその他のバリエーション・シナリオを検討する必要性が生じる可能性もある。この中には、氷河作用のような主要な気候変動に関するシナリオも含まれる可能性があるが、RWMD は今後かなりの期間にわたってこの種のシナリオが実現するとは考えていない。

(2) 不確実性の取り扱い方法

これ以前の節において RWMD は、FEP 解析とシナリオ開発、さらには適切な FEP をベースとした評価時間枠を採用することで、将来の状況に関する不確実性にどのように対処できるかについて説明した。しかし、1 件の明確なシナリオに関しては、RWMD は依然としてデータ面での不確実性とモデル面での不確実性の管理を行う必要がある。

不確実性の取り扱いに関する戦略は、次に挙げる広範なカテゴリーに分類される傾向がある。

1. 当該不確実性が意味のないものであることを明示すること。その例として、ある特定のプロセスにかかわる不確実性が、例えば関連する安全性が別のプロセスによって管理されていることから、安全性にとって重要なものではないような状況が挙げられる。
2. 不確実性を明示的に取り扱うこと。例えば、確率論的手法を使用すること。
3. 不確実性の範囲を明らかにし、その範囲内の境界ケースでさえ、受け入れ可能な安全性が実現することを示すこと。
4. 不確定なプロセスまたは事象を排除すること。通常この排除は、その発生確率がきわめて低いことに基づいてなされるほか、たとえその不確実性が発生した場合でも、GDF に関連しないその他の影響の方が GDF 性能に対する懸念をはるかに上回ることも、その根拠とされる（例えば隕石の直接的な衝突など）。
5. 不確実性を明示的に無視するか、一つの不確実性の取り扱いに関する様式化されたアプローチの使用に同意すること。

特定の不確実性に関して優先される処理は、評価の背景状況や GDF の開発段階に応じて決まることになる。今回のような一般的な条件での段階の場合に RWMD は、具体例となる地下水経路の評価に伴う一部の不確実性を処理するために、確率論的アプローチを採用した。次項において、この確率論的アプローチに関する詳細を示す。

(3) 確率論的な安全評価

データの不確実性は、「確率密度関数」(PDF)として定量化することができる。このPDFによって、図 2-7 に例として示された異なるパラメータ値の相対的な発生見込みがもたらされる。「測定されたデータ」と「GDF システムを表現するトータルシステム・モデルで使用するパラメータ値に割り当てられた PDF」との間のつながりは、非常に複雑なものとなる可能性がある。PDF は、測定値だけに基づいたものとすることができるが、より一般的には、正式な専門家の意見抽出を経て作成される。この意見抽出の過程では、測定値を補足するために適切な資格を伴う経験を積んだ専門家の様々な研究データに基づく判断が利用され、データ不足、不確実性あるいは測定値からのバイアスなどを考慮に入れることができる。こうした専門家の判断は、測定されたデータの解釈が、モデル化対象となる状況だけでなく、それがモデル化される方法とのかかわりにおいても実施されるようにする上で役立つことになる。

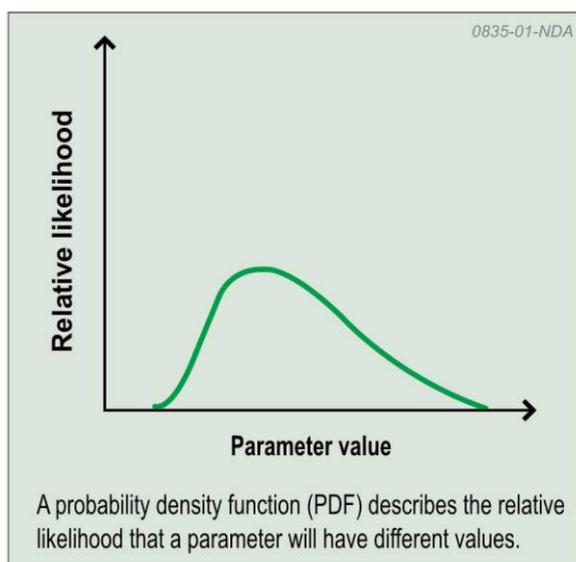


図 2-7 確率密度関数の模式図

不確実性を PDF として定量化することにより、確率論的な評価を、モンテカルロ・シミュレーション法を用いて行うことができる。こうした状況では、一つのコンピュータ・モデルが、異なるパラメータ値のグループを用いて、多くの回数にわたって実行される（こうした実行を「実現 (realisation)」と呼ぶ）。このそれぞれの実現において、パラメータの

値は、起こり得る値の範囲を示す PDF から無作為に選ばれる。この方法は、「確率論的安全評価」(PSA) アプローチとして知られている。これにより、起こり得る様々なパラメータ値が確実に、性能評価の内部で指定された範囲の中から考慮されることになる。PSA の結果の統計的な解析は、リスクなどの性能尺度が不確定なモデル・パラメータに対して備えている感度を調査するために使用することができる。

この PSA アプローチは、英国における現行規制ガイダンスに適合するものである。リスク期待値(それぞれの PSA の実現で算出されたリスクを平均することによって入手される)の計算は、リスク・ガイダンスレベルとの比較に使用することができる。同様にこれは、どのようなモデル構成要素が算出されたリスクにおいて支配的な役割を果たすのかを、またリスクがどのようなパラメータに対して高い感度を備えるのかを明示することにより、開発者/作業員に対してモデル及び研究作業がどのように展開されるべきかに関する情報を提示する目的でも、使用することができる。平均リスク値に対する信頼を高めるために十分な数の組み合わせに関する計算が実施されるようにするため、これらのモデルを何百回、何千回もにわたり実行することが必要となる可能性もある。コンピュータ・モデル化のニーズについては、次節において検討する。

RWMD は、期待値以外のリスク尺度も用いられる可能性があることを認識している。RWMD は、例えば、算出されたピーク・リスクの分布を示すその他の統計的な尺度や数字を提示することも、個々の実現からのピーク・リスクが鍵となる入力パラメータの値にどのように依存するのかを示す「散布図」を示すこともできる。ある特定のサイトに関する詳細情報が利用可能となった時点で、RWMD は最適な尺度を用いて、選択された尺度がなぜ合理的な選択の一つであるのかを明示することになる。RWMD はさらに、選択された尺度が重要なパラメータの値に対して備えている感度に関する情報を提示する。その目的は、RWMD のシステムにおいて安全性に影響を及ぼす重要な構成要素について理解するとともに、RWMD の研究を今後とも適切な方向に導くことにある。

2.6 一般的な条件での閉鎖後安全評価で採用されたアプローチ

今回の一般的な条件での段階においては、いずれかの候補地における地質学的及び水文地質学的な状況に関する情報は存在していない。これに加えて、建設される可能性のある施設の概念設計は、具体例として挙げられた地質学的状況にのみ基づくものとなっている。以下の項において RWMD が目指すのは、まだ特定されていないサイトを対象とした閉鎖後

安全評価の実施方法について、具体的例を挙げて説明することである。この評価は、定性的な記述と定量的な解析に基づくものであり、次の目的を伴う。

- ・ その他の不確実性が存在する状況において、性能尺度が当該サイト及び概念の高次元の特性に対して備えている感度について、具体的な説明を行うこと。及び
- ・ 処分可能性評価プロセスを通じて廃棄物発生者に対し、パッケージング面での助言の提供を継続するための定量的なベンチマークを提示すること。

RWMD は 2.6.1 において、ここで検討したシナリオについて簡略に記述する。2.6.2 では、基本シナリオの定量的な評価を行うために採用したアプローチについて解説する。また、2.6.3 において RWMD は、こうした結果及び評価モデルが、処分可能性評価プロセスの一環としてパッケージング面での助言を提供する上での継続的なベンチマークの一つとして使用される方法について、説明する。

2.6.1 評価において検討されたシナリオ

上記の 2.5.3 で述べたように、今回の一般的な条件での評価において RWMD は、検討対象となる基本シナリオとバリエーション・シナリオに関して様々な仮定を作成しなければならなかった。RWMD は、基本シナリオには地下水経路（すなわち、放射性核種が地下水への溶解とそれに伴う地表への移動によって将来の人々にリスクを生じさせる可能性のある経路）が含まれるものと仮定した。しかしこれも、一定タイプの地質学的状況ではこうした経路の形成は当該システムに予想される経時変化に含まれていない可能性があるため、一つの仮定でしかない。例えば、2.4.2 (3) で蒸発岩に関する具体例として記述した概念の場合、当該施設を通じた地下水の流動が有意なものになるとは考えられていない。

RWMD は、地下水経路に関する定量的な評価を、一般的な条件での地質学的状況及び概念に想定可能な特性の範囲を考慮することによって実施した。その際の基礎については、2.6.2 で記述した。

基本シナリオに GDF から発生し、地下水に溶解することなく地表に到達する気体を含めるべきかどうかは、きわめて不確実な、またサイト固有の問題であり、したがって RWMD は、この種のシナリオに関する具体例としてのリスク計算を検討作業に含めていない。GDF で発生する気体の影響に関する検討は、地質学的な状況に応じて、基本シナリオに含める必要がある場合と必要のない場合があろう。このため RWMD は、気体が及ぼし得る影響に

関して、さらにはある特定のサイトにおけるこうした影響への対処方法に関して RWMD が現在有している知識の概要を、定性的なやり方で示した。

RWMD はさらに、次に示す 2 件のバリエーション・シナリオを検討した。

- ・ 意図的でない人間侵入の影響。RWMDは、安全面での論拠と、一つの例としての人間侵入シナリオに関する定量分析とを示す。
- ・ 臨界につながる核分裂性物質の再配置及び蓄積が起こる可能性。ここでRWMDは、RWMDがこれが発生の見込みの低いシナリオであると判断した理由、さらには該当する事態が起こった場合でも、リスクへの影響の面で重要な懸念をもたらすことはないと判断した理由を説明するために、定性的な論拠を提示する。

2.6.2 基本シナリオに関する定量的な評価

RWMD は、サイト選定プログラムにおけるこうした一般的な条件での段階、すなわち検討対象とすべき具体的なサイトが特定されていない段階における主な不確実性が、GDF が配置されることになる天然媒体の様々な特性に関する知識が存在しないことによるものだということを認識している。自然環境は、異なった安全バリアの性能だけでなく現地の地下水条件に影響を及ぼす様々な条件を制御する。異なったシナリオが異なった環境で支配的なものとなる可能性があるが、RWMD は地下水経路が基本シナリオを形成するという仮定を採用した。この場合、一つの GDF から地表に放射性核種が戻る上での主要ルートは、地下水への溶解と地下水による移行を通じて形成されることになる。

RWMD は、Nirex が過去に英国で実施した幾つかの評価に基づき、地下水経路に関連して生じるリスクが何に依存しているのかについて、良好な理解を得ている。この種的评价是、リスクという性能尺度の計算に様々な異なる複雑さを備えたコンピュータ・モデルを利用するものであるが、リスクを制御する主要な要素に関する比較的単純な理解を明示することは、有益である。この作業は、セラフィールド近傍のサイトにおける ILW 向けの仮想 GDF を対象とした Nirex97 評価において実施された。この評価では、「洞察」モデルが開発されている。この洞察モデルは単純な「解析式」であり、より複雑な数値モデルの結果を近似的に再現することを示すことが可能で、したがって理解を高める上で役立つ。

特定の放射性核種に関する地下水経路に伴うピーク・リスク (R_p) を見積もる洞察モデルについては、Nirex97 評価の第 3 巻の第 8 章で記述されている。これは次のように要約することができる。

$$R_p \approx \frac{SrBING}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_g^2}}$$

ここで、

「I」は、放射性核種のインベントリである。

「N」は、人工システムから放出されるインベントリの比率である。この比率を左右するものとして、廃棄物容器の性能、廃棄物形態の性能、人工システムの化学的な挙動、人工システムを通じた地下水の流動、人工システムにおける放射性崩壊が挙げられる。

「G」は、地圏から放出されるインベントリの比率であり、これは総移動時間と、地圏で生じる収着に起因する遅延、さらには地圏における放射性崩壊に左右されることになる。

「B」は、生物圏ファクタである。このファクタは、生物圏における放射性核種の挙動、地圏における希釈量、そして湧出場所の面積に左右される。

「r」は、線量・リスク換算係数であり、 $0.06Sv^{-1}$ となる。

「 σ_s 」は、ソースターム分散時間である。これは人工システムにおける化学的な挙動と、人工システムを通じた地下水流動に左右される。

「 σ_g 」は、地圏分散時間である。これは、総移動時間、地圏における収着に起因する遅延、そして地圏における分散に左右される。及び

「S」は、比例定数である。この定数に約 0.4 の値を割り当てることにより、良好な近似が得られる。

分母における平方根の項（総分散時間を表す）は、ソースターム分散時間と地圏分散時間のいずれかが、総分散時間において支配的な役割を果たすことを意味しているものと見られる。

この理解を念頭に置いた上で RWMD は、この一般的な条件での段階において（現在のところ未知の）地質学的状況及び概念を RWMD のモデルにおいて、少数の高次元パラメータ（RWMD が重要なものとなる見込みが高いことを知っているもの）によって表現することを、さらにはこれらのパラメータの（一定範囲に収まる）値のグループが及ぼす影響について評価することを、選択した。これにより、地下水経路に関するリスクの一連の計算が定義されることになる。

広い意味において、RWMD が選んだ高次元パラメータは、次のものである。

- **q** : 比流量 (myr^{-1}) またはダルシー流速 (GDFの立地場所における未擾乱の母岩を通じたもの)。
- **T** : 地下水がGDFから地表に至るのに要する移動時間 (年)。
- **F** : GDFの上に位置するしており、またGDFを離れる汚染された地下水プルームが最終的に上昇して入り込み、混合される可能性のある岩石における地下水混合フラックス (m^3yr^{-1})。
- **A** : 汚染されたプルームが地表において放出される湧出域の面積 (m^2)。及び
- **C** : 廃棄物容器によって物理的な閉じ込めが維持される期間 (年)。これは、HLW地層処分概念の例で最も関連性の高いものである。さらに、主にキャニスタ自体によってもたらされる閉じ込めへの言及がなされるものの、緩衝材や廃棄物形態自体もその性能に寄与することを認識しておくべきである。

これらのパラメータは決定論的なものではない。不確実性に対処するために確率論的アプローチが用いられる計算で使用されることから、RWMD はこれらのパラメータに対し、不確実性の範囲を (サイト特性評価の後に残存している可能性のある不確実性に相当するものとして) 設定した。また閉じ込め期間 (C) は、ある程度までパッケージ間のばらつきを許容するものである。RWMD は、2.7.2 において、これらのパラメータをさらに詳細に定義する。

