付録 3　3.1.3 (1)　シーリングシステムの機能不全を想定した諸外国の安全評価事例に関する調査・分析

目次

(1) SR-Site におけるアクセス坑道及び主要坑道の放棄（埋め戻しなし）を想定した評価（Incompletely sealed repository）……付 3-1
(2) Dossier 2005 Argile における地下坑道及びアクセス坑道におけるシーリングシステムの機能不全を想定した評価……付 3-3
(3) Opalinus clay：Modelling of Radionuclide Transport along the Underground Access Structures of Deep Geological Repositories (NAGRA, 2014) におけるシーリングシステムの機能不全を想定した評価……付 3-5
(4) 各安全評価事例の詳細な調査・分析……付 3-9
1) SR-Site の Incompletely sealed repository において銅製キャニスタの機能喪失をもたらす要因……付 3-11
2) シーリングシステムの機能不全を想定した場合の地下水流動解析……付 3-27
3) 高透水性となった坑道中の核種移行解析……付 3-79
4) 生活圏の想定……付 3-96
参考文献……付 3-103

(1) SR-Site におけるアクセス坑道及び主要坑道の放棄（埋め戻しなし）を想定した評価（Incompletely sealed repository）

- SR-Site では、地層処分の長期的安全確保が将来の人間活動の予測に含まれる本質的な不確実性に対してどの程度の頑健性を示し得るかを把握するために、複数の仮想的なシナリオ（Future Human Actions: FHA）（SKB, 2010a）を想定して評価を行なっている。
- Incompletely sealed repository シナリオは FHA の一環であり、将来の社会経済的な状況の変化により、地下の処分坑道に廃棄体が定置され、人工バリアの定置及び坑道埋め戻しが終了した後の方針変更等で地下施設の主要坑道やアクセス坑道が埋め戻されることなく放置されることを想定している。また、この場合、処分坑道端部に設定される力学プラグの経年劣化によって処分坑道埋め戻し材の拘束が失われ、主要坑道側に埋め戻し材が膨出することによる密度低下と透水性上昇が生ずるものと仮定されている。
- SR-Site では原則として評価期間を上回る長寿命の銅製キャニスタを採用しているため、埋め戻されずに放置された主要坑道やアクセス坑道が地表に至る卓越した移行経路となっても、放射性物質がキャニスタ内に保持されている限り影響は顕在化しない。そこで、顕著な影響が発生する可能性として、銅製キャニスタの腐食を促進する要因となる酸化性の地表水の地下深部への導入による容器の開口と放射性核種の溶出及びその後の主要坑道やアクセス坑道を介した地表への核種移行が生ずるような（悲観的な）シナリオを敢えて想定している。
- 具体的には、付図 3-1 に示す処分場レイアウトにおいて異なる位置に掘削されているアクセス坑道（図中の RAMP）及び換気用立坑（同じく VS1 及び 2）のいずれかが地表水の涵養位置となり、他方が排水位置となることによって地表から地下施設を通過して再び地表に回帰するような流動場が形成される状況が想定されている。

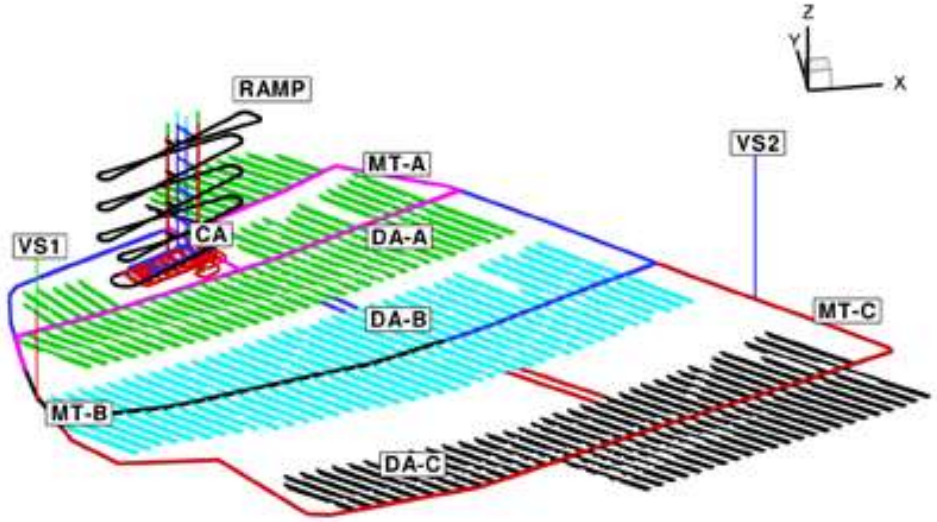


Figure 10-7. *Definition of different parts of the studied repository layout. The modelling considers three operational stages (A–C) and three possible grouting levels for each stage. The three stages are indicated by green, turquoise and pink colours. DA = deposition area, MT = transportation and main tunnel, VS = ventilation shaft, CA = central area.*

付図 3-1　SR-Site における処分場レイアウトの概念（RAMP: アクセス坑道（斜坑）、VS1 及び 2：換気用立坑）（SKB, 2010a）

- アクセス坑道及び換気用立坑内を地下水が自由に流動できる状況を想定した地下水流動解析結果(SKB, 2010a)によれば、安全評価期間のうち現在と同じ温暖期には、換気用立坑が涵養位置となりアクセス坑道が排水位置となる流れが生じ、寒冷期には地表に発達する氷床の圧力によってアクセス坑道が涵養位置となり換気用立坑が排水位置となる逆の流れが生じることが想定されている。
- そこで、上記の時期に応じた地表水の引き込みとその後の地下水流動を仮定して、地表水中の溶存酸素が密度の低下した処分坑道（上部坑道）に侵入し、その後、拡散で処分孔内の緩衝材を通過して銅製キャニスタ表面に到達して瞬時に腐食反応をもたらすという仮定の下に銅製キャニスタの腐食寿命の短縮を評価している。この結果、高透水性の割れ目と交差する位置にある例外的な廃棄体に限って早期に腐食開口する可能性が指摘されている。
- 容器開口後の廃棄体からの核種の溶出及びシーリングされていない坑道を経由した地表への核種移行を評価することにより、一体の銅製キャニスタが早期に腐食開口した場合に生ずる影響（被ばく線量）を付図 3-2 に示すように算出している。なお、ここでは、排水位置となる換気用立坑あるいはアクセス坑道の入り口（地表部分）において核種を含む水が希釈されずに飲用水及び灌漑用水として用いられることを想定して被ばく線量を算出している。
- この評価の結果、最大線量はリスク上限の 14μSv/y を若干上回る 25μSv/y となっているが、バックグラウンドの線量よりは顕著に低いと推定されている。また、バックグラウンド線量に匹敵する影響が生ずるためには、気候変動サイクルにおける同一の温暖期あるいは寒冷期の期間内に 20 体以上の銅製キャニスタが腐食・開口する必要があり、このような可能性は極めて考えにくいと結論づけている。

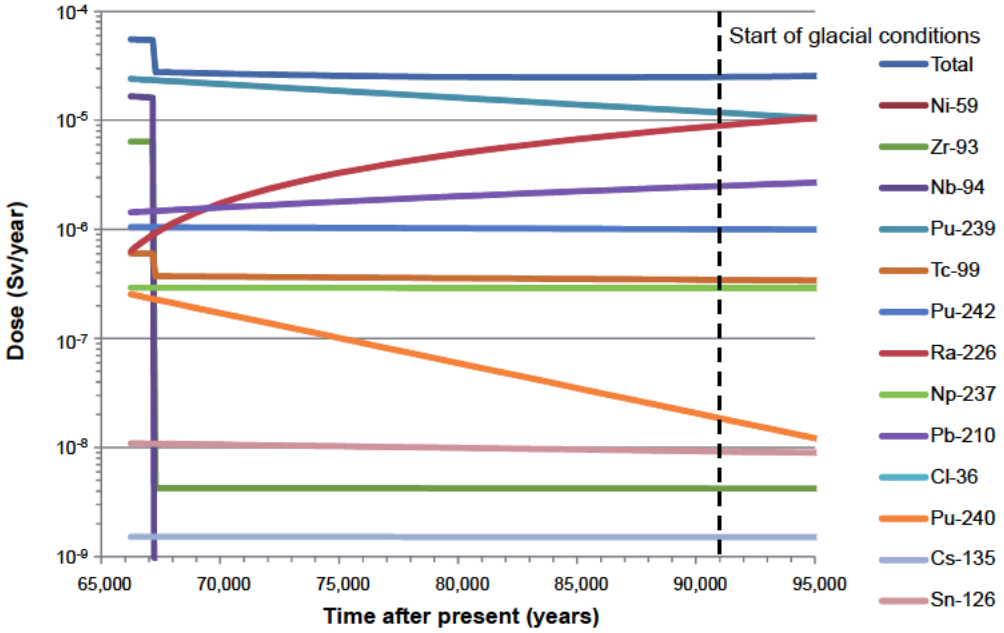


Figure 14-5. *Calculated effective dose from using water in the open shafts and ramp as drinking water and for irrigation (Figure 6-19 in the* ***FHA report****).*

付図 3-2　SR-Site における" Incompletely sealed repository"シナリオの評価結果
（縦軸の誤記を修正）(SKB, 2010a を一部修正)

(2) Dossier 2005 Argile における地下坑道及びアクセス坑道におけるシーリングシステムの機能不全を想定した評価

- Dossier 2005 Argile では、基本シナリオ（Normal evolution scenario）における種々の仮定が成立せず一部の安全機能が十全ではないことを想定した代替シナリオ（Altered evolution scenarios）（ANDRA, 2005a）について定量的な安価解析を行うことにより、多重バリアシステムが将来予測に含まれる種々の不確実性にどの程度の耐性を有するかを評価している。
- “Seal failure”シナリオは、上記の代替シナリオ（Altered evolution scenarios）の一つとして想定されているものであり、Dossier 2005 Argile における長期的安全確保の中心となっている極めて低透水性の粘土層の安全機能がシーリングシステムの機能喪失によって脅威に晒されることを想定し（ただし、機能喪失に至る具体的な過程を想定したシナリオを構築してその生起可能性を検討しているという記載箇所は見当たらない）、その場合の影響を把握することを目的として定量的な核種移行解析が行われている。
- “Seal failure”シナリオでは、アクセス坑道、地下坑道及び止水プラグ等のいずれかあるいは全てが機能喪失して連続した高透水性の経路が形成されることを想定し、基本シナリオで想定している粘土層中の極めて遅い移行経路をショートカットする代替的な経路として核種移行解析を行なっている。
- “Seal failure”シナリオのうち、アクセス坑道、地下坑道及び止水プラグの全てが機能喪失し連続した高透水性の経路が形成されることを想定し、かつ、鉛直上方への動水勾配を仮定した最も悲観的なケースでは、付図 3-3 及び付図 3-4 に示すように、透水性の上昇した地下坑道が周囲の岩盤から地下水を集水し、それが端部に位置する高透水性のアクセス坑道（立坑）に流入して速やかに地表に至るという流動場が形成されている。

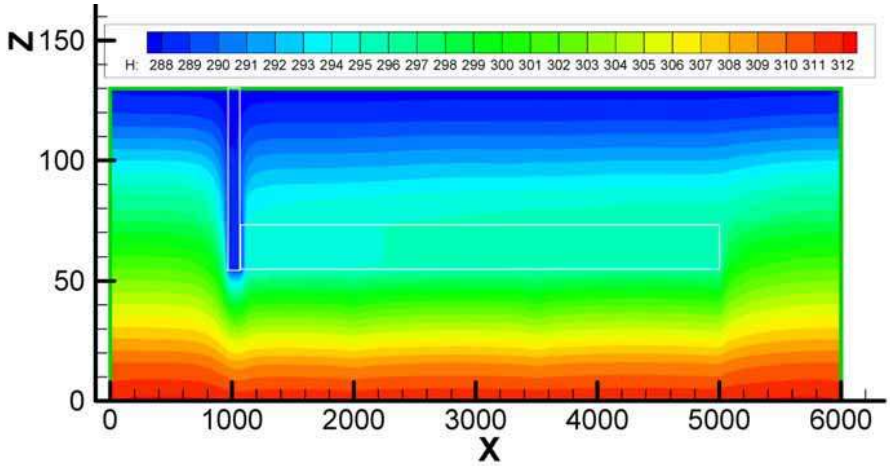


Figure 7.2-9 'Seal failure' altered evolution scenario - Vertical cross-section through the connecting structures and shafts – Piezometry in CU1 spent fuel repository zone – All seals defective

付図 3-3　鉛直断面における水頭分布（ANDRA, 2005a）（シール機能が失われて透水性の上昇した立坑に沿って上部の低い圧力が深部にまで至っており（青色）それと連絡した比較的透水性の高いシール機能不全の処分坑道でも周囲の岩盤よりも若干水頭が低下している（薄い緑色））

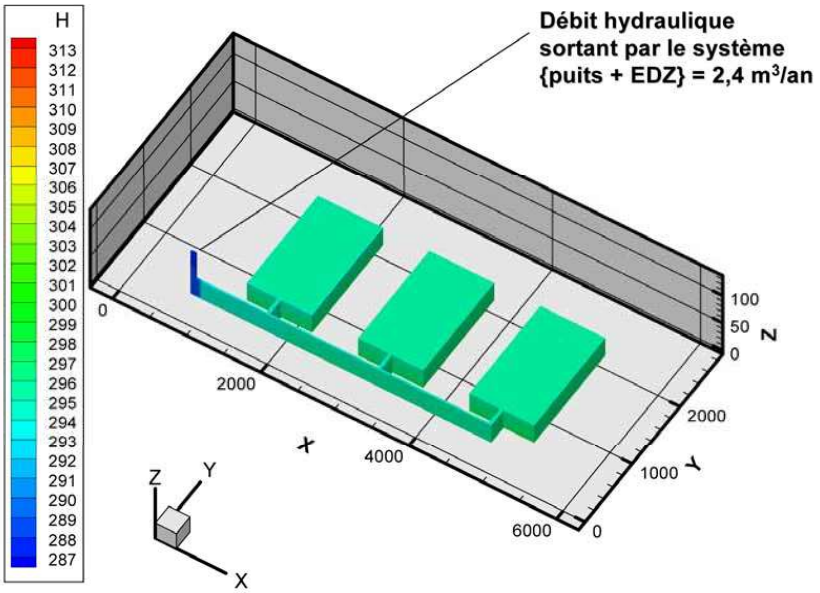
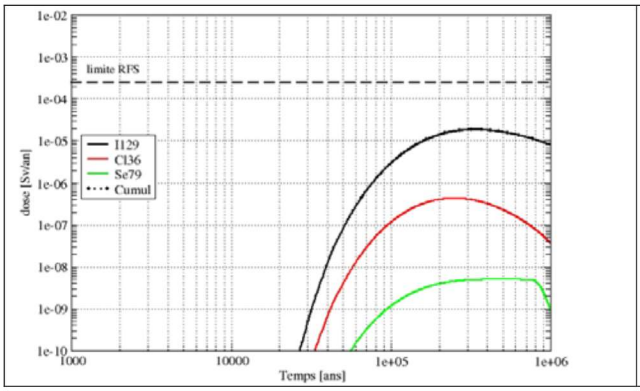


Figure 7.2-11 'Seal failure' altered evolution scenario – CU1 reference package – Hydraulic flow exiting the access structures – All seals defective – Reference calculation

付図 3-4　地下坑道及びアクセス坑道の水頭分布（ANDRA, 2005a）（周囲よりも 4m 程度水頭の低い各処分パネルに集水された地下水がさらに水頭の低い立坑底部に至りそこから鉛直上方へと流出する）

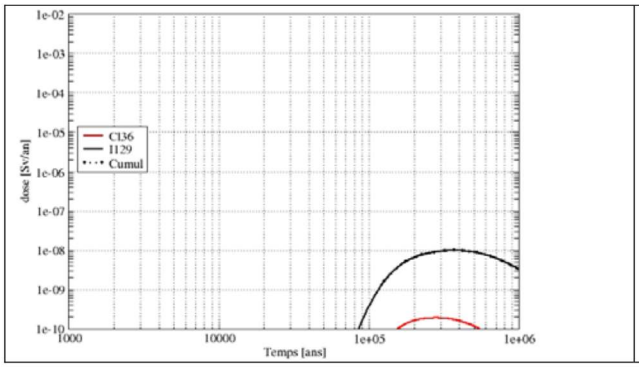
上記の想定では、地下坑道及びアクセス坑道の透水性がどれほど上昇しようとも、その高透水性経路を通過する地下水の流量は、周囲の低透水性の粘土層から地下行動に流入する地下水フラックスによって制限されることとなる。このため、このシナリオにおいて立坑を通過する地下水流動は 2.4 m^3/y に過ぎず、多孔質媒体近似された地下坑道及びアクセス坑道を経由して廃棄体を通過した流れが地表に至るまでの時間は 25 万年を要する。

- このような極めて遅い流速で、かつ、坑道内の制限された断面積でのみ生ずる移流による核種移行の影響は、処分場パネルの全ての面積において生ずる粘土層中の拡散による核種移行に比して顕著に（3 桁以上）小さく、無視し得るほど小さいものとされている（付図 3-5）。



RN	DoseMax[Sv/an]	t(DoseMax)[an]
Cumul	1.9E-05	3.3E+05
I129	1.8E-05	3.4E+05
Cl36	4.3E-07	2.5E+05
Se79	5.0E-09	4.7E+05

Figure 7.2-25 Seal failure altered evolution scenario – All situations – Reference calculation – Dose rate history for the transfer pathway through the host formation – CU1 reference package



RN	DoseMax[Sv/an]	t(DoseMax)[an]
Cumul	9.9E-09	3.7E+05
I129	9.7E-09	3.7E+05
Cl36	1.9E-10	2.8E+05

Figure 7.2-23 Seal failure altered evolution scenario – All seals defective – Reference calculation – Dose rate history for the transfer pathway through the engineered structures – CU1 reference package

付図 3-5　アクセス坑道、地下坑道及び止水プラグの全てが機能喪失し連続した高透水性の経路が形成されることを想定したケースにおける被ばく線量評価結果（ANDRA, 2005a）（上：天然バリア（粘土層）を経由して生活圏に至る核種による被ばく線量、下：アクセス坑道及び地下坑道を経由して生活圏に至る核種による被ばく線量）

(3) Opalinus clay：Modelling of Radionuclide Transport along the Underground Access Structures of Deep Geological Repositories (NAGRA, 2014) におけるシーリングシステムの機能不全を想定した評価

- HLW 及び SF を対象として、主要なバリア機能である粘土層の低透水性に対して脅威となり得るシーリングシステムの機能低下及び坑道に沿った地下水流動経路の形成を想定して安全評価を行っている（付図 3-6）。
- シーリングシステムの機能低下に至るプロセスを具体的に想定したシナリオを構築している訳ではなく、シーリングシステムの機能低下が生じた場合の影響の規模を把握するための what if 解析という位置づけにある。

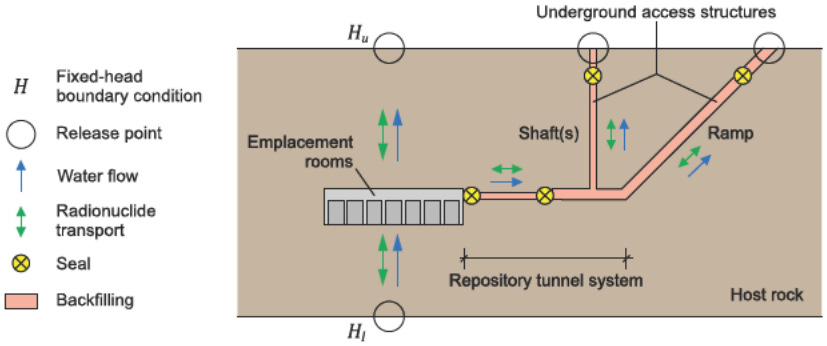


Fig. 1.2-1: Overview of the conceptual model for a scenario with radionuclide transport along the tunnel system and the underground access structures of a deep geological repository.

付図 3-6　Opalinus clay におけるシーリングシステム機能低下を想定したシナリオの概念（NAGRA, 2014）

- 解析結果は Dossier 2005 Argile の場合と同様、処分パネルが dead-end となるようにアクセス坑道を一箇所に限定して配置（付図 3-7）することにより、坑道に沿った流動経路の透水性がどれほど高くなっても周囲の低透水性の粘土層から坑道に流入する地下水流量が律速となるため坑道内の地下水流量は小さく（流速も極めて遅く）、レファレンスケースで想定されている粘土層中の核種移行に対してその影響は無視し得るほど小さいという結論が得られている。
- Dossier 2005 Argile と比較して、水理及び核種移行解析の手法に関する情報が多く記載されており、解析モデルやパラメータ設定に関して参考になるところが大きいと考えられる。
- 水理解析においては、各坑道を下記のような簡易な流動経路のネットワークとして表現し（各坑道区間を「抵抗」として表現）、各部位の透水性を種々に変動させたケーススタディを行っている。

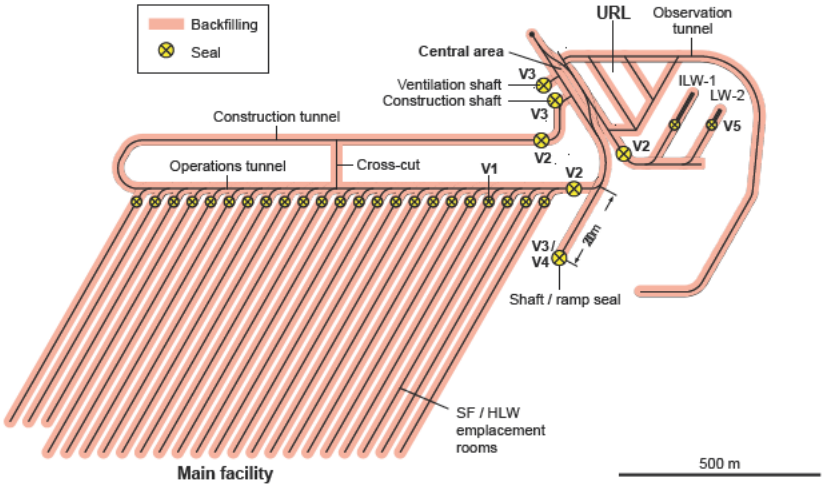
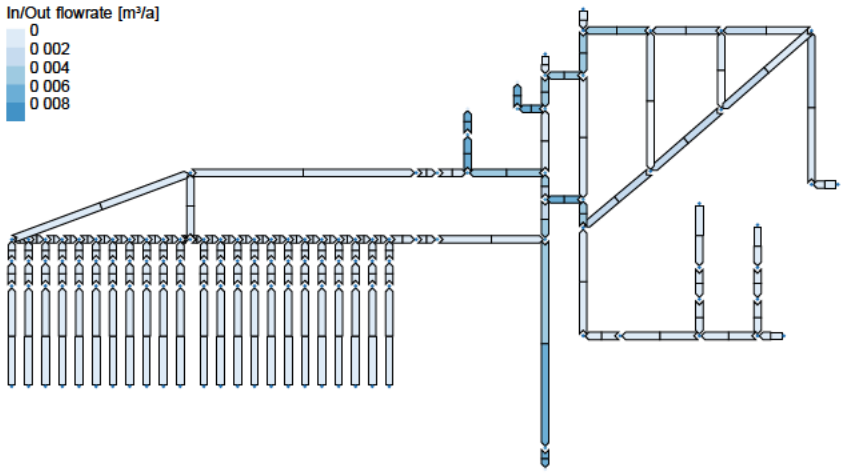


Fig. 2.2-1: Layout of the backfilled and sealed HLW repository.

付図 3-7　HLW 処分場の坑道レイアウト（NAGRA, 2014）



付図 3-8　上記の坑道レイアウトに対応して作成した簡易なネットワーク水理モデル及び解析結果の例（各坑道を通過する地下水の流量分布）（NAGRA, 2014）

- 上記の水理モデルにおける各坑道区画をシステム性能評価モデル（PICNIC）を用いて以下のように簡易に表現（付図 3-9）し、これらを付図 3-8 に示すネットワークに即して配置することで核種移行解析を行っている。なお、ここでは、坑道に沿った核種移行経路は坑道内部の埋め戻し材、EDZ 及び割れ目（オプション）という多重円筒で構成されると考え、さらに、この多重円筒を展開して（拡げて）多層の平板としてモデル化している（実際には単位長さの幅を持つ一次元要素）。
- 上記の水理及び核種移行モデルを用いたケーススタディにより、坑道の透水性を大きく変動させた場合、透水性上昇に伴いピーク時刻は徐々に早期に出現することとなるものの被ばく線量の最大値に顕著な上昇はなくいずれの場合も無視し得るほど小さいと結論づけている（付図 3-10）。

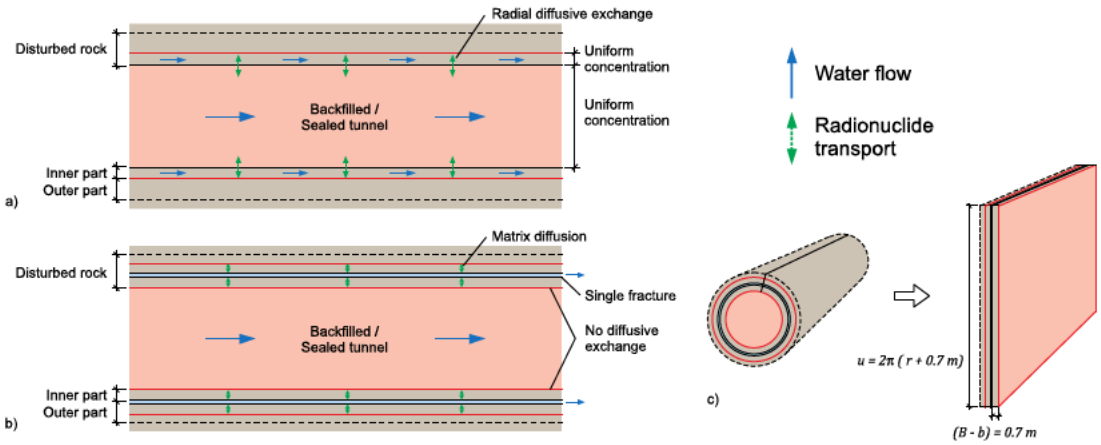
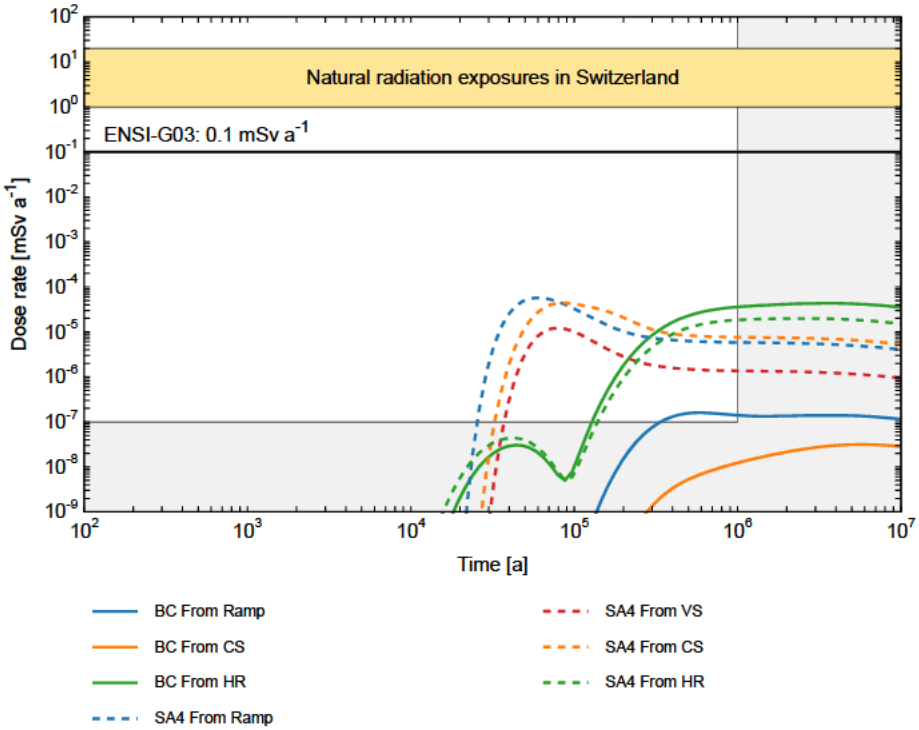


Fig. 4.3-1: Different conceptualisations of the EDZ used in *SA4* (a); and *SA4_EDZ1* and *SA4_EDZ2* (b); modelling the EDZ as a single planar fracture with matrix (c).

付図 3-9　各坑道区間における簡易な核種移行モデルの概念（NAGRA, 2014）



付図 3-10　核種移行解析結果（被ばく線量）の例（NAGRA, 2014）（実線：ベースケース、点線：シーリングシステムの透水性を極めて高く設定した代替ケース

(4) 各安全評価事例の詳細な調査・分析

前項の内容を踏まえて海外の安全評価においてシーリングシステムの機能不全が生じた場合のシナリオに関して、以下の項目の詳細な調査を実施する。

1. SR-Site の FHA（Future Human Actions）で取り扱われている Incompletely sealed repository シナリオにおける、銅製キャニスタの機能喪失をもたらす要因の詳細な調査
2. シーリングシステムの機能不全を想定した場合の地下水流動解析について、上記の SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオの他、Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay の“Seal failure”シナリオを対象とした調査
3. 2.で示した 3 つのシナリオを対象とした、高透水性となった坑道中の核種移行解析についての調査
4. 2.で示した 3 つのシナリオを対象とした、生活圏の想定に関する調査

上記のそれぞれについて、さらに付表 3-1、付表 3-2 に具体的な調査項目を示す。

付表 3-1　詳細な調査・分析を行う調査項目一覧(1/2)

	調査項目	調査内容
1) SR-Site の Incompletely sealed repository において銅製キャニスタの機能喪失をもたらす要因について	①FHA を想定した場合の処分坑道埋め戻し材の透水性上昇について	FHA として仮想的に主要坑道が埋め戻されないまま放棄されたと仮定した場合にどのような過程で処分坑道埋め戻し材の透水性が上昇しアクセス坑道を経由して引き込まれる溶存酸素の処分坑道（上部坑道）内での濃度が上昇するか。
	②上部坑道埋め戻し材の膨出について	(1)①の過程において上部坑道埋め戻し材の膨出による密度低下が生じた場合に処分孔内の緩衝材の膨出による密度低下は考慮しているのか。考慮していないとすればどのようにして回避されると論証されているか。
	③上部坑道内の溶存酸素の影響について	上部坑道内の溶存酸素が処分孔内の緩衝材を拡散で移行するフラックス及びそれによる銅製キャニスタの腐食速度をどのように評価しているか。なお、シナリオを想定する際の考え方やモデル及びパラメータ設定の根拠等も含む。
	④例外的な位置においてのみ早期の腐食開口が生ずるという想定の論拠	(1)②及び③を踏まえて、処分坑道内の多数の銅製キャニスタの腐食が一様には進展せず高透水性の割れ目との交差部付近のような例外的な位置においてのみ早期の腐食開口が生ずるという（安全評価上好都合な）想定はどのような論拠で支持されるのか。
	⑤規制機関からのコメント	このシナリオに対して規制機関からどのようなコメントがあったか。
	⑥FHA 以外のシーリングシステムの初期欠陥や経年劣化等を想定したシナリオの調査	人間活動の不確実性に対するロバスト性を把握するための本シナリオ以外に SR-Site メインレポート以外の下位の技術資料等でシーリングシステムの初期欠陥や経年劣化等を想定してその影響を検討したシナリオは無いか。
2) シーリングシステムの機能不全を想定した場合の地下水流動解析について	① SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおける地下水流動解析	SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおいて温暖期及び寒冷期で逆転する「地表からアクセス坑道及び地下坑道を経由して地表に戻る流れ」の根拠となる地下水流動解析の内容（シナリオ構築の考え方や根拠等も含む）。
	② Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay の“Seal failure”シナリオにおける地下水流動解析	Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay の“Seal failure”シナリオにおいて、透水性の上昇した地下坑道が周囲の岩盤から地下水を集水し、それが端部に位置する高透水性のアクセス坑道（立坑）に流入して速やかに地表に至るという流動場の根拠となる地下水流動解析の内容（シナリオ構築の考え方や根拠等も含む）。
	③ Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay のアクセス坑道の本数について	Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay において SR-Site と同様にアクセス坑道から流入した地表水が地下施設を経由して別の立坑（換気用立坑等）から流出する流動を想定すると主要なバリアである低透水性の粘土層の安全機能が完全に無力化されることとなるが、このような状況を回避するために、アクセス坑道は一箇所のみに掘削することとしているのか。また、そのことによって換気や避難経路確保等の操業時安全性への懸念は生じないか。