2.7 において、**q**、**T**、**F**、**A** と **C** の値のグループを対象に GoldSim ソフトウェアを使用して、地下水経路に伴うリスクに関する一連の確率論的計算について取り扱った。その他にも、これらの計算の実施に用いられるモデルには数多くのパラメータが存在し、これらにより、RWMD が現段階において変動させないことを選択した EBS、地圏及び生物圏における化学的及び物理的なプロセスが表現される。その代わりに RWMD は、これらに対して決定論的な値を割り当てるか、不確実性を表す PDF を (RWMD の研究プログラムからの情報を、または Nirex や海外のその他の廃棄物管理組織が実施した最近の評価で得られた情報を用いて) 割り当てた。これにより、当該パラメータに関する一つの固定されたデータベースを得ることが可能となり、RWMD はそれに基づいて **q**、**T**、**F**、**A** 及び **C** の値が変動した場合の感度調査を実施する。このデータセットを構成するパラメータに関するデータは、放射性核種挙動状況報告書において正当化されている。最後に RWMD は、RWMD のモデルにおいて GDF の様々な部分の寸法を定義するために、一つの仮想的な GDF レイアウトを設定することになった。そのために RWMD は、高強度岩に関して 2.4.2 (1) で取り扱ったレイアウトを採用した。

q、T、F、A 及び C パラメータと、プロセスを表現するその他のパラメータは、不確実性を伴うものである。しかし RWMD はまだいずれのサイト及び概念も特定していないため、q、T、F、A 及び C パラメータの適切な値に関してきわめて大きな不確実性が存在するのは明白である。こうした不確実性は、RWMD がサイトを特定し、適切な処分概念を決定し、さらにサイト特性評価プログラムを開始すれば、大幅に低減されることになる。したがって RWMD は、定量的な解析との関連において、現段階でリスクなどの性能尺度がこれらのパラメータに対して備える感度を調査することが適切であると判断した。この方法を採用することで計算の結果により、RWMD が候補地及び概念を特定してゆく際の検討作業に必要な情報が提供されるだけでなく、サイト調査で対処する必要のあるモデル情報に欠落がある部分を特定することができる。

RWMD がサイト及び概念を特定し、上述したような不確実性が低減された時点で、将来の閉鎖後安全評価 (PCSA) における感度計算の焦点は、その他の不確実性へと移ることになる。しかし現在のところ、現時点で q、T、F、A 及び C に伴う大きな不確実性を考慮した場合、これらの不確実性について多くを語る事が意味のあることだとは思われない。

RWMD は、q、T、F、A 及び C のために一連の値、すなわち一つの中央値及び関連する確率分布を採用することにより、RWMD にとっての「レファレンスケース」を設定した（この点については 2.7.2 においてさらに詳しく取り扱った）。このレファレンスケースを、処分可能性評価プロセスの一環としてパッケージングに関する助言を提供するための将来のベンチマークとして使用する予定である（2.6.3 を参照）。

2.6.3 得られた結果は処分可能性評価プロセスでどのように適用されるのか

廃棄物発生者からのパッケージング提案に関する処分可能性評価プロセスの一環として（これは歴史的に ILW 廃棄物ストリームを対象として実施されてきた）、閉鎖後安全性の評価が実施される。ILW 廃棄物ストリームの数百種類に及び、その全てが異なったパッケージング提案を伴う。これらの廃棄物ストリームに関して、単一の処分概念と両立するかどうかの評価が実施される。現在のところ、Nirex GPA で行われた地下水経路に伴うリスクに関するレファレンスケース計算が、これらの評価のベンチマークの一つとして使用されている。インベントリに含まれる関連 ILW/LLW 廃棄物ストリームの処分に関するこの計算は、英国の代表的な地質学的状況を対象とした放射線学的リスク・ガイダンスレベルを満たすものである。

処分可能性評価プロセスの一環として個別の廃棄物ストリームの評価を行う際に RWMD は、地下水経路の観点から、主として次に挙げる 2 つの問題に関心を抱いている。

- ・ この特定の廃棄物ストリームは、鍵となる放射性核種のインベントリに関して、平均的なパッケージを大幅に超過するのか？ そうであれば、「容量」の問題が生じる可能性がある—このことは、この廃棄物ストリームが含まれる場合には、リスク・ガイダンスレベルの超過が起こる可能性があることを、意味している。今回の一般的な条件での段階の場合、このことは、サイト選定要件をより厳格なものとする必要があることを示している。この点についての評価を行うために、インベントリ・スクリーニング作業が実施される。
- ・ この廃棄物ストリームに、RWMDが安全性を確保するために依拠している何らかの昨日に悪影響を及ぼし得る構成要素は存在するのか？ 良い例の一つとして、GDF内の化学条件を変化させ、GDF全体を通じて特定の放射性核種の溶解度及び収着に悪影響を及ぼす可能性のある大きな有機物質インベントリの存在が挙げられる。こうした効果は、特定の廃棄物ストリームにではなく、全体としてのGDFに影響を及ぼすことのできるものであり、したがって評価を実施する必要がある。この評価では、専門家の判断が、必要に応じてレファレンスケース・モデルを用いた計算によって補足される形で、またここで問題となっている潜在的な損害を考慮に入れるために適切な調整が施された上で、使用される。

今回の一般的な条件での段階では、対象となるサイトが明らかになっていないため、GDF性能に関して大きな不確実性が存在している。RWMD は、一つのベンチマークとしてのリスク・ガイダンスレベルにほぼ適合するレファレンスケースを使用することが適切であると判断した。その目的は、処分可能性評価プロセスに関して行われた計算によって、懸念対象となる可能性のあるパッケージング提案への注目が集まるようにすることに、すなわちこのプロセスが正しいレベルで適用されるようにすることにある。RWMD が「過度にすぐれた」地圏性能を想定していた場合、一般的な廃棄物パッケージ仕様で定義された基準及び仕様を満たさないパッケージングを、したがって後日、RWMD が最終的に選定したサイトが比較的好ましくない特性を備えていた場合には手を加える必要が生じるパッケージングを、許容するリスクを冒すことになる。その一方で、RWMD が地圏の性能を過度に低く見積もった場合、処分可能性評価プロセスにおいて、廃棄物パッケージングに関して実際に必要とされるよりも厳しく、コストのかかる要件が設定される可能性が生じる。例えば GDF が、地下水移行が基本シナリオの一部を構成するとは予想されない地質学的状況（例えば岩塩環境など）に建設されことになった場合、基本シナリオに従って現時点で与えられているパッケージング面での助言は保守的なものとなる。

一般的な条件での閉鎖後安全評価（PCSA）で算出されたピーク・リスクの「正確な」値は、特に今回のような一般的な条件の段階において、とくに有意義なものとはなり得ない。これは、これらの値が、いずれかのサイト及び概念が特定されるまで明らかにすることのできない数値を表現するパラメータに依存しているためである。しかし RWMD は、算出されるピーク・リスクに「相対的」に寄与するものに関する有益な情報を入手することができる。これにより RWMD は、廃棄物の様々な構成成分のいずれが、全体的なリスクに最も大きく寄与するのかに関する理解を、さらには当該インベントリに含まれるいずれの放射性核種が全体的なリスクに最も大きく寄与するのかに関する理解を得る。この理解によって RWMD は、処分可能性評価プロセスによるパッケージング提案を評価する際に「相対的な」問題に確実に対処することになる。

また RWMD は、必要に応じて、処分可能性評価プロセスの一環として追加計算を実施するために、閉鎖後安全評価（PCSA）からの GoldSim モデルを使用することができる。RWMD がどの時点でこれを実行できるかを示す一つの例として、パッケージング提案に RWMD のレファレンスケースによって全体的なリスクに対して高い「相対的」寄与を行うことが示された、放射性核種の化学的な性質に影響を及ぼす可能性のある物質の使用が含まれた時点を挙げることができよう。その上で RWMD は、当該放射性核種に関する溶解度及び/または収着に関して変更するとともに、リスクに生じる効果が受け入れ可能なものであるかどうか明らかにするために、モデルを再実行することができる。

閉鎖後評価では、気体の生成、熱の発生及び化学的な有毒種によってもたらされる危険ならびに人間侵入の生じやすさが及ぼす可能性のある影響を検討するために、専門家の判断と計算を利用することになる。

今回の一般的な条件での閉鎖後安全評価（PCSA）ではレファレンスケースを、GPA で採用されたものとの一貫性を維持する形で定義していること、またこの両者が、地質バリア性能について設定された要件の面でかなり似通ったものであるため、一般的な条件での PCSA は同様の方法で ILW の処分可能性評価にとってのベンチマークも提供することができる。こうした以前に発表された評価との間で整合性が確保されることは、与えられたパッケージング面での助言だけでなく、以前に発給された LoC がその有効性を維持する上で必要である。

一般的な条件での閉鎖後安全評価（PCSA）において算出されたリスクは、GPA の場合のように ILW と LLW だけではなく、処分される可能性のあるその他の廃棄物とのかかわ

りにおいて、評価される。したがって一般的な条件での PCSA のレファレンスケースは、ILW に関するプロセスと類似した方法によって、HLW、SF 及びその他の一部の物質に関する処分可能性評価を実行するためのベンチマークの一つとして使用することもできる。しかし、こうしたその他の物質に関する評価は、その性格の面でいくぶん異なったものである可能性がある。ILW に関して RWMD は、多くの異なった廃棄物ストリームに関する多くの異なったパッケージング提案の評価を一つの共通概念に照らして行っており、そのそれぞれが共通概念と両立する理由、あるいは両立しない理由を明らかにすることを目指している。しかしその他の一部の物質に関しては、廃棄物量の面では大きくとも比較的少数の廃棄物ストリームしか存在せず、このため個々に最適化された概念を個々に開発することが正当化される可能性がある。

2.7 地下水経路

2.7 では、地下水への溶解とそれに伴う移行という形で、放射性核種が将来の人々へのリスクをもたらす可能性のあるメカニズムである地下水経路について、定性的な記述と定量的な解析を提示する。定量的な解析では、サイトの様々な特性と建設に使用される可能性のある GDF 概念に関する一定範囲の仮定について検討する。RWMD はこれらの計算結果を用いて、様々なサイト及び概念の組み合わせがどのように機能する可能性があるのかを具体的に示すために幾つかの高次元の問題について説明するほか、これらの計算結果と異なる地質環境との結びつきを示す。

ここでは、2 件の地層処分概念事例を対象として、地下水経路から生じるリスクに関する一連の計算について解説する。

- ・ ドラムまたはコンクリート・ボックスに収納され、ボールドにおいてセメント・ベースの埋め戻し材を用いて処分される ILW、LLW 及び DNLEU（ここでは、「ILW 地層処分概念事例」と呼ぶ）。
- ・ 高健全性容器（銅製または炭素鋼製のもの）に収納され、周囲にベントナイト緩衝材が設置される形で処分される HLW、SF、HEU 及び Pu（「HLW 地層処分概念事例」と呼ぶ）。

RWMD は、この 2 件の処分概念が、1 ヲ所のサイトに設置された単一の GDF のそれぞれ異なった区域に実現されるものと想定した。

具体例となる評価では、インベントリに含まれる放射能毒性を備えた種についてのみ検討する。ただし GDF 開発の後の段階になれば、化学毒性を備えた種の地下水移行についても考察する必要があると思われる。

2.7.1 では、上記タイプの処分概念における EBS、地圏及び生物圏の経時変化について定性的に検討する。2.7.2 では、今回の評価における計算方法、地質学的状況及び概念を提示するためのパラメータの利用方法、そしてレファレンスケースの選択方法について検討する。2.7.3 では、レファレンスケースに関して得られた結果を示す。2.7.4 では、現在の一般的な条件での段階で RWMD がこれまでに実施した解析を、このプログラムの将来の段階においてどの程度まで変更し、開発する必要がある可能性があるのかについて説明する。2.7.5 では、地下水経路についてのまとめを示す。

2.7.1 地下水経路に関する記述

RWMD は既に、一般的な条件での閉鎖後安全評価 (PCSA) で使用される概念モデルと数学モデルを開発している。これらの概念モデルは、処分システムに影響を及ぼす様々なプロセスに関して利用可能なデータと理解を反映したものである。これらのモデルは、当該システムの様々な構成要素を表現するために開発されたものである。このシステムには、次のものが含まれる。

- ・ 人工システムまたはニアフィールド：これは、掘削されたボルトとそこに含まれるもの（廃棄物質、廃棄物パッケージング材、埋め戻し材及び構造材など）、さらには立坑及びアクセス坑道で構成される。
- ・ 地圏またはファーフィールド：GDFがその内部に建設される岩石と、それらを取り囲み、地上にまで至る岩石層で構成される。
- ・ 生物圏：人間にとって到達可能な環境で構成される。この中には、土壌及び地表の岩石、地表水塊、海洋及び大気などが含まれる。

GoldSim にインストールされたトータルシステム・モデルは、図 2-8 に示すように、人工システム、地圏及び生物圏を（ある程度まで詳細なレベルで）表現するサブモデルを備えているほか、システム全体を通じた放射性核種の移動を計算する。地圏を表す 2 件のサブモデルは、地圏の一部（この部分で移動時間 (T) の大半が生じる）を効果的に表現する。一つのサイトには、様々に異なる岩型で構成される一定数の層が存在することが見込

まれる。それらの中には、総移動時間に多大な影響を及ぼす層もあれば、場合によっては汚染されていない地下水との混合が起こり得る層もある。RWMD は今回の一般的な条件の段階において、移動時間の大半がどこで生じるか、そして混合が起きるのはどこかについて突き詰めた設定は行っていない。RWMD は、地表への移動時間の大半が、還元条件が適用可能な下部区画（母岩を含む）と酸化条件が適用可能な上部区画とに等分されるものと仮定した。

以下の各項において、人工システム、地圏及び生物圏について、順番に説明する。

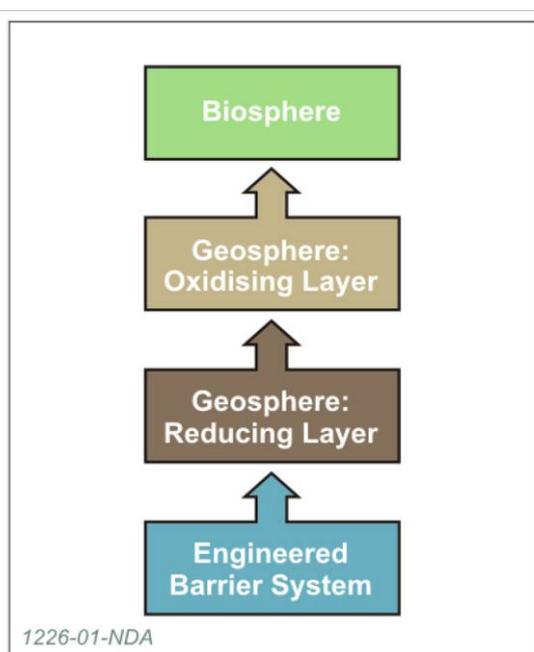


図 2-8 GoldSim トータルシステム・モデルの模式図

(1) 人工バリアシステム

RWMD は、EBS が、処分されたインベントリを閉じ込めることにより、またその後には廃棄物パッケージから汚染物質が放出された場合にはその移行を遅延させることにより、多重バリアシステムにおいて重要な役割を果たすことを期待している。EBS は、GDF 内の物理及び化学条件を通じてパッケージの劣化速度を制限することにより、廃棄物パッケージの保護において主要な役割を果たす（『パッケージ経時変化状況報告書』を参照）。廃棄物パッケージが破損してインベントリの放出が開始された後には、EBS によって汚染物質の移行に対する一連のバリアが提供される（『ニアフィールド経時変化状況報告書』を参照）。