付表 3-2　詳細な調査・分析を行う調査項目一覧(2/2)

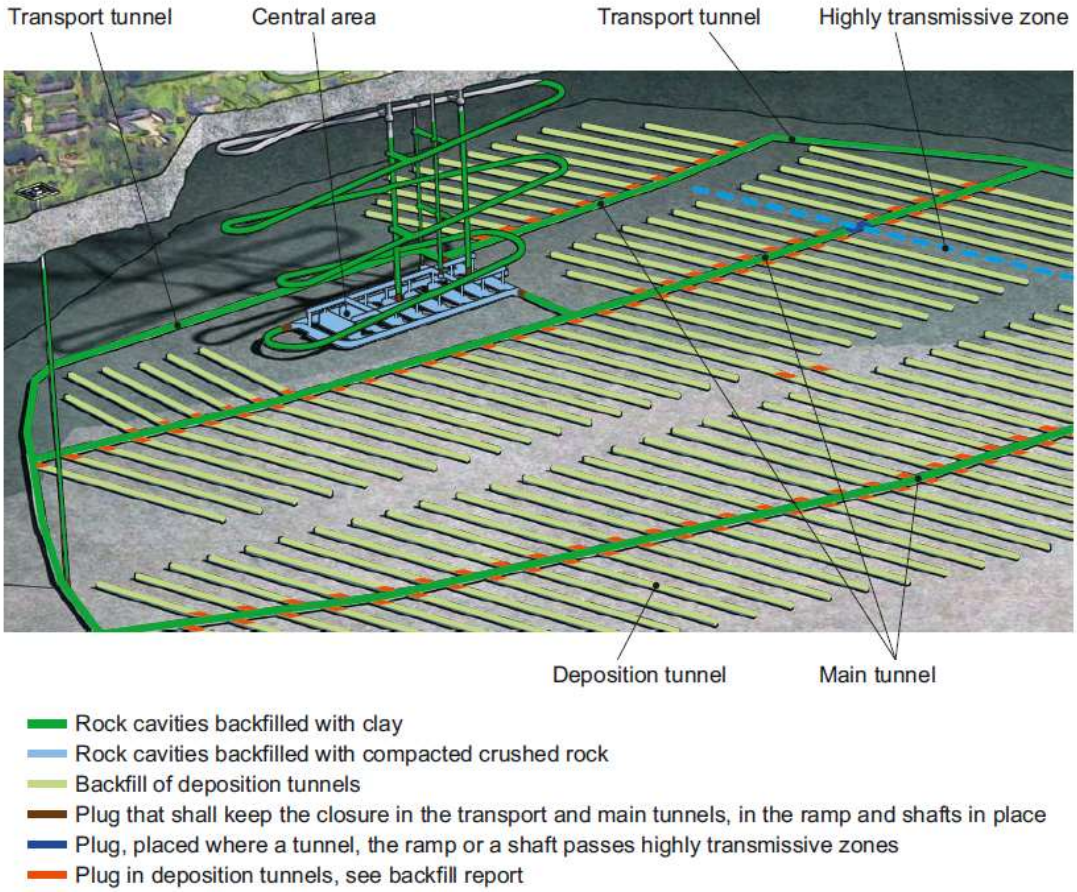
	調査項目	調査内容
3) 高透水性となった坑道中の核種移行解析について	① SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおける核種移行解析の考え方	SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおける、アクセス坑道、主要坑道及び処分坑道それぞれにおける核種移行解析モデル及び核種移行特性に関する条件設定やパラメータ値等（シナリオ構築の考え方や根拠等も含む）。
	② Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay の "Seal failure" シナリオにおける核種移行解析の考え方	Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay の "Seal failure" シナリオにおける、アクセス坑道、主要坑道及び処分坑道それぞれにおける核種移行解析モデル及び核種移行特性に関する条件設定やパラメータ値等（シナリオ構築の考え方や根拠等も含む）。
4) 生活圏の想定について	① SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおける生活圏の考え方	SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオでは、排水位置となるアクセス坑道地表入り口部での飲用水摂取や灌漑水としての利用が想定されているが、その際の希釈倍率の考え方や被ばく経路をどのように想定しているか（特に、氷床の発達している寒冷期に灌漑水を用いた農耕を行うことは考え難いが生活圏モデルをどのように想定しているのか（あえて気候変動とは整合させず仮想的に最も悲観的な想定を採用している？）
	② Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay の "Seal failure" シナリオにおける生活圏の考え方	Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay の "Seal failure" シナリオにおいてアクセス坑道から地表に流出する核種については通常の天然バリア経由のものとは異なる GBI（Geosphere Biosphere Interface）を想定する必要が生ずる可能性があると考えられるがどの様な生活圏モデルを用いているか（SR Site の場合の様に、アクセス坑道地表入り口部での飲用水摂取や灌漑水としての利用を想定した場合（希釈なし）、核種移行フラックスとしては天然バリア中に比して顕著に小さくとも線量換算係数が極めて大きくなるために全体として無視できなくなる様なことはないか）。

1) SR-Site の Incompletely sealed repository において銅製キャニスタの機能喪失をもたらす要因

① FHA を想定した場合の処分坑道埋め戻し材の透水性上昇について

- SKB(2010a)によれば、ここで仮定している状況は、具体的には以下のようなものである。中央部、坑道、ランプ、シャフト（付図 3-11）は地下水流動場と接続している
- 処分坑道端部にあるプラグは急速に劣化し、埋め戻しは、主要坑道内を流れる水中に膨出する
- 主要坑道内を流れる水は大気で飽和され、水中に溶解した酸素は処分坑道内のキャニスタに輸送される。また、地下水中に溶解した硫化物によってキャニスタの腐食が生じる。
- キャニスタの腐食による破過後、核種は、開放坑道を通って流れる水中に運び出され、さらに地表まで運ばれる。
- ランプ及びシャフト内の水は、人間によって使用され、その際に放射性核種の影響を受ける。

以下、上記の状況について、（定性的にではあるが）より具体的に記述する。



付図 3-11　処分坑道閉鎖のリファレンスデザイン（SKB, 2010a）

処分場内の主要坑道及びアクセス坑道、中央領域、シャフトが開いている状態で処分場が放棄されると、その部分に地下水が浸入するようになる。地下水は、動水勾配に従い、これらの開放領域を通って流れるようになる。また、開放容積は、処分場基盤の地下水流動に影響を及ぼし得る。

処分場が放棄され、主要坑道が水で満たされると、コンクリートプラグ中のセメント等の成分が水に溶解し、運び去られ得ることになる。すると、ある時点でプラグはその機能を失い、処分坑道内の埋め戻し材が主要坑道内に膨潤する。この主要坑道内への膨潤により、処分坑道内の埋め戻し材の密度は低下する。もし処分孔より上の埋め戻し材の密度が著しく減少する場合、処分孔内の緩衝材が上部の埋め戻し材部分に広がり、その結果、緩衝材の密度も減少することになる。このような緩衝材の密度低下が発生すると、移流が緩衝材中の溶質輸送の支配的な過程となる。

表面からの出入り口を閉鎖することなく処分場を放棄すると、地表から酸化性の地下水が、中央領域及び主要坑道へ涵養しやすくなる。さらに、処分場のシールされていない部分は、空気を含んでおり、これが水中に溶解する。溶存酸素は、処分坑道内の埋め戻し材及びベントナイト緩衝材を経由して、あるいは処分坑道やベントナイト緩衝材を通過する岩盤内の亀裂を経由して銅製キャニスタに到達した場合、キャニスタが腐食し、キャニスタ内の腐食破過及び使用済み燃料

からの放射性核種の放出につながり得る。

腐食がどの場所で、どの時点で発生するかは、キャニスタ表面への酸素の供給に依存する。岩盤の深部から亀裂を経由して涵養する場合は、還元性の地下水が供給されることになるため、溶存酸素濃度が低くなる可能性が最も高い。

氷河期には、氷床によって動水勾配が高くなり、氷河融解水が下降することによって、地表から処分場へ大量の酸素の供給が起こる可能性が高い。しかし、処分場の地下水中に溶解した酸素はまた、有機物との反応や及び岩盤中の還元性の鉱物との反応、さらに処分場内に使用された鉄系材料との好気性腐食反応によって消費され得る。

主要坑道を経由して処分坑道内のキャニスタへの溶存酸素の輸送は、処分坑道内の埋め戻し材やキャニスタを取り囲むベントナイト内の移流または拡散プロセス、もしくは処分坑道と主要坑道を接続する割れ目中を流れる地下水によって行われる。これらのプロセスの際にも、埋め戻し材や緩衝材に使用されるベントナイト中の鉱物との化学反応や、埋め戻し中の微生物の活動によって、酸素を消費することが期待される。

フォルスマルクの地下水は、キャニスタを腐食させる可能性のある硫化物を含んでいる。さらに、ベントナイトは、無酸素条件下で地下水中の硫酸塩を硫化物へ微生物還元し得る有機物を含有する。処分坑道内の緩衝材が膨出することができる程度まで、埋め戻し材密度が低下しない限り、ベントナイト緩衝材中の微生物による硫酸塩の還元が発生することは考えられないが、そうでない場合、緩衝材中の密度が低下して微生物の活動が活発になり硫酸塩を還元することが有り得る。微生物分解のために利用可能なベントナイト中の有機物はフミン酸やフルボ酸が考えられるが、その必要量は非常に不確実である。

② 上部坑道埋め戻し材の膨出について

上部坑道の埋め戻し材膨出の解析結果の概要がSKB(2010a)に記載されている。解析の詳細はSKB(2010c)の22章に記載されている。

処分坑道から主要坑道への埋め戻し材膨出を考慮する場合、プラグがどの程度失われるかという点を考慮する必要がある。現実的には、プラグの構成要素が全て失われることはないと考えられるが、プラグがどの程度失われて、開口部の大きさがどの程度になるかという予測は困難であるため、ここでは悲観的に、プラグ全体が失われることを想定して検討を行っている。

処分坑道から主要坑道内への埋め戻し材の膨張は、埋め戻し材の膨潤圧が駆動力となり、埋め戻しと岩盤面との間の摩擦や他の坑道からの埋め戻しの膨張によって抑制される。埋め戻し材の膨潤は、いずれの坑道からも同様であると仮定されているため、処分坑道の中間で停止する。すなわち、主要坑道に沿った処分坑道の間隔は 40m であるため、埋め戻し材は、主要坑道に沿って 20 メートルを超えて膨潤することができない。この状態を付図 3-12 に示すような簡単な 1 次元モデルで表現し、埋め戻し材の膨出計算を行った。また、その結果の内、膨潤圧が 3MPa（初期乾燥密度 1,470kg/m^3）、10MPa（初期乾燥密度 1,600kg/m^3）のケースのものをそれぞれ付図 3-13 および付図 3-14 に示した。

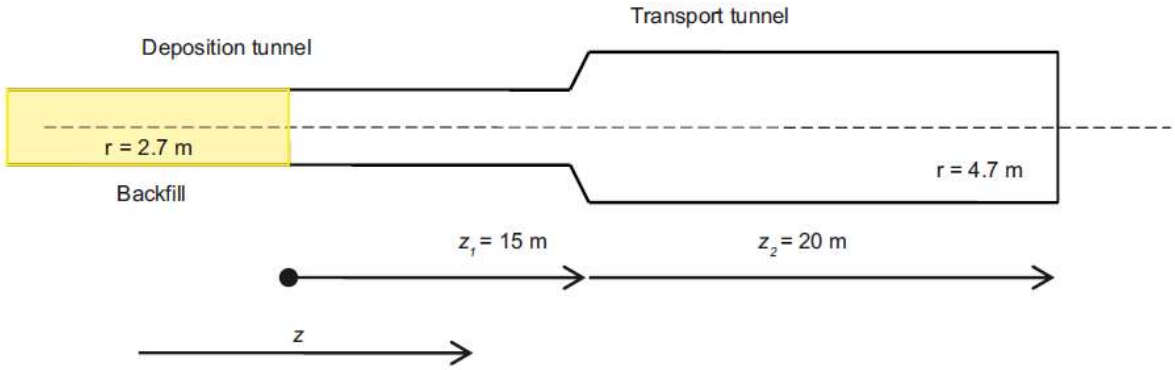
これらの図は、埋め戻し材最前部までの距離に応じた乾燥密度の値を計算したものであり、埋め戻し材と岩盤との摩擦角が 10 度の場合と 20 度の場合とで計算している。図中の点線は距離に応じた乾燥密度の損失計算に使用された値を示している。図中の領域 1 では、元々埋め戻し材が

存在していた領域なので、膨出が起きた際に、乾燥密度が初期の値より低下することを示しており、領域 2、 3 ではその逆である。

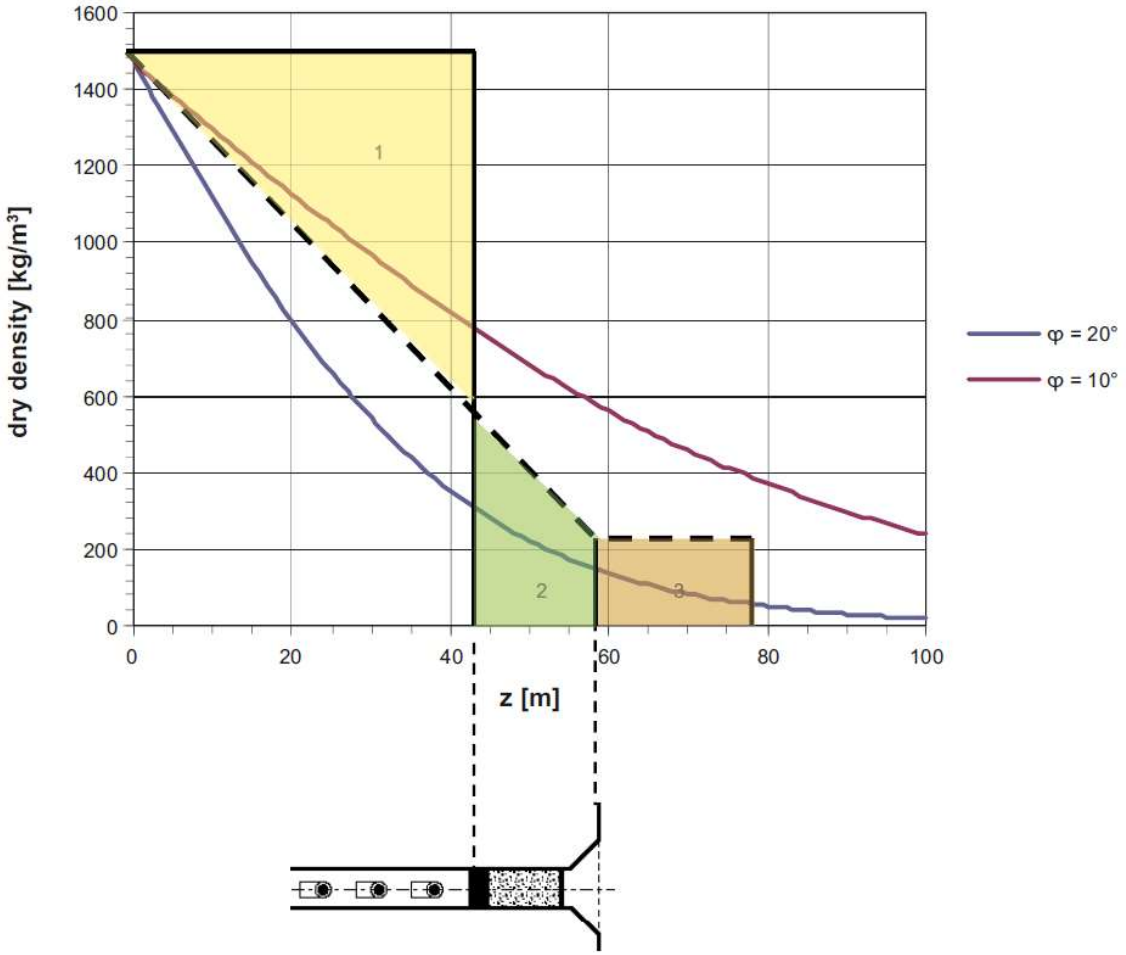
解析の結果、これらの初期乾燥密度を有する埋め戻し材が主要坑道中に膨潤した場合、その乾燥密度は非常に低くなり(図中の領域 3)、230 kg/m^3 未満であることを示している。この状態は、400%を超える水分比率に相当し、ゲルというよりもむしろ液状と考えるべき状態である。

解析の結果、埋め戻し材の濃度低下の処分坑道内への影響は、埋め戻し材と（劣化した）プラグとの界面から 40~50 m 程度（付図 3-13 や付図 3-14 の領域 1）に達し、さらにこの界面から 25~35m の位置では、許容基準である 1,240 kg/m3 未満の乾燥密度になることが示された。処分孔は処分坑道の入口 20.6 m よりも近い部分には位置しないので、埋め戻し材の喪失による影響は、坑道入口から（多くても）4~5 個の処分孔内の緩衝材の濃度低下につながる可能性があることを意味する。

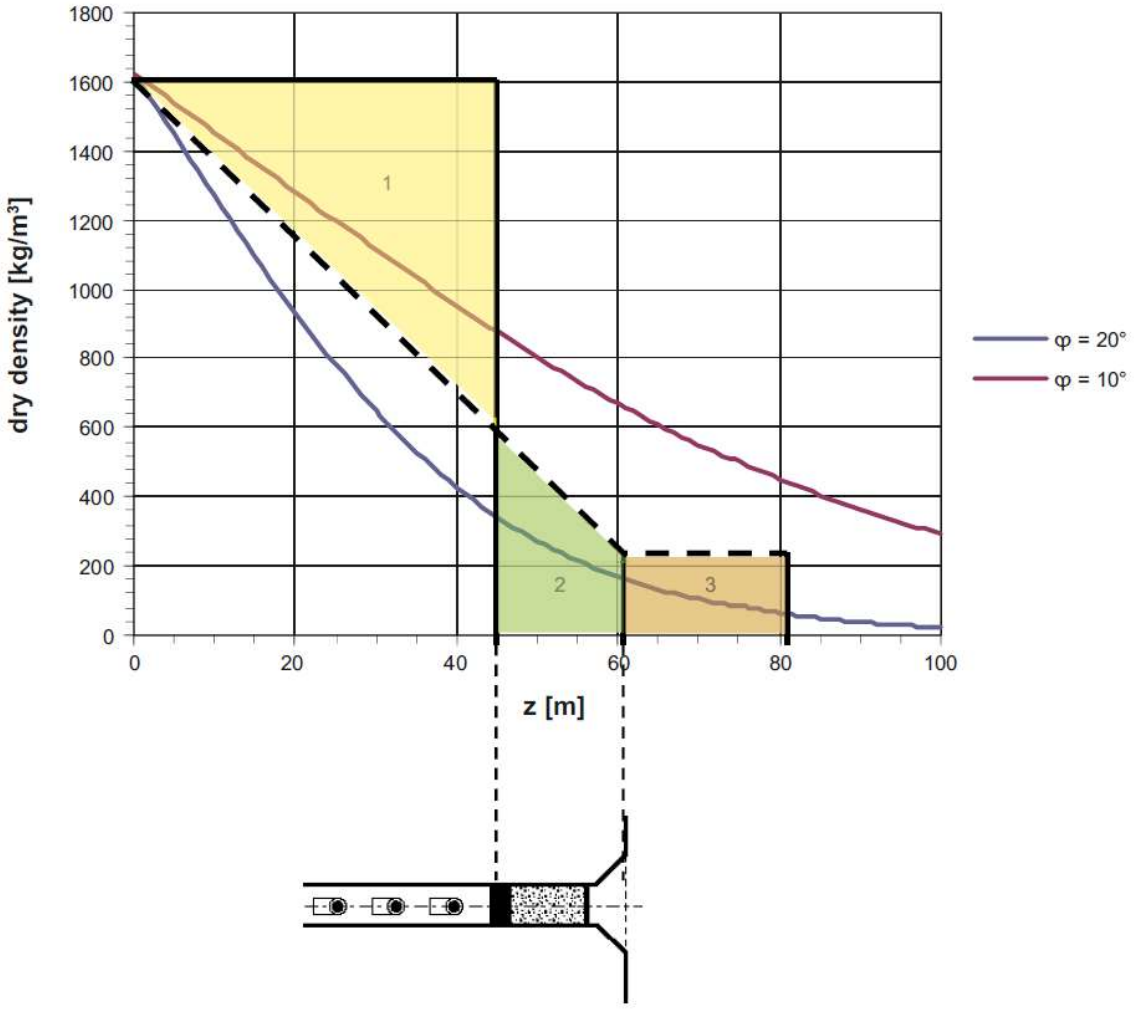
なお、この検討では、隣の処分坑道のプラグも損傷することが仮定されている。隣接する処分坑道のプラグが無傷であり、埋め戻し材が残っているような場合に、処分坑道内埋め戻し材が自由膨張する場合の定量的な解析はなされていない。この場合、定性的には、より多くの埋め戻し材が主要坑道内に広がることになるため、上記の検討結果と比較して、埋め戻し材の乾燥密度が許容基準未満になる範囲が広がり、その影響を受ける処分孔の数も多くなることが予想される。しかし、その処分孔の個数を厳密に見積もることは、後段の核種移行解析の観点からは重要ではないとしている。



付図 3-12　埋め戻し材膨出計算に用いられた 1 次元モデル（SKB, 2010a）



付図 3-13　埋め戻し材未変質点からの距離に応じた乾燥密度の計算結果
（埋め戻し材膨潤圧=3MPa）（SKB, 2010c）



付図 3-14　埋め戻し材未変質点からの距離に応じた乾燥密度の計算結果
（埋め戻し材膨潤圧=10MPa）（SKB, 2010c）

③ 主要坑道内の溶存酸素の影響について

本項では、主要坑道内の溶存酸素の処分孔への移行や、それによる銅製キャニスタの腐食速度の評価について記載する。また、シナリオを想定する際の考え方やモデル及びパラメータ設定の根拠等についても述べる。

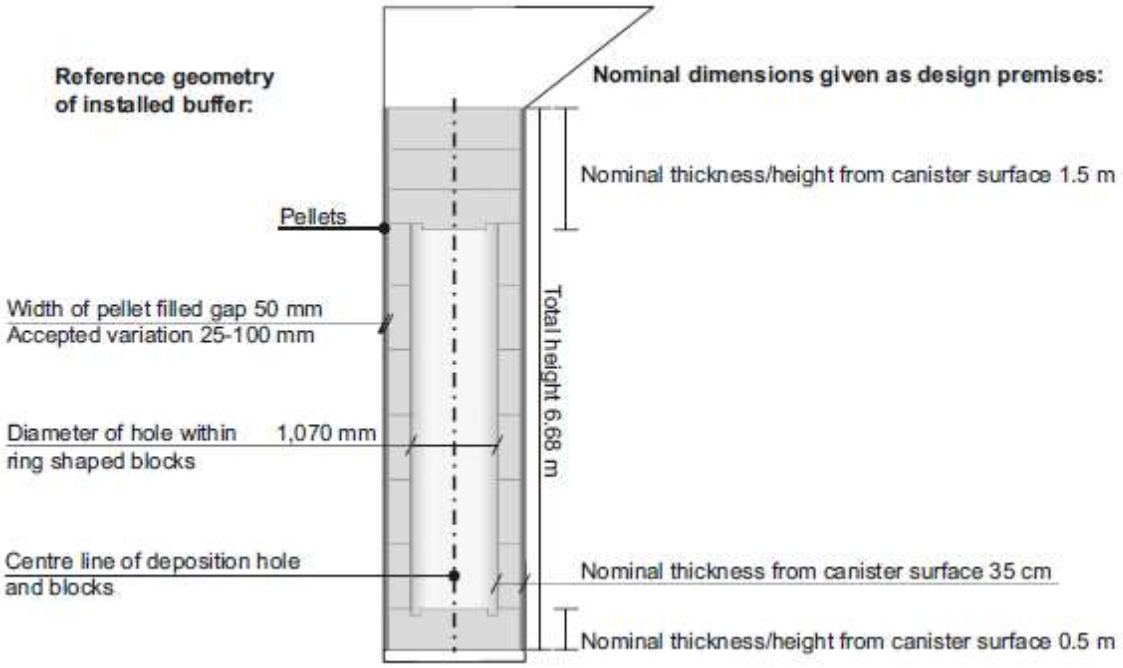
SKB(2010a)では処分場内の坑道が解放されている場合の溶存酸素によるキャニスタ腐食を評価するために、以下のような簡単な計算を行っている。

まずキャニスタ上部坑道ホール内の拡散抵抗のみを考慮すると、処分孔上方の処分坑道内の水からキャニスタ蓋部までの、ある化学種の定常状態の拡散フラックス F は、以下のように表すことができる。

$$F = \frac{D_e \cdot A\ C}{x}$$

ここで、D_e [m²/s]は実効拡散係数、A [m²]は拡散の起こる断面積、C [mol/m³]は処分孔上方の化学種の濃度、x [m]は拡散距離を表す。

この計算では処分孔上部の処分坑道中の水分は溶存酸素で飽和しており、酸素は蓋の上方の厚さ 1.5m のベントナイト緩衝材を通ってキャニスタに輸送されると仮定している（処分孔のジオメトリは付図 3-15 を参照のこと）。温暖な条件では、緩衝材上部の酸素濃度は 0.3mol/m³、すなわち大気中の酸素と平衡状態に設定され、氷河条件においては、氷河融解水（Sidborn et al, 2010）[1)]中の酸素濃度に対応した 1.5mol/m³ と仮定されている。



付図 3-15　処分孔内のリファレンスデザイン（SKB, 2010d）

溶存酸素に対する実効拡散係数は SR-Site Data report（SKB, 2010e）中の非荷電化学種に対する実効拡散係数である 10^{-10} m²/s を仮定する。この時、緩衝材上部 1.5m の部分を拡散してきた後の緩衝材（直径 1.75m（SKB, 2010e）の全断面積を通る酸素のフラックスは、1 次元の拡散を仮定すると、1.5×10^{-3} mol/yr と計算される。

さらに、この酸素が、次の反応に従って O_2 1mol あたり 4mol の Cu が即座に反応すると仮定する。

$$4Cu + O_2 \rightarrow 2\ Cu_2O$$

ここで、銅の密度(8,920 kg/m³)及び銅蓋の断面積(0.87 m²)から、蓋に供給される酸素 1 モル当たりの腐食深さは 33μm である。以上のような計算により、種々の条件を想定した場合のキャニスタ蓋（厚さ 50mm）にの腐食破過時期を計算した結果が付表 3-3 である。例えば、酸素濃度 0.3 mol/m³、実効拡散係数 10^{-10} m²/s、酸素供給量 1.5×10^{-3} mol/year を仮定した場合、腐食破過が起こるまでに 100 万年を要することになる。また、ベントナイトを経由の拡散が、上記のようにキ

ャニスタの側部ではなく、キャニスタの蓋の部分の面積に対応した断面積を経由して生じると仮定する場合（付表 3-3 の下半分）、腐食破過までの時間は上記の約 3 倍長くなる。仮に不圧水中での 10 倍大きい拡散係数を使用する場合でも、腐食破過が起こるまでの時間は 100,000~300,000 年になる。

氷期の高濃度の溶存酸素（1.5 mol/m^3）の場合、緩衝材が劣化していない場合の破過時間は 200,000~600,000 年、キャニスタ上部の緩衝材が失われ、酸素の拡散が水中のみで起こると仮定した場合には、約 20,000~60,000 年の破過時間になる。

付表 3-3　種々の条件を想定した、厚さ 50mm のキャニスタ蓋に対する腐食破過時期の推定（SKB, 2010e）

Case	Oxygen concentration (mol/m^3)	Effective diffusivity (m^2/s)	Oxygen supply (mol/year)	Time for corrosion breakthrough (years)
Diffusion through cross-sectional area corresponding to the diameter of the deposition hole; A = 2.4 m^2	0.3	$1\cdot10^{-10}$	$1.5\cdot10^{-3}$	$1.0\cdot10^{6}$
	0.3	$1\cdot10^{-9}$	$1.5\cdot10^{-2}$	$1.0\cdot10^{5}$
	1.5	$1\cdot10^{-10}$	$7.6\cdot10^{-3}$	$2.0\cdot10^{5}$
	1.5	$1\cdot10^{-9}$	$7.6\cdot10^{-2}$	$2.0\cdot10^{4}$
Diffusion through cross-sectional area corresponding to the diameter of the canister lid; A = 0.87 m^2	0.3	$1\cdot10^{-10}$	$5.5\cdot10^{-4}$	$2.8\cdot10^{6}$
	0.3	$1\cdot10^{-9}$	$5.5\cdot10^{-3}$	$2.8\cdot10^{5}$
	1.5	$1\cdot10^{-10}$	$2.7\cdot10^{-3}$	$5.6\cdot10^{5}$
	1.5	$1\cdot10^{-9}$	$2.7\cdot10^{-2}$	$5.6\cdot10^{4}$

上記の推定破過時間は、拡散が沈殿坑道中の埋め戻しにおける支配的な輸送メカニズムである限り、非常に悲観的である、としている。この計算は、処分孔上部の処分坑道中の地下水が酸素で飽和されていると仮定しているが、これは、処分坑道中で酸素が移流によって供給される場合にのみ起こり得るものである。

処分坑道の埋め戻し材中で拡散が支配的である限り、沈殿孔上部の酸素濃度が、計算で仮定された値まで増加するのにかなりの時間がかかることが示されている。

上記のシナリオでは、硫化物による腐食は、その破過時間が酸素の場合よりも著しく長いことが予想されるため、無視されている。この理由としては、予想される天然の硫化物濃度が、せいぜい 10^{-5} M で（Tullborg et al., 2010）、想定される酸素濃度よりも低いオーダーであること、また腐食反応の化学量論が、酸素の場合はモルあたり 4 モルの銅が消費されるのに対し、硫化物は 2 モルの消費であることを理由としている。

④ 例外的な位置においてのみ早期の腐食開口が生ずるという想定の論拠

SKB(2010a)によれば、Incompletely sealed repository シナリオにおける核種移行の前提条件として、は以下のようなものが示されている。

① 現在から約 58,000 年後まで持続する温帯条件の最初の期間中、キャニスタにおける腐食破過は起こらない。

② 66,200 年まで続くその後の氷河期の間に、高地下水流動を有する亀裂と交差し、処分坑道と（開放された）主要坑道との交差部の近くに位置する処分孔内の 1 つのキャニスタ