この種バリアとしては、低透水性層または緩衝材によって提供される物理的バリア、放射性核種の溶解度を制限（及び/または放射性核種の収着を促進）する化学バリア、あるいはこれらの機能を組み合わせたバリアが挙げられる（『放射性核種挙動状況報告書』を参照）。

GDF の設計では、処分施設において適切に分離された区画への ILW、LLW 及び DNLEU の処分と、HLW、SF、Pu 及び HEU の処分とが取り扱われる。この種の分離された処分区画では、それぞれ異なる人工バリアシステム及び/または異なる廃棄物定置方法が採用される可能性がある。また様々な処分モジュール間で相互作用が生じる可能性があり、この種の相互作用が場合によっては処分システムの性能に影響を及ぼしかねない。例えば、セメント質の処分モジュールから出たアルカリ性の流体が、隣接する処分モジュール内のベントナイトの性能に影響を及ぼすことが考えられる。こうした相互作用はサイト固有かつ処分概念固有のものである。このため設計では、様々な人工バリアシステムが所期の機能を果たすだけでなく、異なったシステムの間はその性能の許容外の低下を招く可能性がある相互作用を発生させないようにしなければならない。

RWMD は、様々な異なる地質環境における様々な処分モジュールにおいて実現することが適切である可能性のある様々な EBS 設計について調査するために、一連のオプション研究を行った。RWMD は、3 件の実例となる地質学的状況を対象とした EBS 設計（2.4 を参照のこと）の基礎を、類似した地質環境及び廃棄物タイプを対象として他の機関が開発した処分概念に置いている。具体的な例となる地質学的状況に想定された設計の詳細は、『GDF 設計報告書』に記載されている。

本項では、ILW 及び HLW に関する地層処分概念例によって示されるように、EBS の経時変化と、それが廃棄物の閉じ込めに対して及ぼす効果について検討する。

ILW地層処分概念事例

RWMD が具体例となる計算に利用することを選択した LLW、ILW 及び DNLEU に関する処分概念によって、物理的な閉じこめが提供される。この閉じこめは、廃棄物自体に備わっている性質（大部分の廃棄物は固体であり、セメント・グラウトなどの安定したマトリクス内に封入されている）と、そのパッケージング（廃棄物は鋼鉄製またはコンクリート製の容器に収納された上で、定置孔で高い pH 環境を実現するよう設計されたセメント質埋め戻し材に取り囲まれる）の組み合わせによって実現する。

この地層処分概念事例が ILW の処分を目的に設計されたもので、DNLEU の処分は対象

となっていないことには注意する必要がある。DNLEU はまだ廃棄物として取り扱われていないため、RWMD は現時点では DNLEU が ILW とほぼ同じ概念を用いて処分されるという仮定を立てている。DNLEU が廃棄物と見なされることが決定した場合、RWMD は特に DNLEU の処分のために最適化された概念を開発する必要がある。そしてその概念はここで示した概念例とは著しく異なったものとなる可能性もある。

この概念において RWMD は、パッケージに対し、閉鎖後期間に至るまで処分施設環境において物理的な健全性を維持できることを要求している。しかしこの要件は、絶対的な物理的閉じ込めを求めるものではなく、多くのパッケージには、廃棄物の劣化（腐食または微生物プロセスによるもの）に伴って気体が発生した場合に、それを逃がすためのベント（通気孔）が組み込まれている。図 2-9 に、シーリング後及び閉鎖後の期間に人工システムに予想される経時変化を、模式的に示した。

GDF の操業段階では、ボルトを埋め戻し、シーリングする決定が下される時点まで、廃棄物容器は乾燥した状態に維持される。しかし RWMD は、ボルトが閉鎖された後は、GDF を取り囲む岩石から地下水がボルト内に浸出し始めるものと仮定している。地下水が施設内に完全に入り込み、埋め戻し材を飽和させるまでには、一定の時間がかかることになろう。この「再飽和時間」は数年程度と考えられているが、母岩の特性によってはこれよりも著しく長くなる可能性もある。この期間中に、比較的短寿命の放射性核種では大幅な崩壊が進む一方で、地下水が（通り抜けるのではなく）GDF に流動してくる。RWMD は、廃棄物形態とそれを取り囲む容器が、地下水中の廃棄物と放射性核種を隔てる効果的なバリアになるものと予想している。気体の蓄積と容器内部で生じる可能性のある圧力上昇を防ぐために、多くの容器にベントが備わっている。しかしそれでも、廃棄物をグラウト固体にするための調整及び固定化の性質から、ベントを通じた放射性核種の放出は長期間にわたって大幅に制限される。しかしトリチウム、メタンに分類された炭素-14、二酸化炭素に分類された炭素-14、さらにはラドンなどの放射性気体のオフガス作用については、さらに考察を重ねる必要があると思われる。

ボルトが飽和した後、地下水はボルトを通じてゆっくりと移動する。時の経過とともに廃棄物容器と廃棄物形態がゆっくりと劣化するにつれ、廃棄物から外に出た放射性核種は最終的に地下水と接触するに至り、一部の放射性核種は水に溶解し、地下水に伴って人工システムから外へと移行する。幾つかの研究によって、飽和後の埋め戻し材で生じるアルカリ条件により、処分インベントリ内の放射性核種の多くの溶解度が著しく制限され

ること、また埋め戻し材自体によっても放射性核種の吸着を促進する大きな表面積を提供することが示されている。しかし地下水中に溶解した放射性核種の移行は、GDFに関連した放射線量が生じる可能性のある主要な経路である。

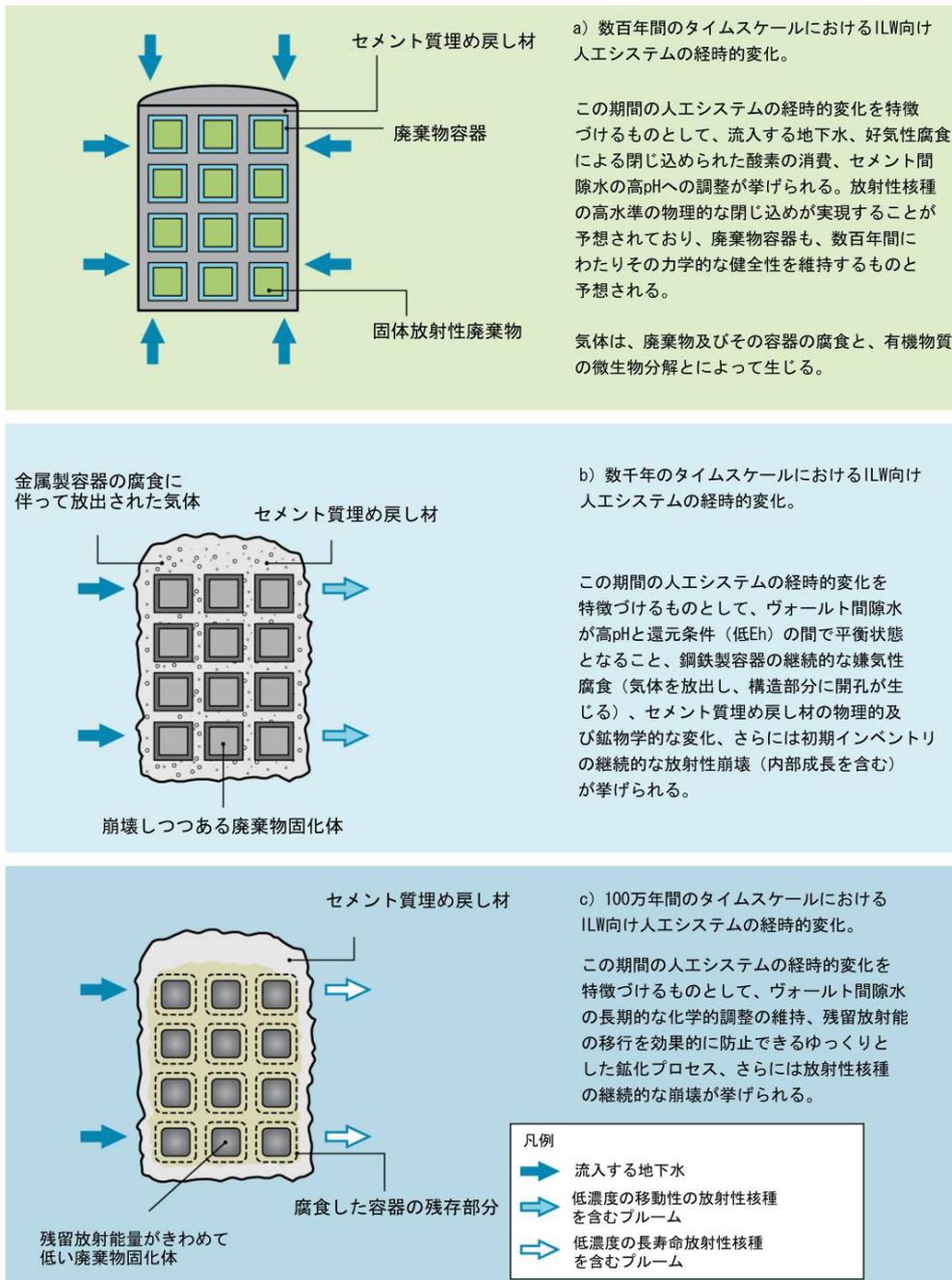


図 2-9 ILW 人工システムに予想される経時変化の模式的な概要

HLW地層処分概念事例

HLW、SF、HEU 及び Pu の処分に利用するために RWMD が選択した処分概念は、割れ目を伴う硬岩内に SF を処分するスウェーデンの KBS-3V 概念である。この種の概念の場合、物理的な閉じ込めは、固体として廃棄物の性質、高健全性容器（スウェーデンの概念では高水準の強度をもたらすために鋳鉄インサートを備えた銅製容器が採用されている）の利用、さらには容器を取り囲むベントナイト緩衝材によって提供される。図 2-10 に、この概念を模式的に示した。

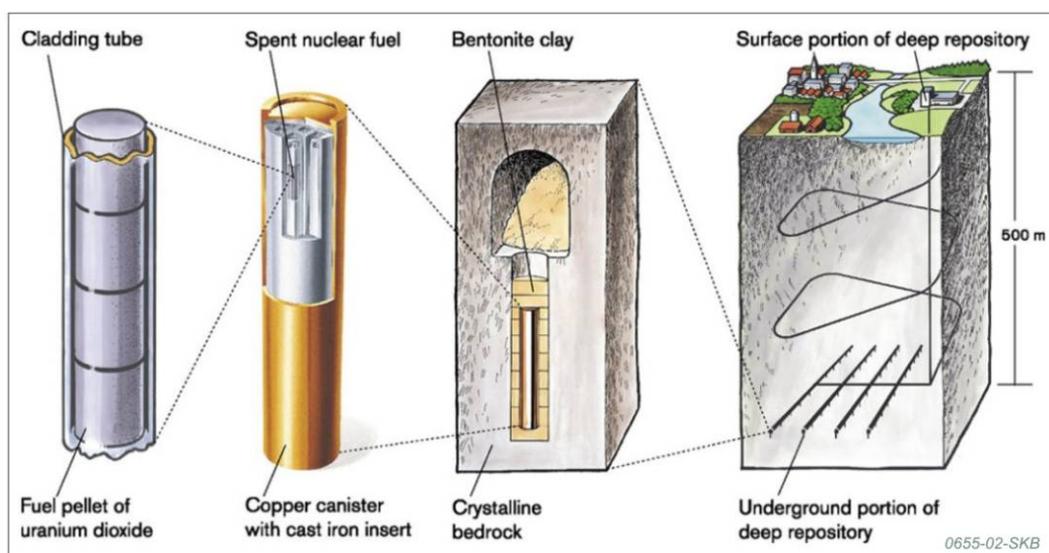


図 2-10 SF 処分に使用される KBS-3V 概念

HLW に含まれる放射性核種は、ガラス固化体中に結合されている。このガラスは、処分施設の人工部分の化学環境においてきわめて浸出抵抗が強い。放射性核種の放出は、ガラスがゆっくりと溶解する場合にのみ可能になる。同様に SF 内では、結晶質マトリクスに分布している核分裂生成物の多くの放出が実現するのは、燃料が水によるゆっくりとした浸出を受ける場合のみである。しかし、一部の放射性核種の移動度は比較的高く、燃料の表面へと移行する可能性があり、そこで水と接触した場合には容易に溶解することになる。

スウェーデンの概念では、肉厚 50mm の銅製容器が用いられている（蓋の溶接によってシーリングされる）。この容器はきわめて長期間にわたり、腐食、地震、そして地下深部に存在する地下水の高い水圧に耐えられるよう設計されている。この銅製容器の周囲には、厚さ 0.5m のベントナイト層が設置されることになる。ベントナイトは母岩との間の力学的

な緩衝材として機能し、小規模の岩石移動から容器を保護する。最終的に容器が破損した場合であっても、ベントナイトはその低い透水性によって、さらにはその表面への収着を通じて、溶解した放射性核種の放出を遅延させる。

銅製容器は、数十万年間にわたって水と廃棄物との接触を防止するものと予想される。この期間に、多くの放射性核種の大幅な崩壊が生じることになる。スウェーデンのプログラムでは既に容器試験が行われており、適切にシーリングされ、GDFの人工環境で周囲のベントナイトによって保護される銅製容器が絶対的な物理的閉じ込めをもたらすことから、放射性物質の周辺環境への漏出は数十万年間にわたって防止されるものと見込まれている。

RWMDは、設計開発プロセスの一環として、このスウェーデンの概念が英国内の様々な母岩環境にとって適切なものであるかについての評価を行った。その結果、一部の地質環境の場合には、容器及び緩衝材に代替設計を採用する方が妥当な可能性もあると考えられている。特にHLW及びSF概念向けの容器材料については、サイトの様々な特性が明らかになるまで選択はなされないことになっている。この理由から、RWMDは具体例となる計算において、スウェーデンの概念のように銅製容器を指定せず、材料を定義せずに一定範囲の容器寿命について検討する方法を採用した。RWMDは長寿命容器、比較的短寿命の容器、そしてオーバーパックがないケースについて、それぞれ検討を行った。

このKBS-3V概念は、HLW、PuまたはHEUの処分ではなく、SFの処分を目的として設計されたものであることには、注意する必要がある。このためこの概念では、これらの物質の処分に向けた最適化は必ずしも実施されていない。RWMDは、実際に選定された地質環境にとって適切かつ最適化された概念を開発する必要がある。そしてHLW向け概念、またPu及びHEUを廃棄物とすることが決定された場合にはそれらの処分概念は、上記の例とは異なったものとなる可能性がある。