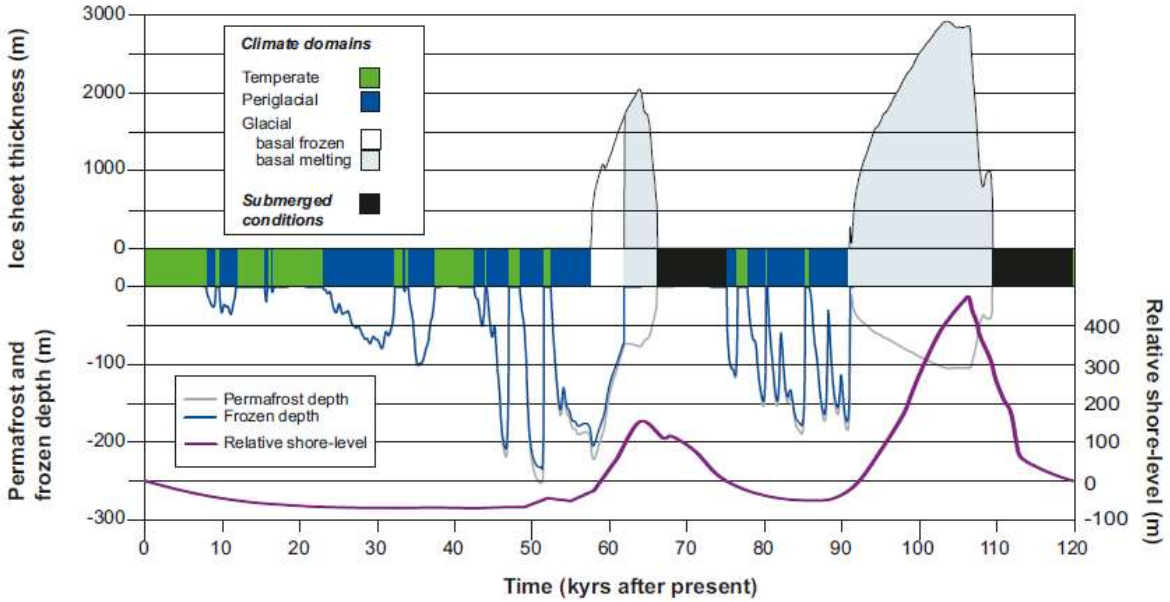
に腐食破過が起こる。

上記のうち、①については付図 3-16 に示したような気候変動についての検討から、現在から約 58,000 年後まで持続する温帯条件の間は、仮に処分坑道と主要坑道との間の交差部に近い処分孔内の緩衝材の密度が著しく低下し、酸素が銅キャニスタに到達したとしても、付表 3-3 に示したように、非常に悲観的に見積もっても破過時間が 100 万年かかるので、この期間には腐食破過は起こらないものと仮定している。

②については、氷期において、キャニスタ上部の緩衝材が失われた状況が、主要坑道との交差部の近くに位置する処分孔で発生するという状況が想定されている。この状況は、処分孔内の緩衝材の処分坑道への膨出が発生し、かつ処分孔に透水性の割れ目が交差し、地下水の移流によって緩衝材（と処分坑道中の埋め戻し材）が運び去られる可能性を想定したものである。

上記の想定について、SKB(2010a)によれば、「定量的な評価は行っていない」とのことで、なぜ 1 つのキャニスタに腐食破過が起こるのかという論拠となる計算等は示されておらず、以下は②および③項の記述からの論拠の推定である。

- 付表 3-3 に示した結果のうち、氷期の高濃度の溶存酸素（1.5 mol/m3）の場合で、キャニスタ上部の緩衝材が失われ、酸素の拡散が水中のみで起こると仮定した場合に約 20,000~60,000 年の破過時間になるとしており、地下水の移流が発生した場合にこれより十分短い時間で腐食破過が発生すると仮定したものと思われる。
- 「1 つのキャニスタに腐食破過が起こる」としているが、③に示したように、「埋め戻し材の喪失による影響は、坑道入口から（多くても）4~5 個の処分孔内の緩衝材の濃度低下につながる可能性がある」としているので、悲観的に考えるのであれば 4~5 個の処分孔内のキャニスタで腐食破過が起こると考えるべきと思われるが、この点については特に述べられていない。



付図 3-16　フォルスマルクにおける 12 万年の気候変動の概要
（SKB, 2010f）

⑤ Incompletely sealed repository シナリオに対する規制機関からのコメント

SR-Site のアセスメントに対してはスウェーデンの放射線安全機関（SSM）によって数多くのレビューが行われている。これらのレビューではアセスメントの前提条件や評価手法、発生しうる現象等の多様な側面からフォローしている。Incompletely sealed repository シナリオに対する規制機関からのコメントを調査するため、SSM のオンラインパブリケーションデータベースを利用し SR-Site の関連文書を抽出した。調査対象とした文献を付表 3-4～付表 3-7 に示す。付表 3-4～付表 3-7 に示される通り、SSM による多くのレビューは特定の地化学条件やキャニスタの腐食によって生じる物理化学プロセスの理解に重点が置かれており、シナリオそのものへのレビューは行われていない。

結論としては、Incompletely sealed repository シナリオに対する直接的なコメントは見当たらなかった。Bennet(2012)には、シナリオへのアプローチ全般に対して問題がないとの言及がある。また、Geier(2015)には以下のような記載がある。

"Coupled effects of two or more boreholes have not been analysed. Joyce et al. (2010) obtained results from such cases as a preliminary stage of modelling, but did not present the results. The main situation of interest would be if two boreholes combine to produce a U-tube type of enhanced flow path through a section of the repository.　Such a case seems unlikely as part of a future human intrusion scenario but could arise from a common mode failure of borehole sealing methods for site investigation boreholes. As the locations of all surface-based boreholes that are planned for the repository are already known, it would have been most meaningful to assess this possibility based on the positions of actual site-investigation boreholes".

付表 3-4　Incompletely sealed repository シナリオに対する規制機関からのコメントの調査(1/4)

ドキュメント番号 (著者)	タイトル	キーポイント
SSM 2012:24 (Bennet, 2012)	Initial Review of SR-Site Main Report	Section 2.2 においてシナリオ分析及びシナリオ選択に関する科学的な堅牢性を評価している。 *"SKB のシナリオは問題がなく、 あらゆる安全機能の瑕疵も見逃さないように体系的・網羅的に構築されている。ただし、たとえば、トンネルプラグの性能が低い場合の結果を現実的に評価するためのシナリオなど、いくつか現実とのギャップがある場合がある。"* ただし、 "incompletely sealed" シナリオへのコメントは見当たらない。 本レビューではシーリング機能に対して影響を及ぼし得るより一般的な現象（例えば緩衝材と埋め戻し材の均質化、トンネルプラグ性能の劣化、埋め戻し材と緩衝材の浸食）について詳細なレビューを行っている。
SSM 2012: 34 (Hicks and Baldwin, 2012)	Review of FEP handling in the SR-Site Safety Assessment: initial Review Phase	FEP 監査は、特定のシナリオに対するコメントとは関係ないが、次のような言及がある。 *"SKB FEP データベースでの FEP 及び FEP ハンドリングの説明が全般的に少なく、アプローチに多少の不整合がある。"* しかし"incompletely sealed"シナリオへの具体的な言及はない。
SSM 2012:29 (Apted and Arthur, 2012)	Initial review of chemical and erosional processes within the buffer and backfill – geochemical processes	緩衝材と埋め戻し材の両方の化学的及び侵食プロセスの詳細なレビューが実施されている。安全評価を満足する方法、モデルの最適化、データ及び安全機能の取り扱い方法、科学的手法の「健全性（soundness)」、不確実性の処理などが含まれる。シーリング欠陥及び関連するシナリオに関する具体的なコメントは見当たらない。
2012:55 (Little et al., 2012)	Review of SKB's radionuclide transport methodology	FEP の取り扱い、サイト情報とサポートデータ、及び結果と結論をサポートするための技術的議論が行われている。 シーリング欠陥及び関連するシナリオに関する具体的なコメントは見当たらない。
2012:57 (Ofoegbu and Smart, 2012)	Shear movement of near-field rock due to large earthquakes.	地震が処分場に与える影響を評価する方法を議論している。 本レポートは、"incompletely sealed"シナリオには直接関係しない。

付表 3-5　Incompletely sealed repository シナリオに対する規制機関からのコメントの調査(2/4)

ドキュメント番号 (著者)	タイトル	キーポイント
2012: 58 (Pensado and Mohanty, 2012)	Independent radionuclide transport modelling	以下の放射性核種の移行に関連するモデリング/計算を実施している。 ・腐食によるキャニスタの破損 ・せん断荷重によるキャニスタの破損 ・バリア機能を説明するための仮想的な残留シナリオ 結論は以下の通りである。 “この最初のレビューでは、SKB による計算は平明であり、モデルの説明は適切であり、データは合理的であると結論付けた。” “放射性核種輸送レポート（SKB,2010g）で、SKB の結論を無効または不適切にする重大な計算上の問題は特定されなかった” “SKB モデルの説明の明確さの欠如と入力データの可用性に関して、いくつかの比較的小さな問題が特定された。” “独立した計算では、せん断荷重破損シナリオでの Th-230 及び Ra-226 の放射性核種放出の減少傾向を示す SKB 結果を再現できなかった。”
2014:08 (McMurry and Bertetti, 2014)	Review of long-term redox evolution of groundwater and potential influence of oxygenated glacial meltwater in SR-Site.	このレビューの目的は、地下水の酸化還元の変遷に関する SKB の検討が正当であるかどうか、及び考慮されていない要因があるかどうかを判断することである。このレビューにより、最も影響の大きい処分場の構成要素が特定され、SKB が使用済み燃料の酸化溶解、酸化還元感受性放射性核種の溶解度制御モビリティ、及び酸化還元の収着特性に対する酸化還元条件の変化の潜在的な影響に適切に対処していたことが示された。このレビューでは、Forsmark サイトの割れ目及び母岩の酸化還元感受性鉱物相の岩石学的特性評価を継続することを推奨している。 このレビューは地球化学の観点から重要であるが、”incompletely sealed”シナリオには関係がない。
2014:33 (Mohanty and Pensado, 2014)	Reproduction of SKB's canister failure calculations.	バリア機能を説明するための「what if」ケースと「残留」シナリオを再現することにより、SKB の計算を評価する。主なシナリオには、腐食破壊と地震活動によるせん断破壊が含まれる。残留シナリオでは、静水圧荷重と孔食（ピンホール）が考慮された。レビューにおいては SKB のリファレンスケースの結果を 5 倍以内で再現できた。 このレビューではメインシナリオを考慮しており、”incompletely sealed”シナリオを明示的にカバーしていない。
2014:55 (Penfold, 2014)	Further reproduction of SKB's calculation cases and independent calculations of additional “what if” cases.	キャニスタ/緩衝材の要素が処分場システムのモデルに存在しないモデリングケースを再現している。処分場システムの性能を制御する重要な要因は、キャニスタの完全性、燃料転換率と核種溶解度、緩衝材から亀裂への有効放出速度、地圏におけるマトリックス拡散である。 モデリングでは、通常 2～5 倍以内で SKB の計算とよく一致する AMBER が使用されている。 このレビューは安全性評価の理解に資するが、”incompletely sealed”シナリオは明示的に考慮されていない。

付表 3-6　Incompletely sealed repository シナリオに対する規制機関からのコメントの調査(3/4)

ドキュメント番号 (著者)	タイトル	キーポイント
SSM 2015:05 (Röhlig, 2015)	Review of uncertainty propagation and sensitivity analysis in SR-Site	「中央腐食ケース」及び「せん断荷重によるキャニスタ破損」に対して SKB が使用する方法の妥当性をレビューしている。保守的で最適なパラメータ値がレビューされている。シーリング欠陥及び関連するシナリオに関する具体的なコメントは見当たらない。
2015:40 (Geier, 2015)	Assessment of flow-related transport parameters used in the SR-Site safety case	水理輸送パラメータの詳細なレビュー。全体的なレビューはアセスメントに関連しているが、シナリオ分析の観点からはあまり関連がない。ただし、シーリングに関しては、次のような記述がある。 *"2 つ以上の立坑が組み合わされた場合の影響が分析されていない。Joyce et al.,（2010）ではモデリングの予備段階などのケースから結論を得たが、結果を提示していない。 関心があるのは立坑が 2 本の場合に処分場のセクションによっては U 字の流路が形成されるかどうかである。このようなケースは、将来の人間の侵入シナリオの一部としては考えにくいが、サイト選定時の調査井のボアホールシーリングの一般的な欠陥が要因となって発生する可能性がある。* *処分場に計画されている地表につながるすべてのボーリング孔の位置はすでに分かっているため、実際のサイト調査井の位置に基づいてこの可能性を評価することが最も有意義だっただろう。"*
2015:49 (Benbow et al., 2015)	Independent modelling of engineered barrier evolution and coupled THMC: canister corrosion calculations in SR-Site	SKB TR-11-01 及び SKB TR-10-66 で報告されている銅キャニスタの腐食計算に関するレビュー。この検討には、無傷の緩衝材及び部分的に浸食された緩衝材の腐食速度、及び緩衝材内の移流に関連する計算ケースの分析が含まれる。 このレビューは、安全性評価の計算にとって重要だが、"incompletely sealed"シナリオには直接関係しない。
2016: 23 (Yoon et al, 2016)	Modelling of the thermal evolution of the KBS-3 repository at Forsmark and associated induced seismic activity.	Forsmark サイトで使用済み核燃料の処分場の物理的完全性を損なう可能性のあるいくつかのイベントを議論している。脅威の要因は i）使用済み核燃料のキャニスタからの熱による岩盤への熱負荷に起因するイベント、及び ii）キャニスタからの熱負荷がある状態で発生する地震イベントである。 このレビューは、現在の条件下での熱負荷または熱と地震の複合負荷によるキャニスタの損傷の発生確率は低いことを示唆している。 このレポートは、"incompletely sealed"シナリオには直接関係しない。
2016: 23 (Yoon et al, 2016)	Modelling of the thermal evolution of the KBS-3 repository at Forsmark and associated induced seismic activity.	Forsmark サイトで使用済み核燃料の処分場の物理的完全性を損なう可能性のあるいくつかのイベントを議論している。脅威の要因は i）使用済み核燃料のキャニスタからの熱による岩盤への熱負荷に起因するイベント、及び ii）キャニスタからの熱負荷がある状態で発生する地震イベントである。 このレビューは、現在の条件下での熱負荷または熱と地震の複合負荷によるキャニスタの損傷の発生確率は低いことを示唆している。 このレポートは、"incompletely sealed"シナリオには直接関係しない。

付表 3-7　Incompletely sealed repository シナリオに対する規制機関からのコメントの調査(4/4)

ドキュメント番号 (著者)	タイトル	キーポイント
2017:15 (Pensado, 2017)	Radionuclide release rates associated with bounding cases featuring relatively early canister failures in a spent fuel repository.	極端なシナリオ（ここではバウンディングケースと呼ばれる）を検討するため、保管されたキャニスタはすべて、処分場閉鎖後のさまざまな期間内（1～300、1～1,000、16,000 及び 1～100,000 年）に破損することを想定する。 このレポートは、”incompletely sealed”シナリオには直接関係しない。
2018:15 (Bath, 2018)	Review of geochemical data utilisation in SR-Site safety assessment.	Forsmark のサイト記述モデルの作成及び安全性評価の入力データとして SR-Site で地下水組成のデータがどのように使用されたかをレビューしている。 このレビューは、ファーフィールドの地球化学とキャニスタの腐食、緩衝材の変質、侵食などの重要なプロセスへの影響を検討するために重要だが、”incompletely sealed”シナリオには直接関係しない。
2019:22 (SSM, 2019)	SSM's external experts' reviews of SKB's report on supplementary information of canister integrity issues.	銅キャニスタの腐食に関する 2 つのレビュー、キャニスタの完全性に関するモデリングと線量評価、生物圏のレビュー、及び使用済み核燃料キャニスタの完全性に関連する線量評価が含まれる。 この報告書は、キャニスタの腐食と地球化学的条件が腐食に及ぼす影響に関して重要だが、”incompletely sealed”シナリオには直接関係しない。

⑥ FHA 以外のシーリングシステムの初期欠陥や経年劣化等を想定したシナリオの調査

FHS 以外のシーリングシステムの初期欠陥や経年劣化等を想定したシナリオの調査には、SKB パブリケーションデータベースを利用して文書の検索を行った。検索ワードは、“Sr-Site”、“sealing”、“scenarios”、“defect”、“aging”、“deterioration”とした。なお、“Sr-Site”については全文検索を行った。調査対象とした文書は付表 3-8～付表 3-10 に示す。

結果として、メインレポート（SKB, 2011）及び「将来の人間行動」レポート（SKB レポート TR-10-53（SKB, 2010a）で概説されているシナリオ以外のシナリオは見当たらなかった。したがって、2 つのレポートで言及されたもの以外に、初期の技術的欠陥またはシーリングシステムの経年劣化の影響を考慮する他のシナリオは検討されていないようである。

付表 3-8　FHS 以外のシーリングシステムの初期欠陥や経年劣化等を想定したシナリオの調査 (1/2)

ドキュメント番号 (著者)	タイトル	キーポイント
TR-09-22 (SKB, 2009a)	Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses.	SKB が公開している安全性評価、SR-Can、及びいくつかの分析に基づいて、使用済み核燃料処分場である KBS-3V 処分場設計の長期的な安全面を考慮した前提条件を提示する。 SR-Can 評価シナリオが引用されている（「メインレポート」(SKB, 2006)）。 本レポートでは、詳細なプロセスモデリングを使用しているが、SR-Site 用に特別に開発された安全性評価モデルシナリオではない。
TR-10-11 (SKB, 2010c)	THM modelling of buffer, backfill and other system components	緩衝材、埋め戻し材、その他の充填材の重要な熱水力学的プロセスとシナリオについて述べ、22 のモデルタスクについて記述している。 Abaqus と Code_Bright の 2 つのコードを主に使用して、有限要素（FE）計算で分析されている。トピックには、ピーク温度、緩衝材と埋め戻し材の水和、緩衝材の均質化、埋め戻し材と緩衝材の膨潤、キャニスタの沈み込み、トンネルプラグの水和と油圧シーリング、ボアホールシールの水和などがある。 本文書では、詳細なプロセスモデリングを考慮しているが、安全性評価モデルのシナリオは考慮していない。
TR-10-14 (SKB, 2010g)	Design, production and initial state of the canister	キャニスタの故障シナリオを考慮しているが、内部欠陥の可能性や取り扱い中・輸送中・定置中に発生する表面損傷など、初期状態に限定している。 本文書では、材料特性が詳細に検討されるが、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。
TR-10-16 (SKB, 2010h)	Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels.	KBS-3 処分場がどのように設計、建設、検査されているかを示す一連の生産レポートの一部である。このレポートでは SR-Site の長期的な安全性評価のため、埋め戻し材とトンネルプラグの初期状態に関する情報が示される。本文書では、材料特性が詳細に検討されるが、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。
TR-10-17 (SKB, 2010i)	Design, production and initial state of the closure	KBS-3 リポジトリがどのように設計、建設、検査されているかを示す一連の生産レポートの一部である。このレポートは、処分場デザインの前提条件とクロージャーとプラグのレファレンスデザインを提示し、前提条件への適合性を検証する。 本文書では、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。
TR-10-44 (Åkesson et al., 2010)	SR-Site Data Report. THM modelling of buffer, backfill、 and other system components.	SR-Site データレポートの補足資料である。THM プロセスに関するプロセスレポートで提起された、緩衝材、埋め戻し材、及びその他のシステム構成要素の問題に基づいて、処分場の様々な変遷を表す 22 のモデリングタスクが特定されている。このデータレポートの目的は、これらのタスクのパラメータ値を示すことである。SR-Site モデリングでの使用が推奨されるデータは、レポートの最後にまとめられている。 本文書では、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。
TR-10-45 (SKB, 2010j)	FEP report for the safety assessment SR-Site.	SR-Site の安全性評価で実行された FEP の分析が記載されている。 FEP のいくつかは、キャニスタの欠陥と処分場のシーリングを区別している。 本文書では、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。

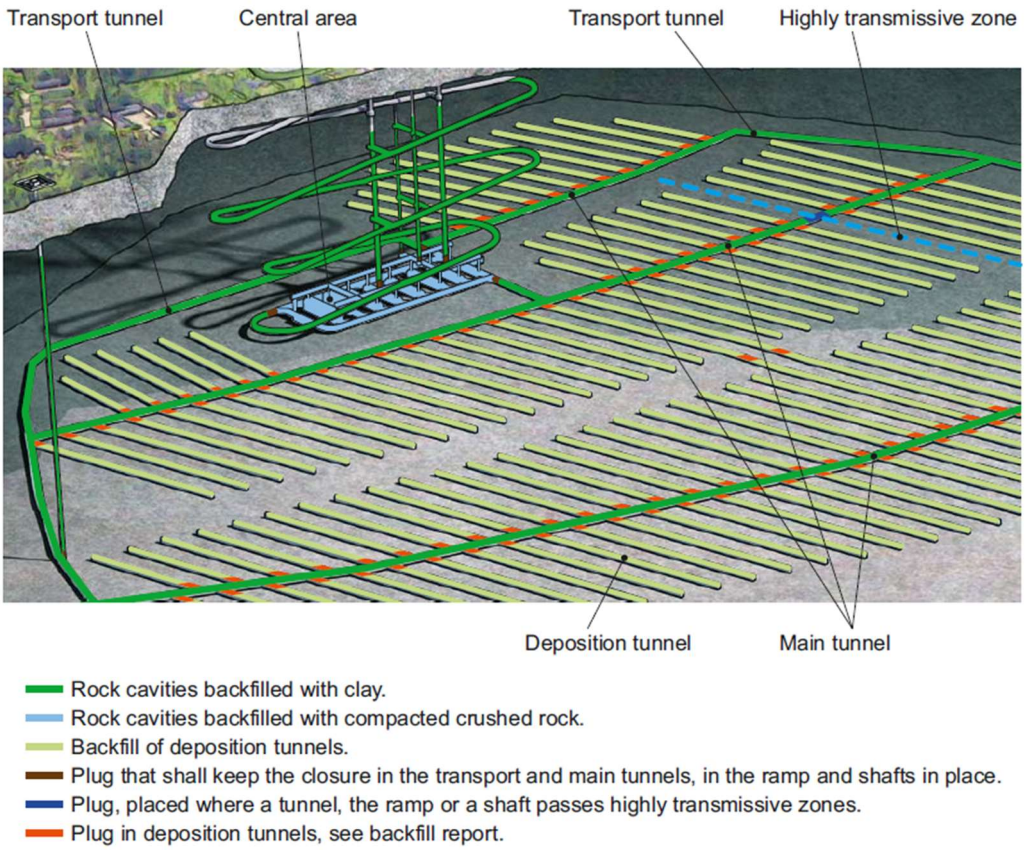
付表 3-9　FHS 以外のシーリングシステムの初期欠陥や経年劣化等を想定したシナリオの調査 (2/2)

ドキュメント番号 (著者)	タイトル	キーポイント
TR-10-46 (SKB, 2010k)	Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site.	KBS-3 リポジトリの長期的な安全性に関連する燃料及びキャニスタの変遷プロセスに関する情報をまとめている。初期欠陥のあるキャニスタに水が浸入するシナリオ等、キャニスタの欠陥の影響が考慮される。 本文書では、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。
TR-10-47 (SKB, 2010l)	Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site.	使用済み核燃料処分場である KBS-3 処分場の長期的な安全性に重要な役割を持つ緩衝材、坑道の埋め戻し、及び閉鎖のプロセスが、SR-Site の安全性評価でどのように文書化されているかを説明している。レポートには、緩衝材、埋め戻し材、トンネルプラグ、中央エリア、上部シール、底板、及びボアホールシールのプロセスの徹底的な評価が含まれる。このレポートでは、材料の変質と劣化、及び材料の挙動に関連するシナリオを考慮している。 本文書では、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。
TR-10-50 (SKB, 2010m)	Model summary report for the safety assessment SR-Site.	SR-Site 安全評価のモデルサマリーレポートである。レポートでは、評価コードに対して実施された品質保証（QA）対策が、QA 方法論とともに提示されている。 本文書では、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。
TR-10-51 (SKB, 2010n)	Model summary report for the safety assessment SR-Site.	SR-Site 安全評価のモデルサマリーレポートである。レポートでは、評価コードに対して実施された品質保証（QA）対策が、QA 方法論とともに提示されている。 本文書では、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。
TR-10-52 (SKB, 2010e)	Data report for the safety assessment SR-Site.	KBS-3 処分場の長期的な安全性を評価するために不可欠であると特定されたデータを提示している。 本文書では、メインレポートやプロセスレポート等の SR-Site 安全評価に含まれるシナリオについて説明しているが、SR-Site 専用のシナリオ開発に関する SKB による他の文書はない。
TR-10-59 (Sena et al., 2010)	Aspects of geochemical evolution of the SKB near field in the frame of SR-Site.	SR-Can の演習で行われたモデリングの更新について述べている。 本文書では、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。
TR-10-62 (Grandia et al., 2010)	Evaluation of low-pH cement degradation in tunnel plugs and bottom plate systems in the frame of SR-Site.	処分場で使用されるコンクリートプラグのセメント耐久性を、セメント化合物の地化学的劣化に基づく反応性輸送シミュレーションを実行することにより数値的に評価している。 本文書では、安全性評価モデルのシナリオは考慮されていない。
TR-10-66 (SKB, 2010o)	Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site.	KBS-3 処分場に関連する銅腐食現象の計算について説明している。このドキュメントは、メインレポート（SKB, 2011）で検討されたシナリオのみを掲載している。

2) シーリングシステムの機能不全を想定した場合の地下水流動解析

① SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおける地下水流動解析

本項目では、SKB(2010p) に基づいて、Incompletely sealed repository シナリオにおける地下水流動解析の詳細を述べる。SR-Site の概略図を付図 3-17 に再度示す。



付図 3-17　SR-Site の概略図　（SKB, 2010p）

緑色の坑道は粘土で埋め戻した坑道、水色の坑道は砕石で埋め戻した坑道、黄緑は処分坑道、茶色は輸送用及びメイン坑道を閉鎖するプラグ、青は高透水帯との交差部を閉鎖するプラグ、赤は処分坑道のプラグを示す。

(a) モデル構築の前提条件

SKB(2010p)においては、一部が開放状態で水に満たされた処分場における地下水流動の影響を検討するため、温暖期及び寒冷期の 2 つの状況を想定した解析を実施している。

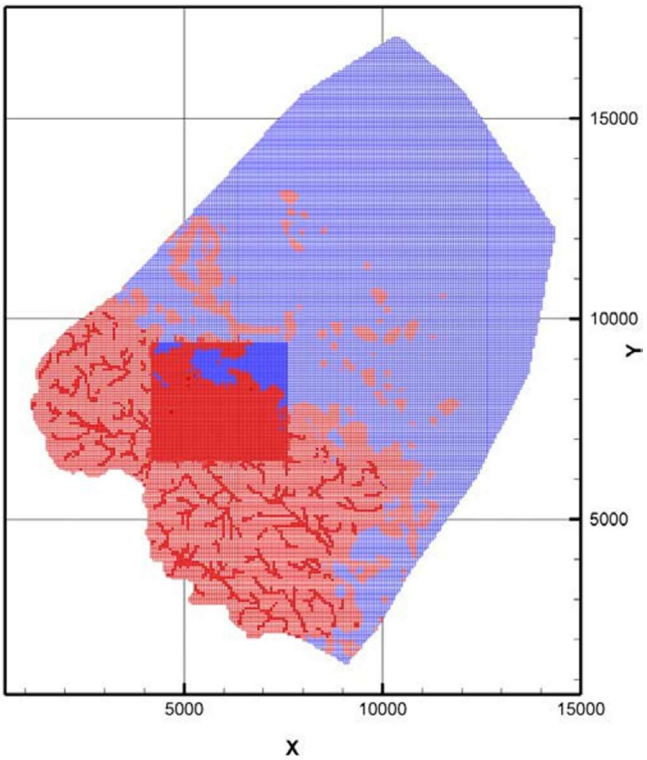
今後 10,000 年の間、SR-Site のある Forsmark は 40m 隆起することが予想されており（Joyce et al., 2010）、隆起に伴って今後 10,000 年の間に地盤の上昇と共に地表のより広いエリアが涵養域に移行するにつれて、処分場と地表との間の地下水の流路としての坑道の重要性が低下することが予想される。しかし、海水準は悲観的な想定として温暖期・寒冷期ともに現在の値が用いられた。SKB(2010p)においてシミュレーションが行われたのは下の 4 パターンである。

ケース(a) 温暖期　リファレンスケース（閉鎖ケース）

ケース(b) 温暖期　開放ケース
ケース(c) 寒冷期　リファレンスケース（閉鎖ケース）
ケース(d) 寒冷期　開放ケース

閉鎖ケースではすべての坑道、シャフトが埋め戻されているのに対し、開放ケースでは、処分坑道のみが埋め戻されたという想定がなされた。なお、こういったシナリオが成立する発生確率等は論じられていない。

モデルドメインについては、南北に 15km、東西に 10km、深さ 1.2km の付図 3-18 の範囲である。



付図 3-18　SR-Site の水理解析に用いられたモデルドメイン（SKB, 2010p）
赤色は陸地を示し、青色は海上を示す。処分場サイトは濃色の部分である。

(b) 寒冷期及び温暖期のパラメータ設定

氷床によってダメージを受けやすい設備については、透水係数を割り当てる代わりに、水理水頭を指定した境界条件を適用している（付図 3-19）。これは、劣化した埋め戻し材は透水係数が大きくなるため、坑道と岩盤の透水係数が大きく異なることになり、トンネル内の動水勾配は無視できると考えられるためである。

Table 3-2. Specified head in top sealing repository features above an elevation of –200 m (RHB 70) applied in the temperate and glacial cases with reference closure of tunnels.

Repository feature	Specified hydraulic head [m]	
	Temperate	Glacial
Ramp	0.1	220.0
Shafts central area	0.1	220.0
West deposition area ventilation shaft	1.8	123.0
East deposition area ventilation shaft	0.2	4.0

付図 3-19　SR-Site の水理解析において温暖期ケース及び寒冷期ケースに使用された水理水頭値 (SKB, 2010p)