その他の工学的特徴

人工バリアシステムと同様に、ILWとHLWの地層処分概念事例にも、地上アクセス坑道と立坑、廃棄物の運搬及び換気のための地下坑道、さらにはボルトへのアクセス・ポイントが含まれる。施設の操業期間が終了した時点で、これらにシーリングを施す必要がある。シーリングは掘削された坑道内での流体の移動を防ぐ上で役立つものであり、また母岩やその他の物質との相容性があるだけでなく、母岩とそれと類似した低い透水性を実現すべきである。シール材を力学的に保護する目的で、セメント・ベースのコンクリ

ートが利用されることが見込まれている。この種のシーリングは、物理的な閉じ込めの役割を果たせるよう、膨潤性粘土などの天然物質で形成される。

(2) 地圏

地圏とは、GDFを取り囲み、地上にまで至る岩石層として定義される。地圏は、多重バリア処分システムを構成するバリアの一つであり、GDFに処分された廃棄物を地上環境から長期間隔離する上で重要な役割を果たす。またこの隔離機能によって、GDFへの意図的ではない人間侵入、あるいは自然事象または人為的事象によってGDFの破壊が起こる見込みはきわめて低くなる。さらに地圏は、ゆっくりと予測可能な形で進展する水文地質学的及び地球化学的環境を提供することにより、EBSを保護する。RWMDは、2008年の英国政府白書(Cm7386)に列記された初期スクリーニング基準を満たすいかなる候補地においても、将来の地質学的な経時変化の記述が可能であると考えている。

RWMDのセーフティケースで考察するタイムスケールにおいて、少量の放射性核種がGDFから周囲の岩石へと放出されるのは避けられない。地下水が地下深部から地表へと放射性核種を移行するうちにさらなる放射性崩壊が生じるため、地上環境に入り込む放射性核種の濃度はさらに低減することになる。ニアフィールドから放出される放射性核種の大半は、地圏内部で崩壊するものと予想されている。また次に挙げる要因により、地上環境に入り込む放射性核種の濃度は一層低減されることになる。

- ・ 一部の放射性核種の岩石表面への収着プロセスによる遅延。
- ・ 放射性核種が岩石内にある行き止まりの間隙に入るプロセスによる遅延。
- ・ 水が地下深部から移行するにつれて発生する、放射性核種の拡散または分散。
- ・ 施設の上に位置する岩石内で処分施設から流れ出る水がその他の水と混合されることにより起こる稀釈。

地質環境が異なれば、上記の様々なプロセスの相対的な重要性も異なるものとなる。さらには、一つのサイトに存在する異なる岩型の層が、地上への総移動時間に様々な異なる度合いでかかわることが見込まれるほか、これらのプロセスが様々な岩石層においてそれぞれ異なる重要性を備えることになると見込まれる。こうしたプロセスの一部は相互に関係するものであり、例えば、分散量は移動時間に依存する。きわめて長寿命の放射性核

種の場合でも移動時間が長くなると地下水経路に関連するピーク・リスクが低下するが、その原因は、移動時間が長くなったためというよりは、むしろ分散量が拡大することにある。

地質環境が放射性核種を遅延させ、閉じ込めるプロセスについては、『放射性核種の挙動状況報告書』で検討されている。具体例となる地質環境にみられる地下水流動様式のタイプ（2.3.3を参照）については、『地圏状況報告書』で詳細に検討されている。

GDFが設置されるのが地下深部であることは、周囲の地質学的状況がきわめて長期にわたって安定していると見込まれることを意味する。同じ理由で、GDFは短期的な気候変動などの外的影響の効果からも隔離されると予想される。しかし地圏は経時変化を引き起こす。短期的にみると（閉鎖後の最初の数百年間）、地圏の経時変化はほとんどGDF掘削孔の存在に伴って生じる様々な影響によって決定付けられることになる可能性がある。GDFが存在しない場合であっても、地圏自体の挙動は不変ではなく、様々な自然プロセスに応じて経時変化を起こすものとRWMDは考えている。ただし今後数万年間にわたり、大規模な地質学的変化が発生することは予想されていない。長期的に見ると、気候変動と地形の経時変化のプロセスによって、地圏上部に著しい変化が生じる可能性があるものと予想される。地圏の様々な水文地質学的特性（透水係数や間隙率など）も、時の経過とともに、岩盤における荷重及び除荷作用に伴う応力変化、小規模な地震事象、溶解及び沈殿事象などに関連する影響を受け、それによって地下水流動に変化が生じることが考えられる。

大スケールの地殻の運動は一般的にゆっくりした速度で進行することから、発生するとしても、その時期はきわめて遠い将来（数百万年後）になるとRWMDは予想している。したがって、基本シナリオには含まれていない。また大規模な地震事象も、評価対象期間中に英国内で発生することが見込まれていないため、この種の事象も基本シナリオから除外した。万一、地震が発生することがあっても、地震活動が観察される区域はサイト選定プログラムの第2段階で英国地質調査所が実施する初期スクリーニングによって除外されるものと見込まれている。

上記の効果は全て、水文地質学的な特性に変化をもたらす可能性があるため、処分施設を通過する地下水の流動に対し、さらにはその流動に伴って地下水中に溶解した放射性核種が人工システムから生物圏へと運び出されるのに要する時間に対し、影響を及ぼす可能性がある。RWMDは、詳細なサイト固有の評価において、様々な水文地質学的特性の将来における変化を明示的に表示することになっている。

Nirex GPA では、地圏内での溶質移行では移流が支配的なものと想定されている。しかし RWMD は、2.3.3 で説明した環境例の全てにこれが当てはまるわけではないと予測している。もし立候補したサイトの地圏における溶質移行が拡散支配されていることが明らかになった場合、RWMD はこのアプローチを修正し、現在想定している移流移行モデルではなく拡散の表示を組み込むことになる。

RWMD は、サイト固有の水文地質学的及び水理化学的データが入手され、サイト固有の GDF 設計が実現した後で、この情報を利用して当該サイトにおける地圏及び EBS の様々な特性の現実的な理解を構築するつもりである。そしてこれが、RWMD のモデル化の基礎を形成することになる。今回の一般的な条件の段階で RWMD が利用する単純化されたアプローチについては、2.7.2 (1) で説明した。

(3) 生物圏

RWMD は生物圏を地上及び浅地中環境として定義している。また RWMD は生物圏を放射性核種の放出に対するバリアとは考えていない。むしろ生物圏は、この種の放出の受容体である。また生物圏は、GDF からの放出が実現した場合にそれによって生じ得る影響を評価するための「測定装置」として機能するだけでなく、被ばく経路が決定される際にそれが果たす役割からみて、それ自体が処分システムの重要な構成要素の一つである。

RWMD が通常検討する生物圏の主な構成要素は、次のものである。

- ・ 地上の淡水（小川、河川及び湖）。
- ・ 地表水の集水域。この中には、基盤岩の上部、土壌、堆積層、植物及び動物が含まれる。
- ・ 河口域。この中には、潮汐水、植生の存在しない堆積層と植生の存在する堆積層、そして塩性湿地が含まれる。
- ・ 海洋環境。この中には、海岸地帯、沿岸地域及び沖合地域とそれらの堆積層が含まれる。及び
- ・ 大気。

地質環境が異なれば生物圏と湧出特性も異なる。例えば、おそらく断層との関連できわめて局所的な部分で湧出が生じると予想される環境もあれば、当該湧出域内での湧出がはるかに拡散して生じるだけでなく、著しい気候変動が存在しない場合でも、当該湧出域が

時の経過に伴って変動する環境も存在する。また環境が異なれば、そこで行われる農業のタイプも異なってくる。RWMDは、一部の地質環境では井戸が重要になるものの、別の地質環境では、そもそも井戸の存在の支えとなる「帯水層」が存在しない場合もあると考えている。

生物圏に予想される経時変化は気候変動と地形の変化を包含するものであり、その中には海水位、川の流れ、地表水塊の変化などが含まれる。気候や地表の地形など、生物圏の特徴の多くは、地下水流動場の境界条件を形成している。このため、生物圏の経時変化が地下水の流動に、さらには地下水経路を通じた放射性核種の移行に、直接的な影響を及ぼすことも考えられる。

長いタイムスケールを考慮する必要のあることから、将来の生物圏がどのようなものになるのか、そして時の経過とともにそれがどのような経時変化を起こすのかに関する予測を行うことはできない、と考えられている。利用可能な最良の科学的予想によれば、英国の大半では今後数十万年にわたって氷河のない状態が維持され、沿岸部を除く地形の経時変化はきわめてゆっくりと進むことが予測されている。

実際のサイトを対象とする性能評価を展開する将来の段階では、取り扱われるサイトにもよるが、地圏と生物圏の両方に影響を及ぼす氷河作用などの大規模な気候変動によって生じ得る効果を考慮するバリエーション・シナリオを組み込む必要が生じる可能性もある。定量的なモデル化の裏づけが必要か、定性的な論拠の方が適切かについては、この種の事象の発生が予想される時期（すなわち、RWMDが自分たちのモデル化作業に信頼がおけると考えるタイムスケールにおいて生じる見込みが高いかどうか）に応じて決まることになる。

またこれ以外に不確実性の存在する分野として、GDFから放出される放射線量を受ける人間が環境とどのような相互作用を起こす可能性があるかというものが挙げられる。RWMDの一般的な条件での「操業環境安全評価」(OESA)における現況評価では、「レファレンス個人」を、「現時点で観察される様々な活動に基づき、最も高い線量当量を受けることが予想される集団の中の人々を代表する個人」として定義している。このレファレンス個人は、許可期間（必要に応じて人間活動のモニタリング及び管理が可能な期間）全体を通じて、考慮に入れられる。

しかし、制度的管理が既に終了している許可期間後の状況に関する評価では、いかなる数または方法による地表環境の進展ならびに地表環境と人間との相互作用も可能であると、

RWMD は考えている。RWMD は、バリエーション・シナリオ（GDF への人間の意図的ではない侵入を取り扱うシナリオなど）の開発及び利用によって、この種の不確実性の一部を処理している。また RWMD は基本シナリオにおいて、一定数の潜在的被ばくグループ (PEG) を考慮に入れることにより、生物圏の経時変化に関する不確実性を取り扱っている。さらに RWMD は、特定の生活様式または活動を通じて生じる可能性のある線量またはリスクについて具体的に説明するために、PEG のために様式化された挙動及び環境を検討する。RWMD は国際勧告に従い、一連の「レファレンス生物圏」に基づいて PEG を定義している。このレファレンス生物圏はそれぞれ、代替概念モデルの一つと考えることができる。またこの方法は、GRA に示されている勧告とも整合している。『生物圏状況報告書』では人間以外の生物相の影響が考慮されているが、今回の一般的な条件での閉鎖後安全評価 (PCSA) ではこの問題は取り扱っていない。

一般に RWMD は、PEG を選ぶ際に、一定範囲の潜在的な被ばく経路がカバーされ、関連する習慣が検討対象となっている地質環境と整合するようにしている。RWMD が考慮する潜在的な被ばく経路としては、水の飲用、収穫物の摂取、動物製品及び魚類の摂取、粉塵の吸引、直接的な外部照射などが挙げられる。評価で利用する際には、潜在的な被ばく経路の範囲及び時の経過に対応したそのバリエーションを表示するために複数の PEG を定義することが適切であろう。RWMD は、GDF サイトについての知識が増加するにつれて RWMD の PEG の定義を、より高度な解析（可能ならば集水域スケールのモデル化を含むもの）を用いて補強してゆくつもりである。

現在の具体的なサイトが決まっていない一般的な条件での開発段階では、生物圏に関する詳細な情報を得ることはできない。安全評価において一般的な条件での生物圏を表示する際の RWMD のアプローチは 20 年を超える期間にわたって開発が続けられてきたものであり、『生物圏状況報告書』で記述されている。一般的な条件での生物圏モデルは、スプレッドシート・モデルとしても、別個の GoldSim モデルとしても実行されているが、RWMD のトータルシステム・モデルの一部としては実施されていない。その代わりに、トータルシステム・モデルでは、具体例となる計算のために別個の生物圏モデルから導き出された 1 組の生物圏線量換算係数が用いられている。その理由は、地圏モデルから得られた生物圏に入り込む放射性核種フラックスを、PEG の代表的な人物に関する放射線量に換算するためである。

2.7.2 計算方法及びレファレンスケースの選択

RWMD は、GDF の性能尺度が、基本シナリオに組み込まれることが想定される地下水経路を表現する鍵となるパラメータに対して備えている感度を調査するための計算を実施することになっている。RWMD は、一般的に最長で閉鎖後 100 万年後までの結果を提示する予定であるが、場合によってはこの時点より先に関する結果を示すことが具体的な問題を説明する上で役立つ可能性もある。RWMD は、100 万年が適切な打ち切りポイントであると考えている。その理由は、数十万年を超えた期間については、RWMD の基本シナリオ評価モデルに組み込まれていない数多くの重要な不確実性（大規模な気候変動など）が存在することになると考えられるためである。したがって、この時点を超えた期間についてはこの種の定量的なモデル化の結果にほとんど信頼を抱くことができないため、RWMD はむしろ安全性に関する定性的な論拠に依拠することになる。

2.7.3 において、母岩を通過する流量「 q 」、移動時間「 T 」、混合フラックス「 F 」、放射性核種の放出面積「 A 」を様々な組み合わせたケースについて、地下水経路計算から得られた年間個人リスクの算術平均値とニアフィールド・フラックスを示した。これらのパラメータは、一つのサイトにおける広域的な地下水流動の性質に依存し、サイト固有の評価においては、大規模なサイト調査プログラムで得られたデータによって裏づけられた詳細な数値モデル化によって決定されることになる。もう一つのパラメータとして、閉じ込め期間「 C 」が定義される。これは廃棄物パッケージとその他の使用されている容器（オーバーパック）の性能を表すものである。

これらのパラメータ q 、 T 、 F 、 A 、 C は、今回の一般的な条件の段階における計算グループにおいて変動幅を決定するために RWMD が選んだものであるが、GoldSim モデルには、次に挙げるように、その他にも多くのプロセスの表示が含まれている。

- ・ 人工システム内での溶解限度。
- ・ 緩衝材物質への収着。
- ・ 地圏内の岩石への収着。
- ・ 有機物質が溶解度と収着に及ぼす効果。
- ・ ガラス固化 HLW のゆっくりした溶解。
- ・ SF マトリクス及び Pu マトリクスのゆっくりした分解。
- ・ 特定の放射性核種における SF からの瞬時放出割合。

- ・ HLW地層処分概念事例については、ベントナイト緩衝材を通過する拡散。
- ・ 陰イオン排除。

モデルにおいてこれらのプロセスを表すパラメータには、RWMDの研究プログラムや比較的最近 Nirex またはその他の海外の廃棄物管理機関が実施した評価活動で得られた情報を用いて、決定論的な値あるいは不確実性を表す PDF が設定されている。これにより、これらのパラメータに関する固定したデータセットが入手される。これを基づいて RWMD は、 q 、 T 、 F 、 A 及び C の値を様々に変動させた場合の感度を検討した。本文書の付属書 A に、このデータセットを構成するパラメータについてのデータが示した。RWMD は、RWMD のモデルにおいて GDF の様々な部分の寸法を定義するために、第 3.2.1 項に示した高強度岩に関するレイアウトを使用した。

次の 2.7.2 (1) では、パラメータ q 、 T 、 F 、 A 及び C に関して、さらなる検討を加える。RWMD はレファレンスケース計算を設定しており、これを処分可能性評価プロセスに関する継続的なベンチマークの一つとして利用する予定である。この点については 2.7.2 (2) で説明した。

(1) パラメータ q 、 T 、 F 、 A 及び C の詳細な説明

Nirex GPA では、少数の鍵となる（地圏の性能についても簡略に記述する）パラメータによって地圏が表現されていた。この種のパラメータとして、GDF を通る地下水体積フラックス、GDF から地上への移動時間、混合フラックスが挙げられる。RWMD はここでも類似したアプローチを採用し、次に挙げるパラメータを、地圏を表現する PDF として定義した。

q : GDF の設置場所にある、擾乱を受けていない母岩を通じた比流量 (m yr^{-1}) またはダルシー速度。このパラメータは、施設を通過する体積フラックス (m^3yr^{-1}) に影響を及ぼす。この体積フラックスはさらに、汚染された地下水プルームとして GDF から外に浸出する放射能の量に影響を及ぼす。

T : GDF から地上への地下水の移動時間 (年)。この時間は、放射性核種が地上に現れる前の分散、遅延及び崩壊の量に影響を及ぼす。

F : 上部に位置する岩石における地下水の混合フラックス (m^3yr^{-1})。GDF から出た汚染された地下水プルームは最終的に地下深部からこの岩石層に向けて上昇し、そこで混合される。この混合フラックスは、生物圏内での濃度に影響を及ぼすため、井戸水の利用によっ

て生じる放射線学的リスクに影響を及ぼす。

A：汚染されたプルームが地表に放出される湧出面積（ m^2 ）。この混合フラックスは、生物圏への自然湧出に伴うリスクに影響を及ぼす。

第 5 のパラメータは、人工システムの構成要素の一つが備える様々な特性を表すものである。

C：廃棄物容器の破損が生じるまでに要する時間（年）。このパラメータは、廃棄物容器内部で放射性核種の絶対的な閉じ込めが維持される期間を表す。

図 2-11 及び図 2-12 に、 q 、 T 、 F 及び A の値が、地下水流動様式と、実際のサイトにおいて GDF から移行する放射性核種プルームの性質とに依存する様子を示した。

図 2-11 に、地下水流動場の模式図を示した。この図の青い矢印は、例としてあげた様々な異なる水文地質学特性を備えた岩石層で構成される地質環境を通過する地下水の鉛直断面における移動方向と規模を示している。この地下水流動場は、様々な異なる岩石層の水文地質学特性（透水係数、間隙率など）、サイトにおける地下水移動の推進力（圧力勾配、塩度など）に左右されるものである。

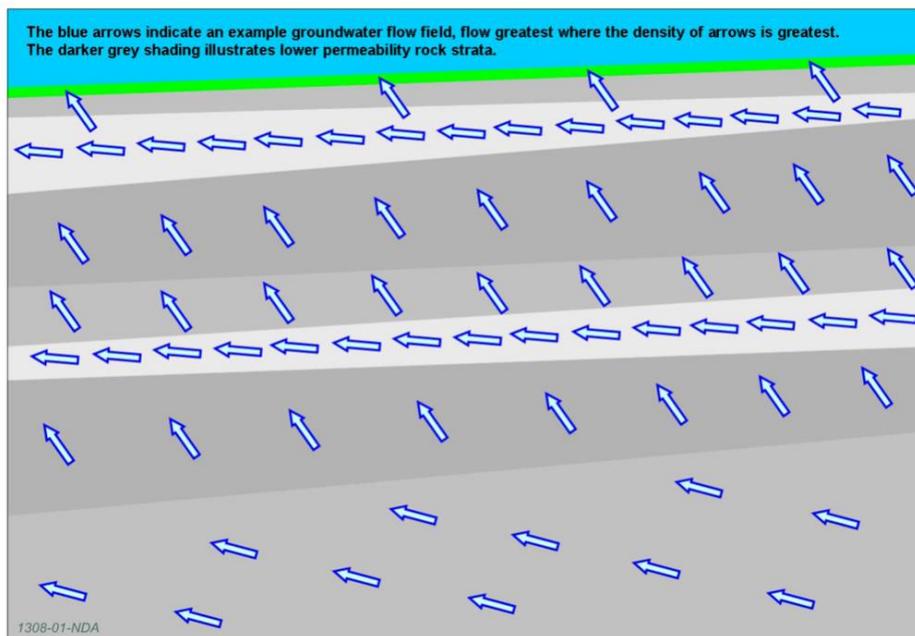


図 2-11 地下水流動場の例の模式図

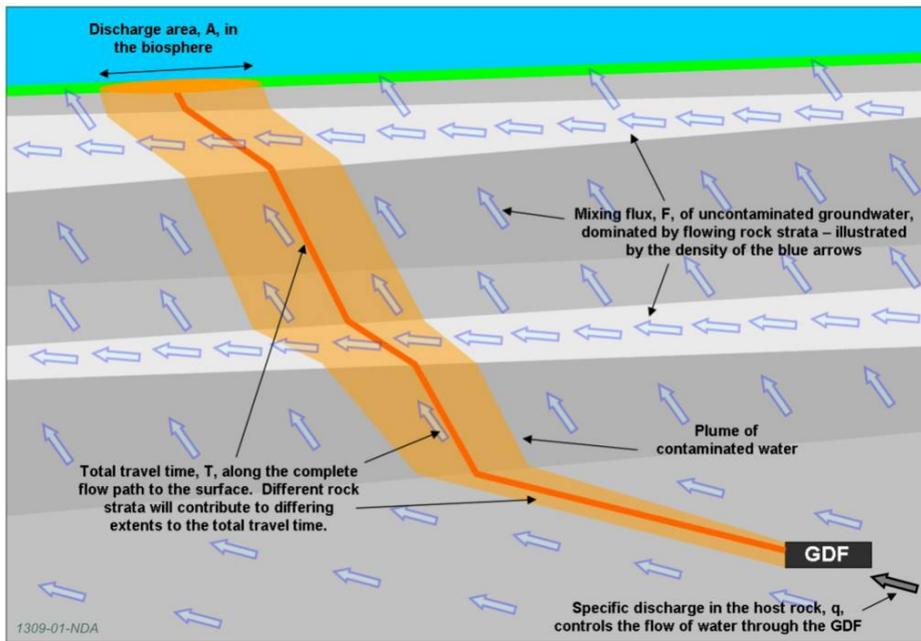


図 2-12 q、T、F 及び A が、例として挙げた地下水流動場ならびに移行する放射性核種プルームとどのように関連するかを具体的に説明する図

図 2-12 に示したように、放射性核種プルームが GDF から外部に向けてどのように移行するかは、地下水流動場に応じて決定される。また分散が存在しない場合の地上への経路も示した。この図は、パラメータ q 、 T 、 F 及び A が、流動場及び移行するプルームとどのような関係にあるのかを示すものである。パラメータ「 q 」は、処分場の設置場所における母岩内の比流量であり、「 T 」は示された経路に沿って地下水内の粒子がたどる総移動時間である。これは 1 種類の放射性核種にとっての最小移動時間となるが、多くの放射性核種は岩石に収着するため、これよりもはるかに長い時間を要することになる。RWMD のモデル化には、検討した放射性核種それぞれに関する適切な収着係数が含まれている。混合フラックス「 F 」は、放射性核種プルームの混合対象となる非汚染水の量に左右されるほか、流動場全体にも左右される。この点に関しては、比較的大きな地下水流動を伴う地層が支配的な役割を果たす。最後に「 A 」は、生物圏における湧出域の面積であり、放射性核種プルームの幅に左右される。

サイト固有の評価において地下水流動場は、サイト調査プログラムの最新段階で得られた情報に基づき、モデル化を通じて決定されることになる。すなわち、地下水流動に関する概念モデルが開発され、有限要素ソフトウェア・プログラムなどを用いた数値モデルが実行される。これにより、その後に RWMD のトータルシステム・モデルにおいて地圏を表示するために RWMD が選択する何らかの高次元パラメータの値が決定されることになる。

今回の一般的な条件の段階では、 q 、 T 、 F 及び A に関する仮定を直接設定したが、これらの仮定が背景となる地下水流動場の幾つかの側面を暗示している点には、注意するべきであろう。

概念が特定され、サイトの特性評価が実施された場合であっても、地圏性能を表示するために選択されたパラメータには膨大な不確実性が残ることになる。このため、今回の評価では、現在の一般的な条件の段階で選ばれたパラメータ q 、 T 、 F 及び A に、決定論的な値ではなく、想定される不確実性の範囲を示す PDF が割り当てられている。以下の部分で、これらのパラメータと廃棄物容器の破損を表現するためのパラメータ「C」について、不確実性と変動可能性に関連する問題がある場合にはそれを指摘しながら、さらに詳しく記述する。

q : 母岩内の比流量

GDF 近傍の母岩における比流量（ダルシー速度）は、ダルシー則の基本版から見積もることができる。すなわち：

$$q=KG$$

ここで、 K は母岩の有効透水係数 ($m\ yr^{-1}$)、 G は水頭勾配である。

これは、Nirex GPA で使用されたパラメータ「 Q 」と同一のものではない。ILW 向けの GDF を通過する地下水フラックス「 Q 」と「 q 」の関係は、次の式によって示される。

$$Q=wdYq$$

ここで、「 w 」は GDF の幅 (m)、「 d 」は GDF の厚さ（鉛直方向の高さ）(m)、「 Y 」は、ILW 向け GDF がその背景となる岩石よりも透水係数が高い場合に、GDF へと流れ込む流動への集中が起きることを考慮した増大係数である。

パラメータ「 Q 」は、地質環境のみに依存するものではなく、GDF の幾何学的形状にも依存するものであるため、今回の研究では使用されなかった。

RWMD は、広域サイト調査が実施された後であっても、この「 q 」の値が正確に把握されることにはならず、いずれにせよその値は空間的に変動するものと認識している。このため、確率論的計算では、「 q 」には上限と下限がピーク値のいずれの側でも 1 桁となる対数-三角 PDF⁶が割り当てられた。

⁶ 対数-三角 PDF とは、当該パラメータの対数に関する三角 PDF である。

T : 地下水の移動時間

一つの岩石層内の比流量（ダルシー速度）は、次の式によって見積もることができる。

$$q_1 = KG$$

ここで、「K」はその岩石の有効透水係数（ m yr^{-1} ）、「G」は水頭勾配である。これに対応する、当該岩石を通る地下水の移行速度 v （ m yr^{-1} ）は、次のようになる。

$$v = q_1 / \phi$$

ここで、「 ϕ 」はその岩石の間隙率（無次元）、すなわち、岩盤における開かれた、また相互に連結された間隙空間の比率である。ここから、地下水の移動時間「T」を、次のように見積もることができる。

$$T = L / v$$

ここで、「L」は経路の長さ（m）である。

この経路の長さ「L」は、地下水流動場に左右される。一般に、鉛直に近い地形構造（透水断層など）によって経路の長さが大幅に短縮されていないと仮定した場合、GDFからの地下水流動は、上に位置する岩石における地下水流動系の基部に合流し、主要な広域地下水湧出が起こる地域で湧出するものと予想される。この湧出域は、海または主要河川となる可能性がある。このため、標準的な主要河川の集水域の大きさと GDF のおおまかな深度（650m）とを考慮した場合、合理的な「L」の値は 5,000m 程度になろう。

地上への経路が様々に異なる岩型を横切るサイトでは、これらの岩型の一部を通過する移動時間が、総移動時間「T」においてきわめて大きな役割を果たすことが見込まれる。今回の一般的な条件の段階では、移動時間の大半が母岩内で生じるか、その上に位置する各種の地層で生じるかが明確に記述されることはなく、それがリスクなどの性能尺度に及ぼす影響の点で重要なのが総移動時間であることが認識されているだけである。

RWMD は、広域サイト調査が実施された後であっても、この「T」の値が正確に把握されることはなく、いずれにせよ「T」が依存している岩石の透水係数が空間的な変動を示すものと認識している。このため、確率論的計算では、この「T」に上限と下限がピーク値のいずれの側でも 1 桁の対数-三角 PDF が割り当てられている。

F : 地下水の混合フラックス

「稀釈」層内の比流量（ダルシー速度）は、次の式によって見積もることができる。

$$q_2 = KG$$

ここで、「K」はその岩石の有効透水係数（ $m\ yr^{-1}$ ）、「G」は水頭勾配である。

GDF に由来する放射性核種で汚染された地下水が混合される地下水フラックス「F」は、次のように見積もることができる。

$$F = w_p b q_2$$

ここで、「 w_p 」は放射性核種プルームの幅（ m ）であり、分散によって GDF の幅より拡大する。また「 b 」は混合が起こる上に位置する岩石の厚さ（ m ）である。このパラメータは Nirex GPA で用いられたパラメータ「F」と同じのものである。

RWMD は、広域サイト調査が実施された後であっても、この「F」の値が正確に把握されることはないものと認識している。このため、確率論的計算では「F」に、上限と下限がピーク値のいずれの側でも係数 3 となる対数-三角 PDF が割り当てられている。

A : 湧出面積

「A」は、放射性核種が生物圏に侵入する湧出面積である。この「A」の値は「F」と関連しており、いずれの値も主として地下深部及び浅地中の地下水様式とそれらの相互作用によって決定づけられる。この 2 つの値はいずれも、井戸からの揚水と自然地下水の湧出に関する生物圏線量係数の計算で利用されている。計算においてこの関係は、「A」と「F」との間に中程度の相関⁷が認められると想定した上で、様々な計算においてそれらの値を変動させることによってカバーされている。

RWMD は、広域サイト調査の後であっても、この「A」の値が正確に把握されることはないものと認識している。このため、確率論的計算において「A」には、上限と下限がピーク値のいずれの側でも係数 3 となる対数-三角 PDF が割り当てられている。

「F」及び「A」の生物圏モデルとの関係

GoldSim モデルでは、パラメータ「F」及び「A」は生物圏サブモデルにおいて、地圏からの放射性核種フラックスを生物圏での放射線量に換算する係数を計算するために利用さ

⁷ 順位相関係数は 0.5 と想定されている。

れている。現行の生物圏モデルでは、当該湧出面積の範囲内に井戸が存在するという仮定を初めとして、PEGの性質に関する重要な仮定が幾つか設定されている(2.7.1(3)を参照のこと)。これらの仮定は、「F」及び「A」の値に関しては、適用可能性の範囲が限定されている。特定のタイプの地質学的状況(上に位置する岩石内でほとんど稀釈が行われない条件が成立する場合など)については、これらの仮定の妥当性が失われるため、生物圏モデルを大幅に改訂する必要が生じることになるだろう。このことは、具体例となる一連の計算グループのためにRWMDが行った「F」と「A」の値の選択に影響を及ぼした。

C: 閉じ込め期間

HLW地層処分概念例に関する閉じ込めの期間は、次の式から見積もることができる。

$$C=x/c$$

ここで、 c (mm yr^{-1}) はGDF条件下での容器材料の腐食速度、「 x 」 (mm) はパッケージの肉厚である。腐食速度は、人工システムのその他の特徴(ベントナイト緩衝材によって得られる腐食材からの防護)に依存している場合もある。