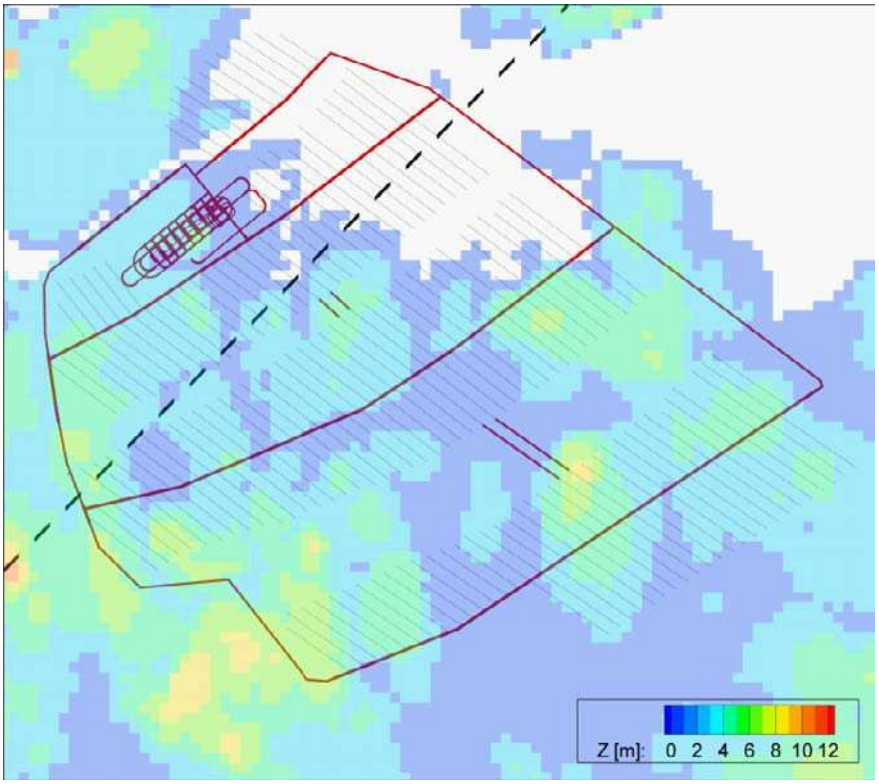
(c) 閉鎖ケース及び開放ケースのパラメータ設定

開放状態の坑道を扱う際には、EPANET2 によるパイプネットワークモデルが用いられ、水理水頭を指定するというアプローチがとられている。

パイプネットワークモデルが採用された背景として、SKB(2010p)には以下の記述がある。

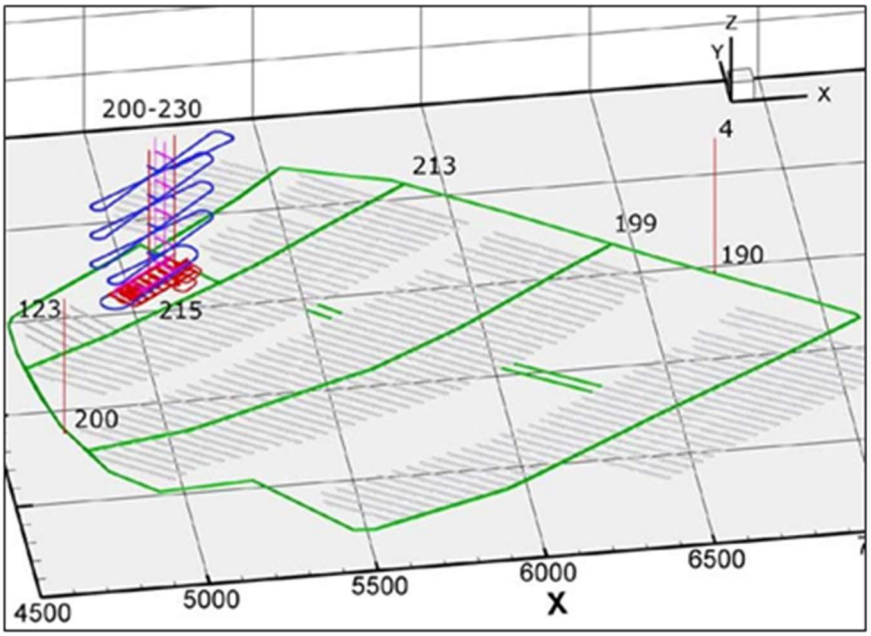
開放状態の坑道には大量の地下水が流入できる空間が存在する。したがって、入口地点と出口地点の水頭差が比較的小さい現在の温暖期における境界条件では、坑道を通る流れを制限するのは入口地点の土壌からの地下水の供給量となる。坑道による損失水頭は非常に小さく、処分場の出口の土壌層の水頭に等しいと仮定した数値である水理水頭 0.07 m が、すべての開放状態のトンネルに適用されている（引用注：Fig3-2 が記載されているが本稿では付図 3-20）。

寒冷期の場合、開放状態の処分場システムを通る地下水流量は、トンネルの水頭差とトンネル内の摩擦損失に依存する。寒冷期には、処分場システムにかなりの量の水が流入し、トンネルに沿った損失水頭が大きくなり、処分場システム全体の水理水頭は不規則に分布することになる（引用注：本稿では付図 3-21）（3.2 Methodology for simulation of tunnels, p.20）。



付図 3-20　SR-Site の地形(SKB, 2010p)

白いエリアは海水準（0m RHB70）よりも低い。温暖期の境界条件の場合、開放状態の坑道系を通る流れは、処分場エリアの 2 つの換気シャフトから流入し、その出口よりも標高が低い部分にある中央エリアにつながる斜道及び立坑から流出する。



付図 3-21　EPANET2 によって算出された寒冷期開放ケースの水理水頭分布(SKB, 2010p)

坑道系の透水係数の設定(付図 3-22)については以下のような言及がある。

破砕領域の内側の母岩には 1E–10 m / s の最小となる透水係数が適用された。破砕領域の外側の母岩（外部変形ゾーン）では、表層の下部から 200 m 以浅において 1E–7 m / s の透水係数が適用され、地表から 200～400 m の深度では 1E-8 m / s、及び 400 m 以深では 3E–9 m / s が適用された。

本研究では、移流による輸送を考慮した。したがって、モデリングには運動学的(輸送)有効間隙率が考慮された。また、粒子追跡解析における流動特性を評価するために、flow-wetted surface を導入した。有効間隙率は、変形帯モデル及び DFN （Svensson and Follin, 2010）から 5E-5 が導出され、破砕領域の内側及び外側の両方で使用された。flow-wetted surface は、Vidstrand et al.,（2010）に従って、個々の破砕領域及び深さごとに算出した。

埋め戻された坑道の水理性状の値(図表 3-1（引用注：本項では付図 3-23 のこと））も、Joyce et al.,（2010）より引用された。処分場の上部封止及び中央エリアの坑道を除くすべてのトンネルで透水係数 1E-10 m/s 及び有効間隙率 0.45 を使用した(第 3.2.1 章参照（引用注：この章は本稿には含まれない））。中央エリアの坑道においては、有効間隙率は 0.27 に設定された。flow-wetted surface は、全ての坑道においてゼロであり、開放ケースも閉鎖ケースも同様と仮定されたことに留意されたい。処分孔については、処分坑道と同じパラメータを用いた (3.5 Hydraulic properties, p.24)。

Input data	Use[1)]	File name and version/property value	Source
Hydraulic conductivity in surface layer	1	$K_h = \max \begin{cases} 1 \cdot 10^{-7}\ \text{m/s} \\ 5 \cdot 10^{-3}\ 10^{-\text{depth}/3\ \text{m}}\ \text{m/s} \end{cases}$ $K_v = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s	Model delivery CFE 2010-01-15
Hydraulic conductivity watercourses	1	$K_h = 2 \cdot 10^{-1}$ m/s	Model delivery CFE 2010-01-15
Hydraulic conductivity in rock, minimum	1	$1 \cdot 10^{-10}$ m/s	Model delivery CFE 2010-01-15
Hydraulic conductivity in rock outside FFM	1	depth< 200 m K = $1 \cdot 10^{-7}$ m/s 200 m < depth < 400 m K = $1 \cdot 10^{-8}$ m/s depth > 400 m K = $3 \cdot 10^{-9}$ m/s	Model delivery CFE 2010-01-15
Kinematic porosity in surface layer	1	$\theta = \max \begin{cases} 1 \cdot 10^{-3} \\ 5 \cdot 10^{-2}\ 10^{-\text{depth}/20\ \text{m}} \end{cases}$	Model delivery CFE 2010-01-15
Kinematic porosity in rock		$\theta = \max \begin{cases} 5 \cdot 10^{-6} \\ 5 \cdot frevol/vol \end{cases}$	Model delivery CFE 2010-01-15
Kinematic porosity backfilled tunnels (deposition tunnels and other tunnels/shafts)	1	0.45	/Joyce et al. 2010/
Kinematic porosity central area	2	0.27	/Joyce et al. 2010/
Kinematic porosity open tunnels	3	1.0	Assumption
FWS in FFM	1	0.3 m²/m³ FFM01, FFM06 top 0.08 m²/m³ FFM01, FFM06 mid 0.02 m²/m³ FFM01, FFM06 bot 0.66 m²/m³ FFM02 0.18 m²/m³ FFM03, FFM05 top 0.10 m²/m³ FFM03, FFM05 bot 0.18 m²/m³ FFM04 top 0.10 m²/m³ FFM04 bot	/Vidstrand et al. 2010/
FWS backfilled tunnels	1	0 m²/m³	/Joyce et al. 2010/
FWS open tunnels	3	0 m²/m³	Assumption
Top boundary condition land	1	R = 130 mm/yr = $4.1 \cdot 10^{-9}$ m/s	Model delivery CFE 2010-01-15
Top boundary condition glacial case	4	• Water pressure at ground surface below ice sheet 92% of ice sheet thickness according to eq. 2-9 in R-09-21 • In front of ice sheet, above sea level: P = 0 at ground surface • In front of ice sheet, below sea level (z = 0): P hydrostatic	/Vidstrand et al. 2010/

1 = All cases
2 = Only reference cases
3 = Only open tunnel cases
4 = Only glacial cases

Trac (CFE) Path: SR-Site Data Storage/CFE/Forsmark/NiclasB20100309.zip
Trac (Serco) Path: SR-Site Data Storage/SERCO / Pathlines /090220_fs_Q1_2000_fpc.csv

付図 3-22　SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおける水理解析に用いられたパラメータ(SKB, 2010p)

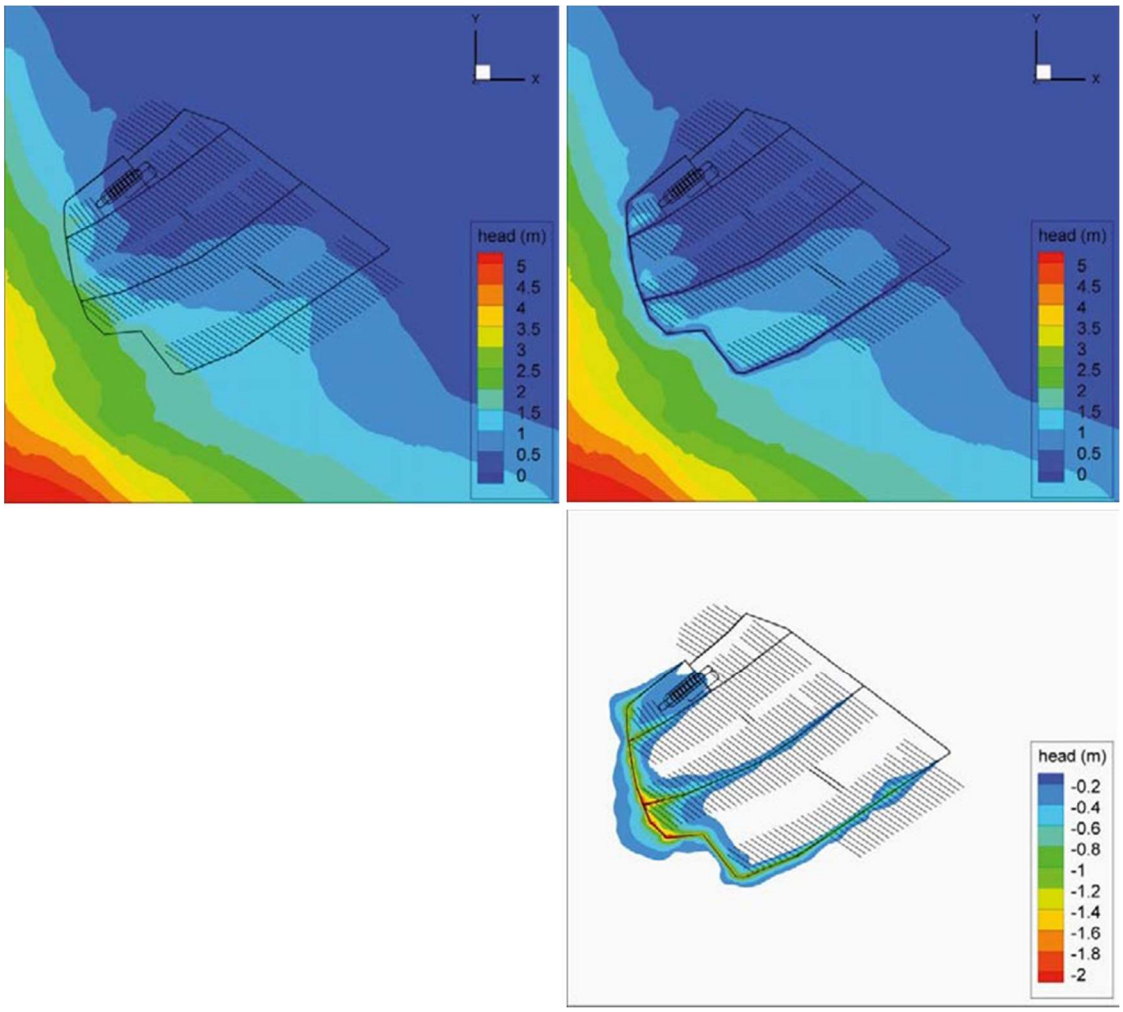
Structure	Height (m)	Width (m)	Hydraulic conductivity (m/s)	Porosity
Main tunnel	6.0	10.0	$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.45
Transport tunnel	6.0	7.0	$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.45
Deposition tunnel	6.0	4.0	$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.45
Deposition hole	8.0	1.5	$1.0 \cdot 10^{-12}$	0.41
Central area tunnel	6.0	7.0	$1.0 \cdot 10^{-5}$	0.27
Ramp	6.0	5.2	$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.45
Elevator shaft	4.34	4.34	$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.45
Skip shaft	3.96	3.96	$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.45
Air intake shaft	3.32	3.32	$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.45
Air exhaust shaft	2.81	2.81	$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.45
Deposition area air exhaust shaft	3.07	3.07	$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.45
Top sealing	N/A	N/A	$1.0 \cdot 10^{-1}$	N/A
EDZ	0.3	N/A	$3.333 \cdot 10^{-8}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$

付図 3-23　SR-Site の水理解析におけるパラメータ（Joyce et al., 2010）

(d) 解析結果

(d)-1 温暖期ケース

温暖期ケースつまり現在と同様の状況における処分場深度での動水勾配は、南西から北東向きに生じる(付図 3-24)。なお、動水勾配は現在の海岸線で実質的に消滅する。孔道系が開放状態であることによって、開いた坑道に向かう動水勾配が生じ、処分場の西部の坑道の周囲の水理水頭が下がる。付図 -24 より、開放ケースの坑道周辺の最大影響径は約 300m(付図 3-24 下図)であり、開放ケースでは閉鎖ケースと比較して南西の坑道において最大約 2m 水理水頭が低下する。

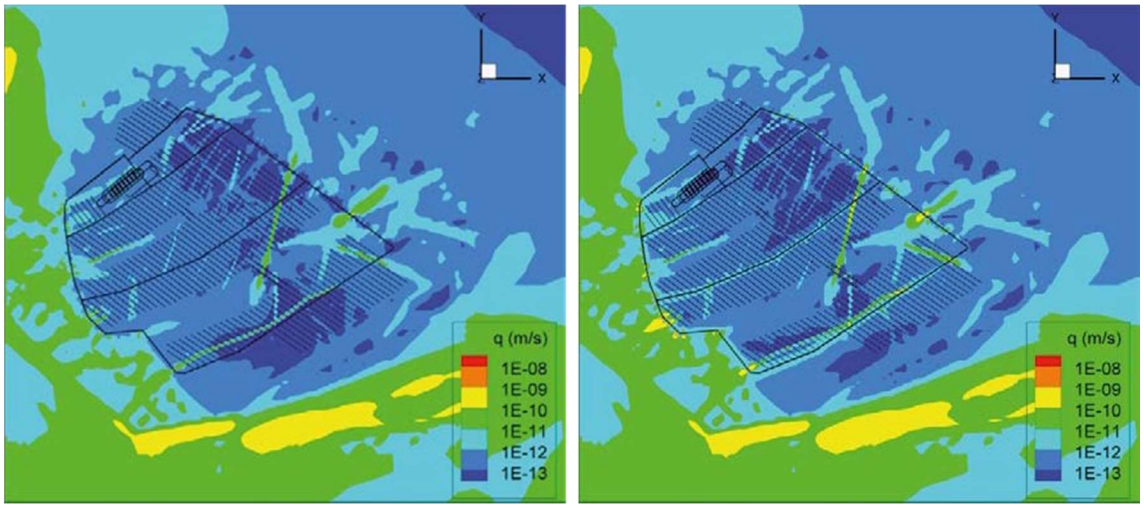


付図 3-24　閉鎖ケース(左上)及び開放ケース(右上)の処分場深度(Z=−465m RHB 70)での水理水頭分布(SKB, 2010p)