RWMDは、「C」の値にはそれに関連するある程度の不確実性を伴っているものと認識している。またこの値は変数でもある(すなわち、それぞれ条件のばらつきがあるために全てのパッケージが同時に破損を起こすことはない)。このため確率論的な計算では、最初のパッケージの破損が起きるまでの時間「C」には、上限と下限がピーク値のいずれの側でも1桁の対数-三角PDFが割り当てられている。またばらつきを考慮に入れるため、パッケージの残りは「C」年後から2C年後の期間に等しく破損を起こすものと想定されている。現段階では容器材料の選択がまだなされていないことから、この仮定は破損時期のばらつきに関する恣意的なものとなっており、キャニスタの材料の選択が判明した時点で再検討する必要がある。性能評価モデルにおいて、破損時間のばらつきをどのように表示するのが最良であるかについての考察は、重要なものである。これは、この点に関する不適切なモデルが「リスクの稀釈」につながりかねないためである。こうした稀釈は、確率論的なモデルにおいて、異なる実現から得られたピーク・リスクの発生時期がきわめて異なっているために平均ピーク・リスクが人為的に低減されるような場合に生じる可能性がある。

計算の一つには、ILWに関して「0」ではない閉じ込め期間「C」が含まれている。

(2) レファレンスケースの選択

RWMD は、パラメータ q 、 T 、 F 、 A 、 C の特定の値（英国内にみられる一定範囲の地質環境に適合した合理的なパラメータ値）を用いたレファレンスケース計算を特定した。このレファレンスケース計算の選択は、Nirex GPA におけるレファレンスケースと一致しているため、このレファレンスケースは、処分可能性評価プロセスのために実施される閉鎖後評価にとっての継続的なベンチマークの一つとして機能することができる。

このレファレンスケースに関するパラメータ値は、総ピーク・リスクがリスク・ガイダンスレベルに近くなることを見込まれるように選択されている。RWMD は 2.2 において、これらの計算から算出されたリスクの「正確」な値は、今回の一般的な条件の段階では特に意味のあるものではなく、その理由は、これらの値はサイト及び概念が特定されるまでは明らかにすることのできない数量を表現するパラメータに依存していることにある、と述べた。しかし、リスク・ガイダンスレベルとの比較において、広い意味で受け入れ可能な性能を示すレファレンスケースから RWMD は、ピーク・リスクの「相対的」な寄与についての有益な情報を入手することができる。

インベントリのどの部分がピーク・リスクに最大の寄与を行うのかを知る必要がある。その理由は、これにより、この種の廃棄物に関する RWMD の概念設計の最適化作業に必要な情報が得られることにある。また、個別の廃棄物タイプに含まれるどの放射性核種がピーク・リスクに最も大きな寄与を行うのかを知る必要もある。その理由は、これにより、RWMD が処分可能性評価プロセスの一環としてパッケージング案の評価を行う際に、自分たちの研究活動の焦点を、当該リスクにおいて常に他の要素が支配的であることが実証可能なために無意味である事項にではなく、重要であることを見込まれる事柄に絞ることができるようになることにある。したがって、レファレンスケースは次の目的のために利用される。

- ・ インベントリに含まれる様々に異なるタイプの廃棄物が総リスクに対して行う寄与を示すために、結果を提示する。
- ・ 算出された放射線学的リスクが様々な放射性核種にどのように左右されるのかを示すために、結果を提示する。

レファレンスケースの特徴は、次のようにまとめられよう。

- ・ インベントリとは、ILW、LLW、さらにはHLW、SF、DNLEU、HEU及びPuを含めた「派生インベントリ」（2.4.1を参照のこと）である。
- ・ 処分概念は、具体例となるILW及びHLW地層処分概念事例を対象とした、高強度岩に関する概要概念である（2.4.2(1)を参照のこと）。
- ・ 母岩内の比流量「q」の中央値は $6.0 \times 10^{-4} \text{m yr}^{-1}$ であり、その不確実性の規模は両側に1桁（ $6.0 \times 10^{-5} \text{m yr}^{-1} \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{m yr}^{-1}$ ）となっている。これは、Nirex GPAのレファレンスケースで考慮されたILWボルトを通過する体積フラックスの値（ $300 \text{m}^3 \text{yr}^{-1}$ ）とほぼ一致している。
- ・ 移動時間「T」の中央値は10万年であり、不確実性の規模は両側に1桁（1万年～100万年）となっている。
- ・ 混合フラックス「F」の中央値は $30 \text{万m}^3 \text{yr}^{-1}$ であり、不確実性の規模は両側に係数3（ $10 \text{万m}^3 \text{yr}^{-1} \sim 90 \text{万m}^3 \text{yr}^{-1}$ ）となっている。
- ・ 湧出面積「A」の中央値は 10^7m^2 であり、不確実性の規模は両側に係数3（ $3.3 \times 10^6 \text{m}^2 \sim 3.0 \times 10^7 \text{m}^2$ ）となっている。
- ・ ILW概念では、閉じ込め期間「C」はゼロである。
- ・ 閉じ込め期間「C」の中央値には、具体例として50万年という値が割り当てられている。この値は、HLW地層処分概念例に関する長寿命容器材料に対応するものであり、不確実性の規模は両側で1桁、容器間の変動幅は係数2の範囲となっている（不確実性範囲の下限では、容器は5万年～10万年の期間に徐々に破損するのに対し、不確実性範囲の上限では、容器は500万年～1,000万年の期間にわたり徐々に破損する）。
- ・ 母岩の上に位置する堆積層には比較的低い収着特性（粘土ではなく砂岩に該当する収着特性）が採用された。

2.7.3 レファレンスケースに関する結果

本節で示す全ての結果及びグラフは、それぞれの数量に関して計算された算術平均値である。今回の一般的な条件の段階では、確率論的計算についてこれ以上の統計的な解析は示されていない。図 2-13 に、ILW 及び LLW（この図では ILW として示されている）、DNLEU、HLW、SF、Pu 及び HEU の寄与を示すレファレンスケースを対象として、総年間個人リスクの計算値を示した。SF に関する計算には AGR と PWR の使用済燃料が含まれている。レファレンスケースの仮定に基づく派生インベントリに含まれる全ての物質を処理する併設処分施設に関連する総年間個人リスク算出値は、約 30 万年後まで 10^{-6} というリスク・ガイダンス・レベル（図では RGL として示されている）を下回る水準にある。この時点で、リスク計算値が DNLEU 成分に制御されるようになる。HLW 及び SF からのリスク計算値は、ILW 及び LLW よりも少なくとも係数 5 だけ低い。また Pu 及び HEU からのリスクは、HLW 及び SF のそれと比較して 3 桁低い。

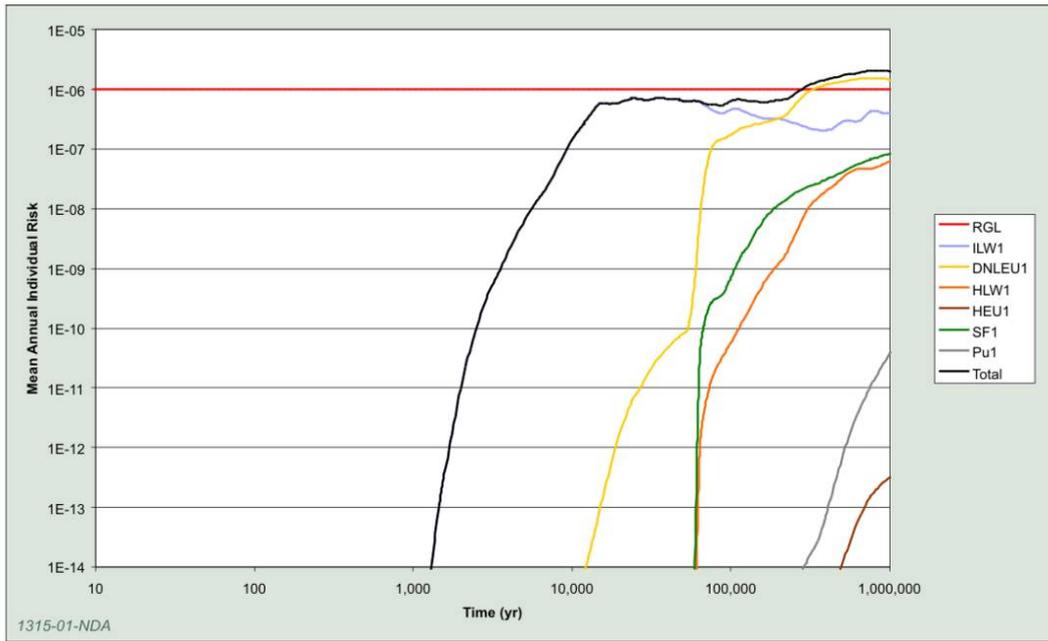


図 2-13 レファレンスケースの時の経過に伴う総平均放射線リスクの推移
(様々に異なる廃棄物タイプからの寄与を示す)



図 2-14 ILW と LLW を対象としたレファレンスケースの時の経過に伴う
平均放射線リスクの推移

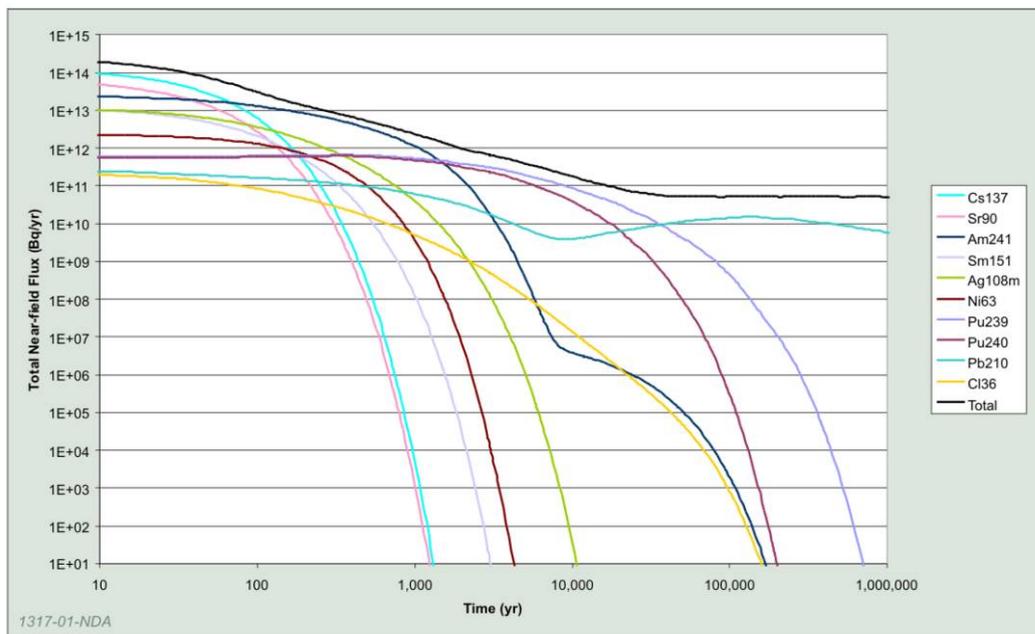


図 2-15 ILW と LLW を対象とした鍵となる放射性核種に関するレファレンスケースの時の経過に伴う平均ニアフィールド・フラックスの推移

図 2-14 には、個別の廃棄物タイプからの寄与という形で、ILW 及び LLW からの総リスクへの寄与を示した。図 2-15 には、ILW 及び LLW に関するレファレンスケースを対象として、地圏への放射性核種フラックスの計算値（人工システムから地下水によって移行されるそれぞれの放射性核種の放出速度：単位は Bq yr^{-1} ）を時の関数として示した。

レファレンスケースでは、ILW と LLW からの放射線学的リスクは、あらゆる時点でリスク・ガイダンスレベルである年間 10^{-6} 未満にとどまっている。GDF の閉鎖から 5,000 年間については、有意のリスクは存在しない。計算における最短の移動時間よりも先にリスクが観察されている原因は、分散にある（1 万年が移動時間に関する PDF の下限である）。

初期には、人工システムから放出される放射能の最大のフラックスは、セシウム-137、ストロンチウム-90 及びアメリシウム-241 によるものである。これらの放射性核種は比較的寿命が短く、半減期はそれぞれ約 30 年、29 年及び 430 年である。現実には、これらの放射性核種は物理的なバリアによって閉じ込められているものと RWMD は予想するが、レファレンスケースの計算では、慎重な立場に立ち、それらが埋め戻し材の間隙水中に即座に溶解可能なものと想定した。これらの核種の半減期が地下水移動時間よりも短いことから、それが生物圏に及ぼすリスクは無視できるレベルである。

1,000 年後には、人工システムから放出される放射性核種フラックスの大半がプルトニウム

ム-239 とプルトニウム-240 によるものとなる。プルトニウム-239 の半減期は約 2 万 4,000 年である。プルトニウムはニアフィールド条件下では溶解度が低く、収着度が高いため、地圏内での収着による遅延を受ける。したがってほとんど全てのプルトニウム-239 は生物圏に到達する前に崩壊しており、リスクへの寄与は無視できる水準のものとなる。

5,000 年後から 10 万年後までの期間では、算出されたリスクは主としてヨウ素-129 と塩素-36 によって生じており、ピークはおよそ 3 万年後に出現する。人工システムから放出されるヨウ素-129 と塩素-36 のフラックスはいずれも比較的低いものである。放射エネルギーで表すと、両者の合計は人工システムから放出される当初の放射性核種フラックスの 0.1% 未満である。ヨウ素-129 と塩素-36 の半減期は長く（それぞれ約 1,600 万年と 30 万年）、その化学特性として、人工システム内でも地圏内でもきわめて可溶性が高く、容易には収着されないことが挙げられる。したがってこれらの放射性核種からのピーク・リスクの計算値はおおむね地圏内の分散のレベルと（地下水の移動時間「T」とほぼ比例する）、出現した放射性核種プルームが母岩の上に位置する岩石でその他の地下水と混合する程度（混合フラックス「F」によって決定づけられる）によって決定される。

それより後、10 万年後を超えると、リスクは主としてウラン-238 の崩壊生成物（ラジウム-226、鉛-210 及びトリウム-230）によってもたらされる。また 10 万年後から 1 億年後までの期間には、ネプツニウム-237 とその娘核種（トリウム-229 及びウラン-233）が算出される総リスクに有意の寄与を行うようになる。

約 20 万年後以降は、人工システムから依然として有意なレベルで放出される放射性核種はウラン-238 とその娘核種のみである。ウラン-238 の半減期はきわめて長く、約 45 億年である。ウランは可溶性が高くはなく、セメント埋め戻し材に強く収着されるほか、地圏内の岩石にも強く収着される。このためウランの人工システムからの移動はゆっくりとしたものであり、地圏を通じて生物圏へと時間をかけて移行する。それでも、ウラン-238 の半減期がきわめて長いため、それが完全に崩壊するまで天然系または人工システムによって閉じ込めが実現できるという保証はないことを意味する。しかし処分概念に含まれる多重バリアは共同で機能し、ウラン-238 の最終的な放出を遅らせ、分散させることから、ウラン-238 が生物圏に有意濃度で到達することはない。ウラン-238 による最大の放射線学的影響は、その崩壊生成物によって、とりわけトリウム-230（半減期は 7 万 7,000 年）、ラジウム-226（半減期は 1,600 年）及び鉛-210（半減期は 22 年）によってもたらされ、これらの放射性核種は閉鎖後期間のきわめて遅い時点での主要なリスク要因となっている。



図 2-16 DNLEU における鍵となる放射性核種を対象としたレファレンスケースの時の経過に伴う平均放射線リスクの推移

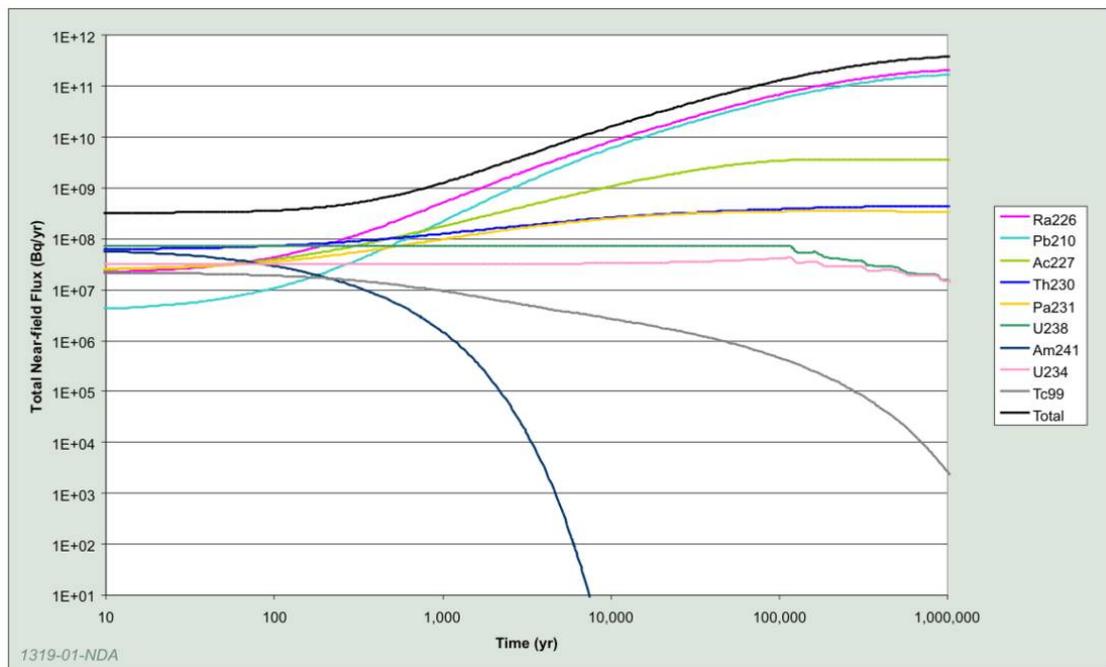


図 2-17 DNLEU における鍵となる放射性核種を対象としたレファレンスケースの時の経過に伴う平均ニアフィールド・フラックスの推移

図 2-16 と図 2-17 には、それぞれ時間の関数として、DNLEU に関する放射線学的リスクの計算値と人工システムから放出される放射性核種フラックスの計算値とを示した。図 2-16 では、約 8 万年後までは DNLEU が有意な寄与を行わないことが示されている。この時点以降、ウラン同位体とウラン-238 系列の娘生成物が主に寄与することになる。ILW のケースでは、ウラン-238 からの最大の放射線学的影響は、その崩壊生成物、中でもトリウム-230（半減期は 7 万 7,000 年）、ラジウム-226（半減期は 1,600 年）及び鉛-210（半減期は 22 年）によるものである。

DNLEU に含まれるウラン-238 のインベントリは ILW と比べてはるかに多いため⁸、DNLEU を対象としたレファレンスケースの放射線リスクの計算値は ILW の場合よりも高くなっており、計算の終点では規制リスク・ガイダンスレベルを超過している。また 100 万年後より前にピークが生じることは明確になっていない。この理由から RWMD は、DNLEU を対象として、これより後の期間まで拡張した感度計算を実施している。しかし 2.7.1 でも述べたように、DNLEU はまだ廃棄物とは見なされておらず、RWMD のプログラムの現段階では、DNLEU を対象とした具体的な設計を伴う処分概念はまだ存在していない。これらの計算に用いられた地層処分概念事例は、DNLEU ではなく ILW を対象として設計されたものである。DNLEU に関するリスク計算値を検討する際には、この点について留意する必要があるだろう。DNLEU が廃棄物と見なされた場合、RWMD は、選定されたサイトの様々な特性を考慮した上で、その処分のために適切な概念を開発することになる。

図 2-18、図 2-20、図 2-22 及び図 2-23 にそれぞれ、レファレンスケースに関して、また高レベル放射性廃棄物等（HAW）のタイプ（すなわち、HLW、SF、Pu 及び HEU）別に、鍵となる放射性核種による寄与を明らかにする放射線学的なリスクの計算値を示した。図 2-20 によれば、SF が HAW タイプの中で最大のリスクをもたらすが、その寄与もリスク・ガイダンスレベルを下回る水準レベルにとどまっている。図 2-13 に示したように、HLW がその次に大きなリスク寄与を行う。HLW と SF の両方において総リスクに最も寄与する放射性核種はヨウ素-129 とセシウム-135 であり、比較的後の期間ではセレンウム-79 が、比較的前の期間では塩素-36 が寄与することになる。

図 2-19 と図 2-21 にはそれぞれ、レファレンスケースにとって有意な放射性核種について、人工システムから放出される HLW と SF に関連する時の経過に伴う放射性核種フラッ

⁸ DNLEU 内のウラン-238 インベントリは、2150 年の時点での放射エネルギーにして、ILW の 90 倍を超えている。

クスの推移の計算結果を示した。いずれの廃棄物タイプについても、5 万年後まで、放射能が地圏に現れることはない。この時期は、PDF によるレファレンスケースにおける容器破損時期の下限に該当する。この時点までに短寿命放射性核種のほとんどは崩壊している。HLW の場合、シミュレーション期間全体を通じてセシウム-135 がフラックスの大半を占めており、これより後の期間にはアクチニウム-227 とラジウム-226 が有意な寄与を行う。SF に関しては、比較的初期にはニッケル-59 が総フラックスに対して最大の寄与を行うのに対し、比較的後の期間にはアクチニウム-227 とラジウム-226 が大きな寄与を行う。

図 2-22 と図 2-23 では、計算期間の全体を通じて、Pu 及び HEU からのリスクがその他の廃棄物タイプからのリスクと比べて無視できるレベルであることが示されている。図 2-13 から、レファレンスケースの場合、Pu 及び HEU からの総リスクが、HLW 及び SF からのリスクに対して、少なくとも 3 桁は低いことが明らかである。RWMD は、Pu がセラミック物質に組み込まれる形で処分されるものと仮定した。この種の物質はきわめてゆっくりと劣化するため、算出されたリスクは低くなっている。また Pu は地圏内での収着に伴って大幅な遅延を受けるため、インベントリ内のプルトニウム-239 とプルトニウム-240 のほとんど全ては、生物圏に到達する前に崩壊することになる。HEU からのリスクが無視できるレベルとなるのは、HEU の同位体を含むその他の廃棄物に比べて、インベントリがきわめて小さいためである。Pu 及び HEU からのリスクはレファレンスケース計算に含まれるその他の廃棄物に比べて無視できるレベルにあるため、今回の評価ではこれ以上検討していない。

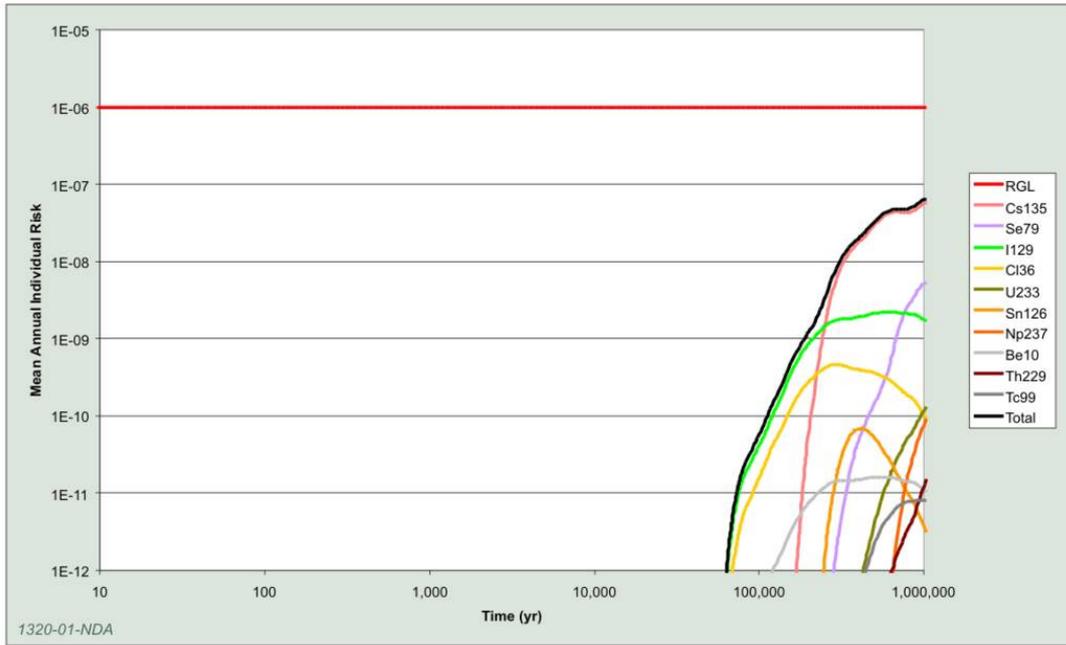


図 2-18 HLW を対象とした、鍵となる放射性核種に関するレファレンスケースの時の経過に伴う平均放射線リスクの推移

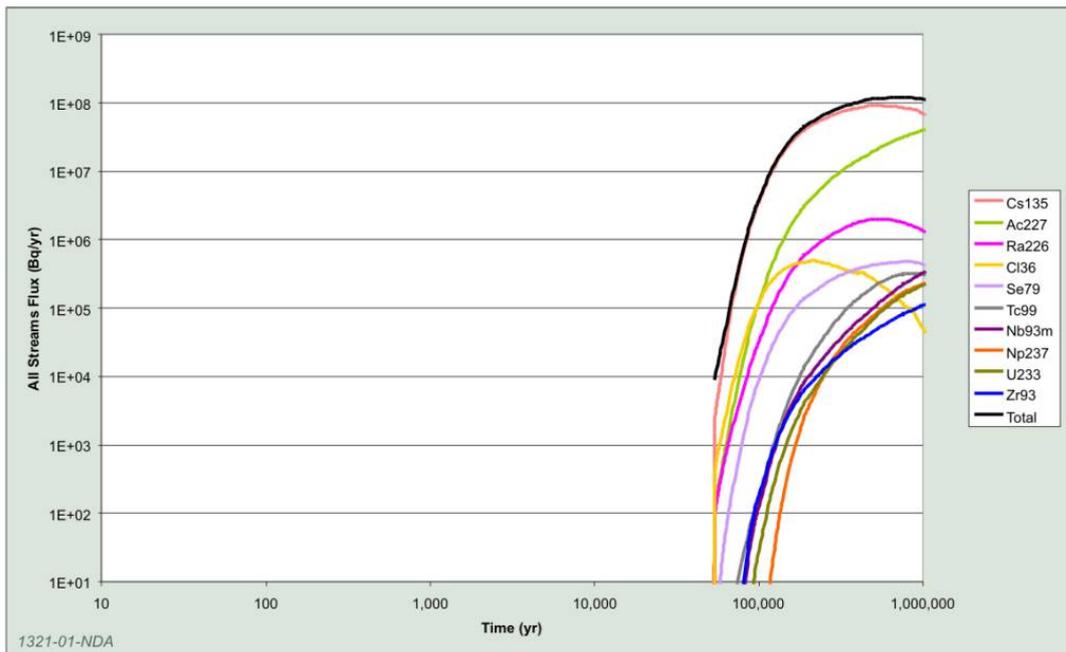


図 2-19 HLW を対象とした、鍵となる放射性核種に関するレファレンスケースの時の経過に伴う平均ニアフィールド・フラックスの推移

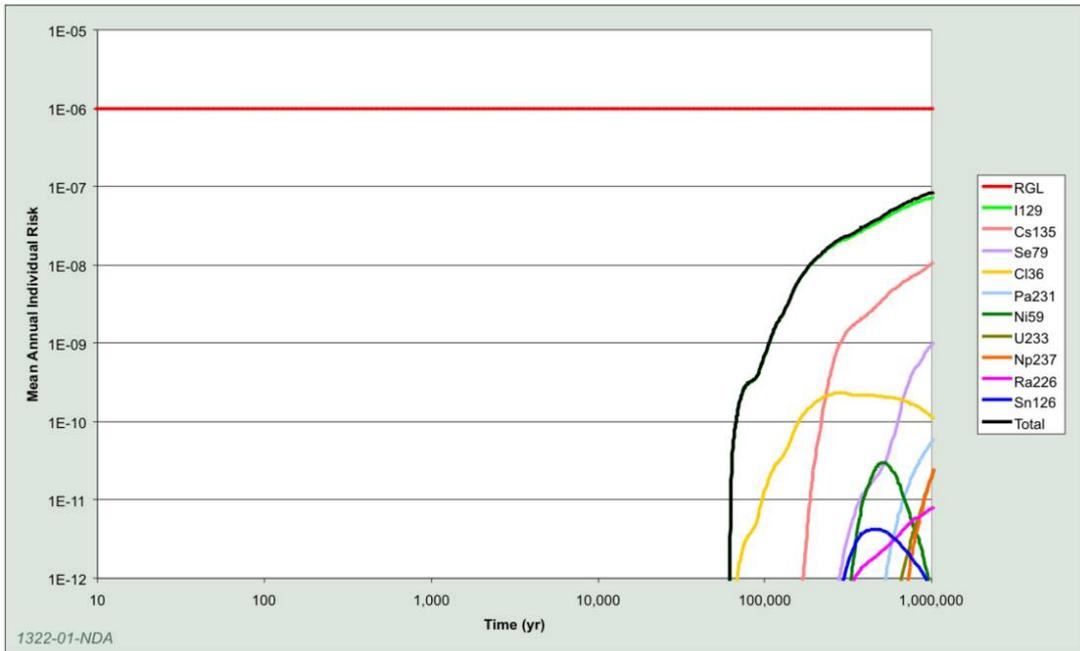


図 2-20 SF を対象とした、鍵となる放射性核種に関するレファレンスケースの時の経過に伴う平均放射線リスクの推移

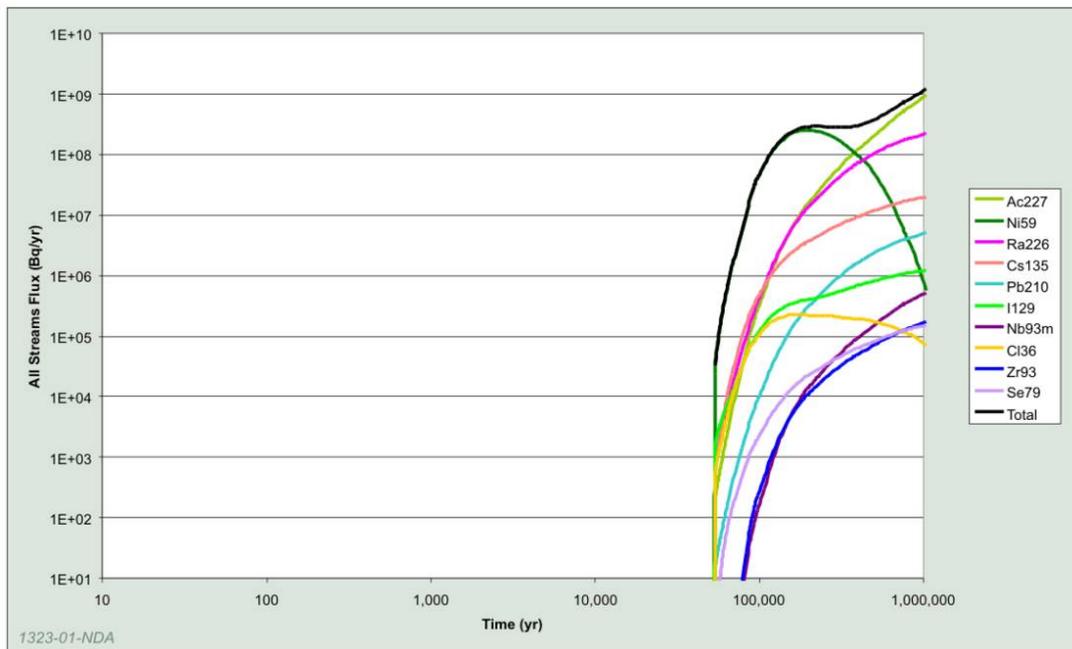


図 2-21 SF を対象とした、鍵となる放射性核種に関するレファレンスケースの時の経過に伴う平均ニアフィールド・フラックスの推移

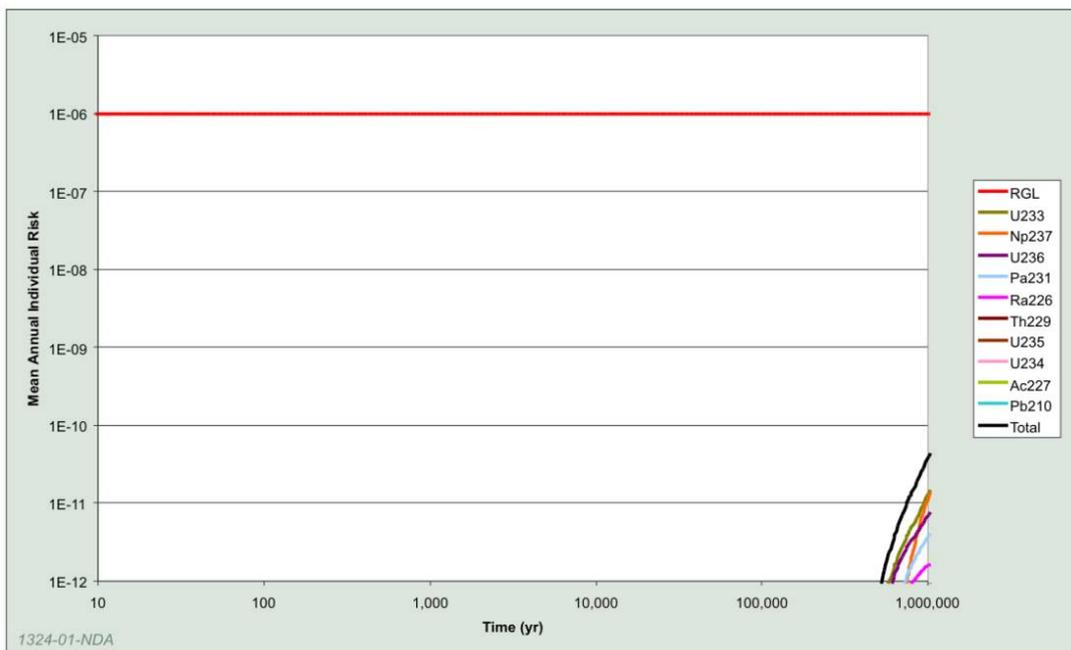


図 2-22 Pu を対象とした、鍵となる放射性核種に関するレファレンスケースの時の経過に伴う平均放射線リスクの推移

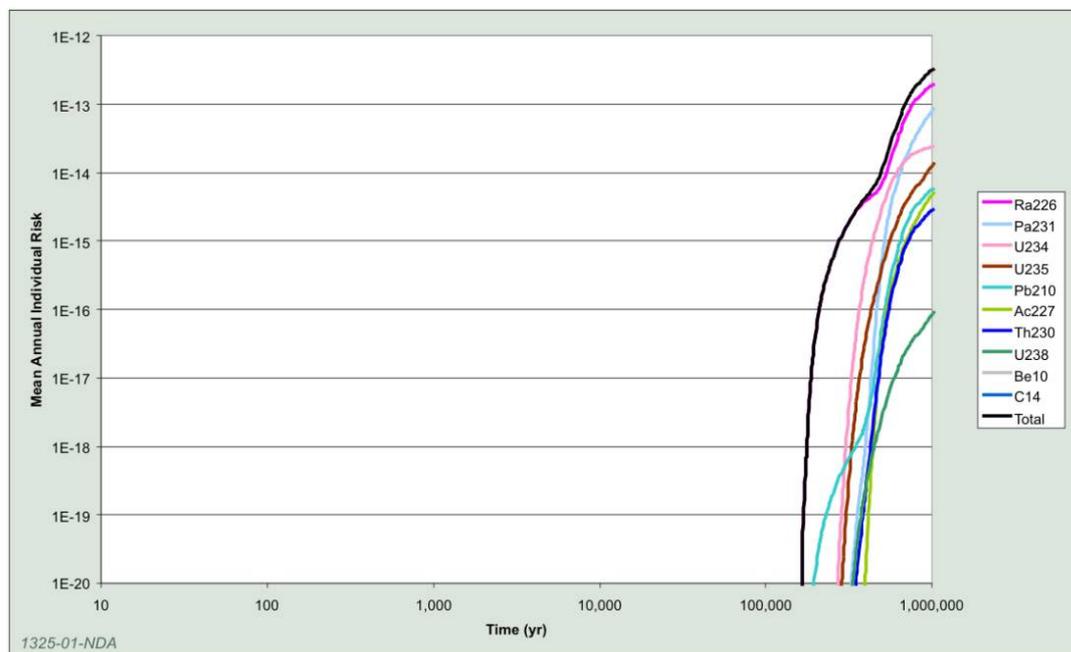


図 2-23 HEU を対象とした、鍵となる放射性核種に関するレファレンスケースの時の経過に伴う平均放射線リスクの推移

2.7.4 地下水経路に関する定量的な解析の今後の進展

サイトと概念がまだ明らかになっていない一般的な条件の段階において、地下水経路を対象として意味のある計算を実行できる範囲には明確な限界がある。RWMD は、リスク・ガイダンスレベルを上回る場合と下回る場合の両方が発生する単純化されたモデルを用いて、サイト及び概念を表現する特定のパラメータの組み合わせを用いたリスク計算を実施した。しかし我が既に強調したように、これは現段階ではリスクの「正確」な値ではなく、GDF の様々な構成要素と、インベントリに含まれる最も注目される放射性核種によるリスクへの「相対的」な寄与を示しているに過ぎない。

サイトに関する情報が入手された後に、当該サイトで実施が計画される概念に合わせて、より適切なモデルを開発する必要がある。この作業は、机上研究の段階から始まり、サイト調査を通じて細部を詰めた上で、施設の建設許可申請の裏づけとして DSSC を作成する段階に至る方法で、反復的に行われる。トータルシステム・モデルには、EBS に関するより高度かつ詳細なモデルが含まれている必要がある。サイトが選定される場所にもよるが、地圏の表現の中には、移流ではなく拡散が支配的な移行、割れ目における流動、さらには岩石マトリクス拡散が含まれる可能性がある。また、不確実性を伴う様々なパラメータ間の相関関係を適切に処理する必要が生じることになる。

性能評価におけるモデルの適用方法にも変化が生じることが予想される。計算ケースの選択は、これらの不確実性に対してリスクなどの性能尺度がどのような感度を備えているのかを調査する目的で、それぞれの段階においてその時点で重要な不確実性を反映したものとなる。今回の一般的な条件での閉鎖後安全評価 (PCSA) では、対象となる地質学的状況がまだ明らかになっていないことから、この状況を表現するパラメータに焦点が合わせられている。サイト選定プロセスの将来の段階では、選定されたサイトに関する知識の拡大に伴い、「q」及び「T」といったパラメータに関して RWMD が設定している不確実性の範囲を狭めることができよう。

対象となるサイトにおける地下水流動様式に関する概念モデルと数学モデル、さらには EBS に関するより詳細なモデルを開発する必要が生じることになる。これらは、今回の一般的な条件での評価では単に値を想定しているだけの放射性核種移行パラメータ（移動時間や流量など）に関するデータの供給を通じて、トータルシステム・モデルへの裏づけをもたらすことになる。これらの裏づけとなるモデルの一部は、気候変動などの当該サイトの地下水流動様式に変化をもたらすバリエーション・シナリオの効果を表現することがで

きななければならない。

2.7.5 地下水経路に関するまとめ

地下水経路とは、GDF内の放射性核種が、地下水に溶解し、それによって地上に移行されることで、将来の人々に放射線学的なリスクをもたらす経路である。RWMDは、GoldSimを用いたトータルシステム・モデルを開発した。これには人工バリアシステム、地圏及び生物圏の表示が含まれ、RWMDはそれを利用して地下水経路の定量的な解析を行った。RWMDは2件の地層処分概念事例を検討した（1件はILW、LLW及びDNLEUを、もう1件はHLW、SF、Pu及びHEUを対象としたもの）。

RWMDは、次に示すように、地層バリアの様々な特性を表す4件のパラメータを定義した。

q：GDFの設置場所にある擾乱を受けていない母岩を通る比流量 (m yr^{-1}) またはダルシー速度。

T：GDFから地上への地下水の移動時間（年）。

F：母岩の上に位置する岩石における地下水混合フラックス (m^3yr^{-1})。GDFから放出された汚染された地下水プルームは、最終的に地下深部からこの岩石層へと浮上し、汚染されていない水と混合される。

A：地上において汚染されたプルームが放出される湧出面積 (m^2)。

第5のパラメータは、人工システムの様々な特性を表すものである。

C：廃棄物容器の破損が生じるまでに要する期間（年）。これは廃棄物容器と人工システムとが組み合わされた特性の一つであり、廃棄物容器内で放射性核種の絶対的な閉じ込めが実現する期間を示す。このパラメータは第一に、今回の評価で示されている計算において、HLW地層処分概念事例に関連するものである。

これらの5件のパラメータには、決定論的な値ではなく、想定された不確実性の範囲を表すPDFが割り当てられている。RWMDは、パラメータq、T、F、A及びCの中央値の特定の組み合わせを伴うレファレンスケースを特定した。このレファレンスケースに関する仮定は、Nirex GPAに関するレファレンスケースのものと一致している。このため、処分可能性評価プロセスに関して実施される閉鎖後評価における継続的なベンチマークの一つとして機能することができる。

地下水経路からのピーク・リスクは、数千年後以降の期間に発生する。レファレンスケ

ースに関する計算によって、Pu 及び HEU の処分に伴う地下水経路からのリスクが無視できるレベルであることが示されている。ILW、LLW、HLW 及び SF の処分に伴うリスクの計算値は、レファレンスケースの場合には、100 万年という評価期間の全体を通じてリスク・ガイダンスレベルを下回っている。総リスクへの寄与の面からみて最も重要な放射性核種の中には、可溶性と移動度を備えた塩素-36 とヨウ素-129 が、さらにこの後の時点では、ウラン-238、ネプツニウム-237 とそれらの娘核種が含まれる。

レファレンス計算における総リスクにおいて支配的な役割を果たすのは、数十万年後までは ILW 及び LLW である。その後は、DNLEU が支配的になる（きわめて遠い将来には、DNLEU からのリスクがリスク・ガイダンスレベルを上回ることになる）。このため RWMD は、特定のパラメータに対してこのリスクが備える感度を調査するために、幾つかの計算を実施した。その結果、DNLEU におけるこの種のリスクは有意な懸念材料とはならないことが示された。その理由は、次に挙げる通りである。

- ・ DNLEU 処分のための概念は今後開発しなければならないが、現時点では単純に ILW として処分されるものと仮定した。DNLEU を処分することになった場合には、この物質の様々な特性への対応を改善するために、概念の最適化を実施する余地がある。
- ・ このリスクは、RWMD が定量的な性能評価計算に信頼を置くことのできる期間（数十万年）が過ぎた時点で発生するものである。

RWMD は、パラメータ q 、 T 、 F 、 A 及び C の中央値を様々に変化させた上で、ILW 及び LLW、HLW 及び SF を対象とした計算グループを実行した。これらの計算グループにより、利用可能な一定範囲の地質環境及び概念を通じて、算出されたリスクがこれらのパラメータにどのように依存しているかに関する示唆を得ることができた。ただしこの特殊な評価アプローチとこのタイプの具体例となる計算の「適用可能範囲」が、第 2.4 節で説明したよりも地質環境の範囲において限定的なものとなっている点には、留意する必要があるだろう。一部の地質環境、とりわけ無視できる移流しか存在しない広範な区域が存在する環境においては、実際の性能評価にある程度異なった方法が採用される可能性があることを、RWMD は認識している。

これらの計算グループに関して算出されたピーク年間個人リスクの範囲は、リスク・ガイダンスレベルである 10^{-6}yr^{-1} を大幅に下回る水準から、地質学的状況に関してより悲観的な仮定の組み合わせを用いた場合に得られる英国の自然バックグラウンド放射線に伴うリ

スクに相当する水準までの幅となっている。

2.7 では、地下水経路における放射線学的リスクを計算するアプローチについて説明した。候補地が明らかになった場合には、現地の地質学的状況に関してより多くの情報が利用できるようになり、RWMD の方法論をさらに洗練させ、サイトの地質学的状況に見合ったモデルを開発し、また RWMD の研究活動の焦点を重要な不確実性が存在する領域に絞ることができると考えられる。サイトに関して利用可能な情報が増えるにつれて RWMD は、GDF システムの経時変化に関する RWMD の理解に対する信頼を構築し、さらに GDF の長期的な安全性の評価に対する RWMD の信頼を高めることができると考えられる。