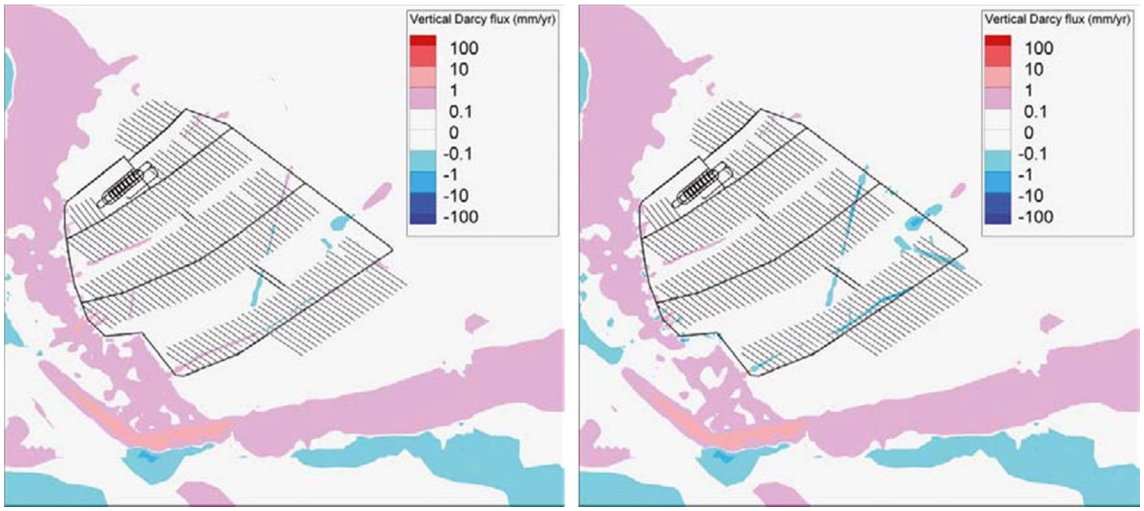
なお、水頭のデータムは、0m RHB 70 である。右下図は閉鎖ケース及び開放ケースの差分を示す

また、坑道の周囲、及び坑道に接する高透水帯の周囲において流れの増加が生じることが示された(付図 3-25 及び付図 3-26)。影響はあまり大きくないが、処分場エリアの南端においても流れが増大する。一方、開放ケースで流れが減少する部分も存在する。処分場深度における垂直方向の流れは、開放坑道に接する高透水帯周囲で局所的に著しく変化する(付図 3-25 及び付図 3-26)。

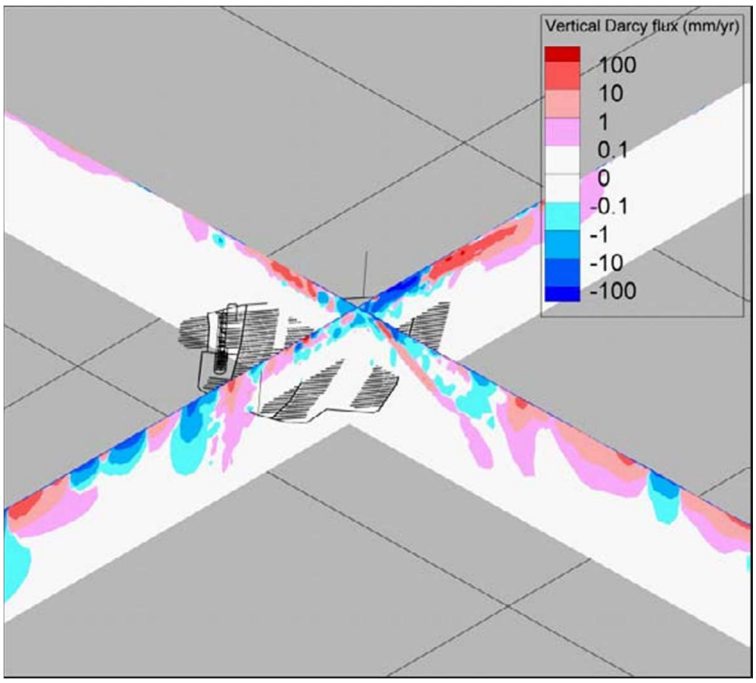
坑道と周囲の岩盤（または土壌層）との間の流れの分布を付図 3-27 に示す。主要な流れは、処分領域の通気シャフトから流入し、中央エリアの上方のランプ及びシャフトを通って流出する流れである。土壌層及び岩盤から坑道への流入量は 0.42 [L/s]であり、流出量は 2×10^{-3} [L/s]である。高透水率の表層及びシート接合部からの流入が主要な経路となる。



付図 3-25　温暖期における閉鎖ケース(左側)及び開放ケース(右側)の処分場深さ(Z=−465m RHB 70)でのダルシー流動の大きさの分布(SKB, 2010p)



付図 3-26　温暖期における閉鎖ケース(左側)及び開放ケース(右側)の処分場深さ(Z=-465m RHB 70)での鉛直方向へのダルシー流動の大きさの分布（mm/年）(SKB, 2010p)
なお上向きの流れを正とする



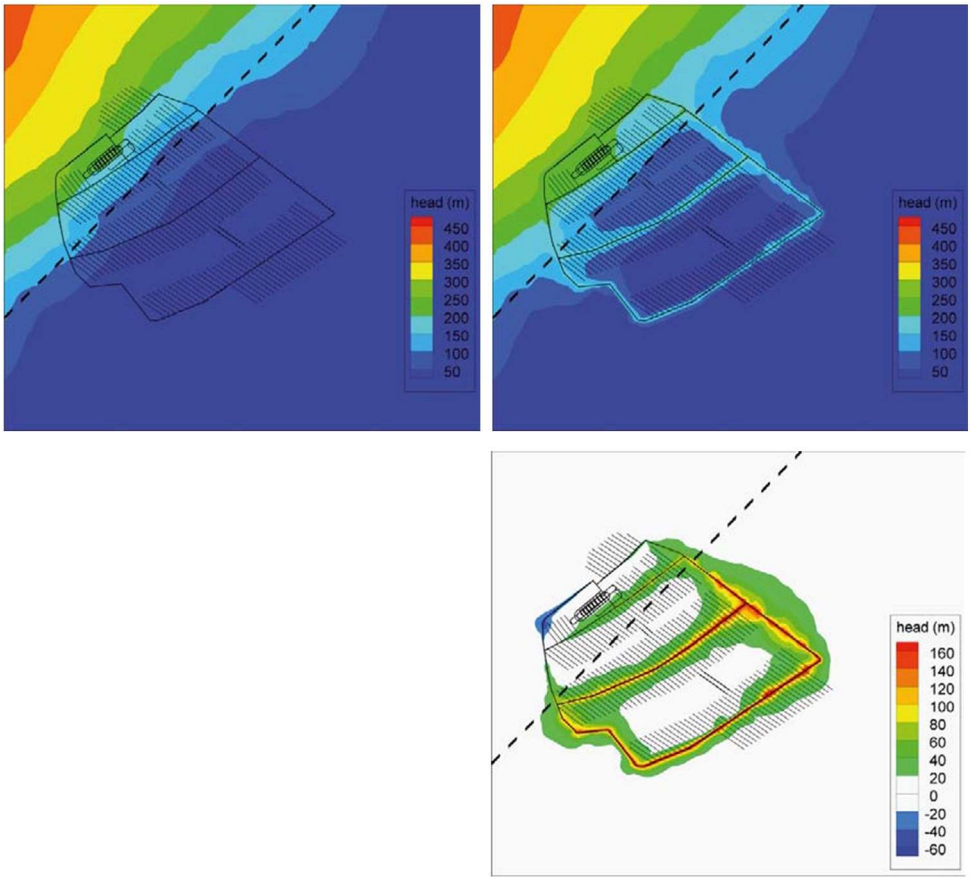
付図 3-27　温暖期における開放ケースの鉛直方向のダルシー流動(mm/年) (SKB, 2010p)
なお、図は処分場を南西から見たもの。上向きの流れを正とする

開放ケースにおいて坑道から周囲の岩盤（または土壌層）への流出は非常に少ないと算出されたので、中央エリア上方のランプ及びシャフトを通る排出は、坑道への流入量の合計値に等しいと推定することができる。したがって、坑道系からの排出量は 0.42 [L/s]と推定できる。そのうち 0.26L/s が Z=−40m (RHB 70)より上位の高透水性表層部及びシート接合部から流出する。

(d)-2　寒冷期ケース

氷河の前端が処分場の上にある状態が想定されている。処分場深度での動水勾配は北西から南東方向に生じ(付図 3-28)、したがって、寒冷期の動水勾配の分布は温暖期ケースを時計回りに約 90°回転したものに近い。動水勾配は氷河の下部で大きくなり、氷河のなくなる部分で急激に下がる。処分場深度においては坑道周囲の大部分で水理水頭が増加する(付図 3-28)。これは、坑道の存在によって氷河の地下に存在する高水理水頭の地下水が氷河の前面にある岩盤に流動するためである。

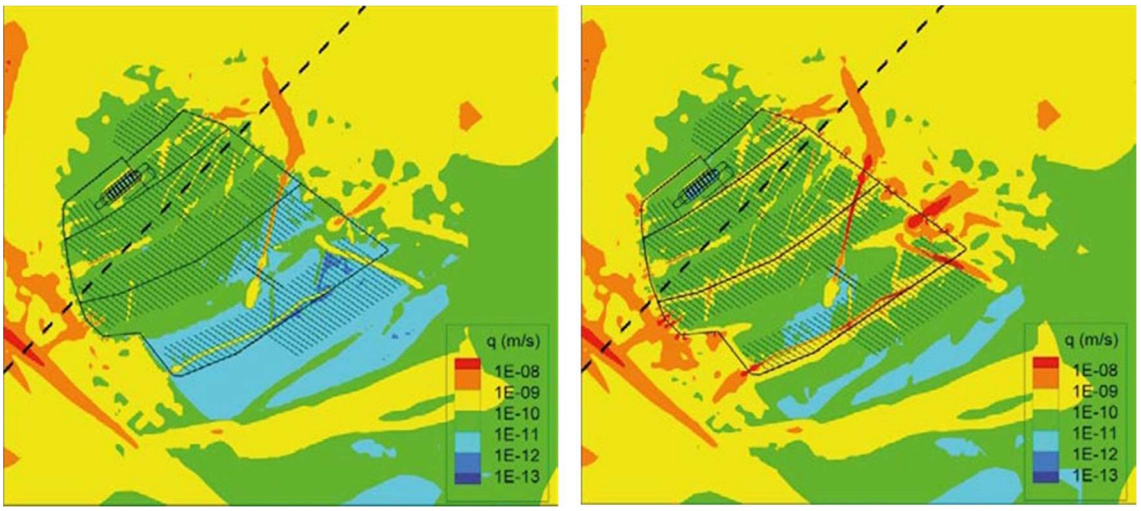
例外は北西の一角で、周囲の基盤岩の水理水頭が高く、坑道周囲での水理水頭が減少している。影響の範囲としては、温暖期とほぼ同規模である。寒冷期閉鎖ケースと寒冷期開放ケースを比較した場合の水理水頭の差分は、氷河の前端から最も離れた南東の坑道で最大となり、約 200m である。



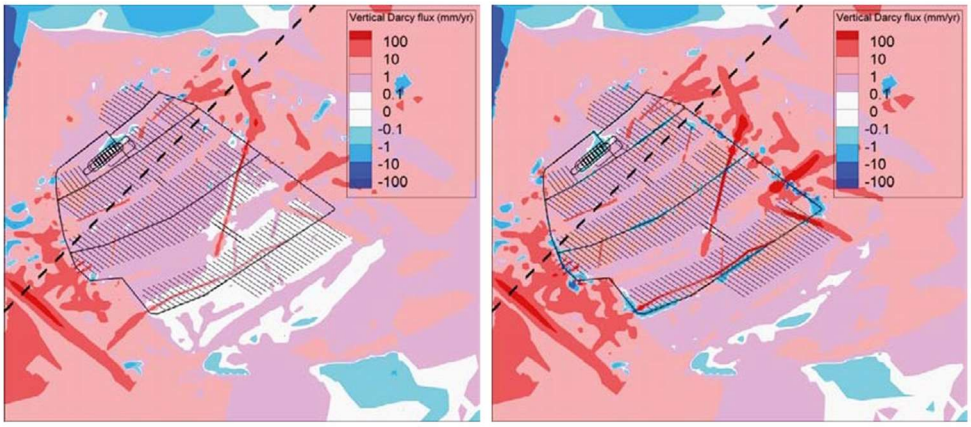
付図 3-28　寒冷期閉鎖ケース(左上)及び寒冷期開放ケース(右上)における
処分場深度(Z=−465m RHB 70)での水理水頭分布(SKB, 2010p)
水頭のデータムは、0m RHB 70 である。右下図は閉鎖ケース及び開放ケースの
水理水頭の差分を表す。氷河の前端の位置は、破線で示されている

温暖期と同様、坑道の周囲、及び坑道に接する高透水帯の周囲において流れの増加が生じることが示された（付図 3-29 及び付図 3-30)。一方寒冷期ケースでは、処分場南部領域にも流れが増大する領域が生じ、流れの減少した領域は観察できない。鉛直方向の流れについては、付図 3-29 及び付図 3-30 より、坑道に接する高透水帯と、処分場南端の処分坑道領域で流れが増加していることがわかる。

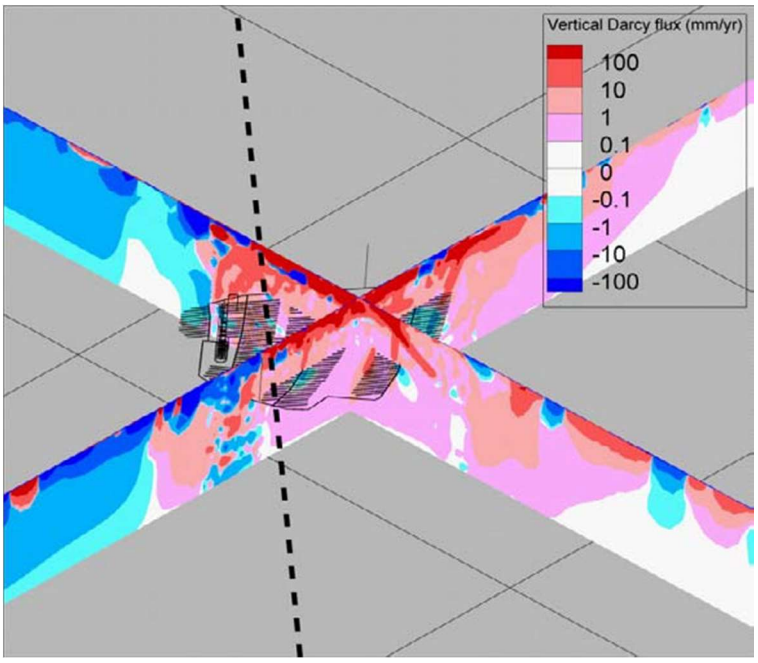
本解析で検討した水平面は坑道のわずかに下に位置するので、下向きの流れが増加する部分は、坑道から岩盤へ地下水が流出している部分である。付図 3-31 から、氷河のある部分から地下水が下方に向かって流入し、氷河のない部分から上昇して流出するという全体的な流れが見て取れる。



付図 3-29　寒冷期閉鎖ケース(左側)及び寒冷期開放ケース(右側)の
処分場深度(Z=−465m RHB 70)におけるダルシー流れの大きさ(SKB, 2010p)
破線は氷河の前端の位置を示す。



付図 3-30　寒冷期閉鎖ケース(左側)及び寒冷期開放ケース(右側)の
処分場深度(Z=−465m RHB 70)での鉛直方向の流れ（mm/年）(SKB, 2010p)
氷河の前端の位置は、破線で示されている。なお、上向きの流れを正とする。



付図 3-31　寒冷期開放ケースの鉛直方向の流れ(mm/年) (SKB, 2010p)
南西から処分場を臨む。氷河の前端は破線で示されている。なお上向きの流れを正とする。

以上の検討から、SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおいて温暖期には主要な流れが処分領域の通気シャフトから流入し、中央エリアの上方の斜道及び立坑を通って流出する流れであったのに対し、寒冷期には流れが逆転し、氷河のある中央エリアの斜道及び立坑から地下水が下方に向かって流入し、氷河のない処分領域の通気シャフトから上昇して流出するという流れになることが示された。

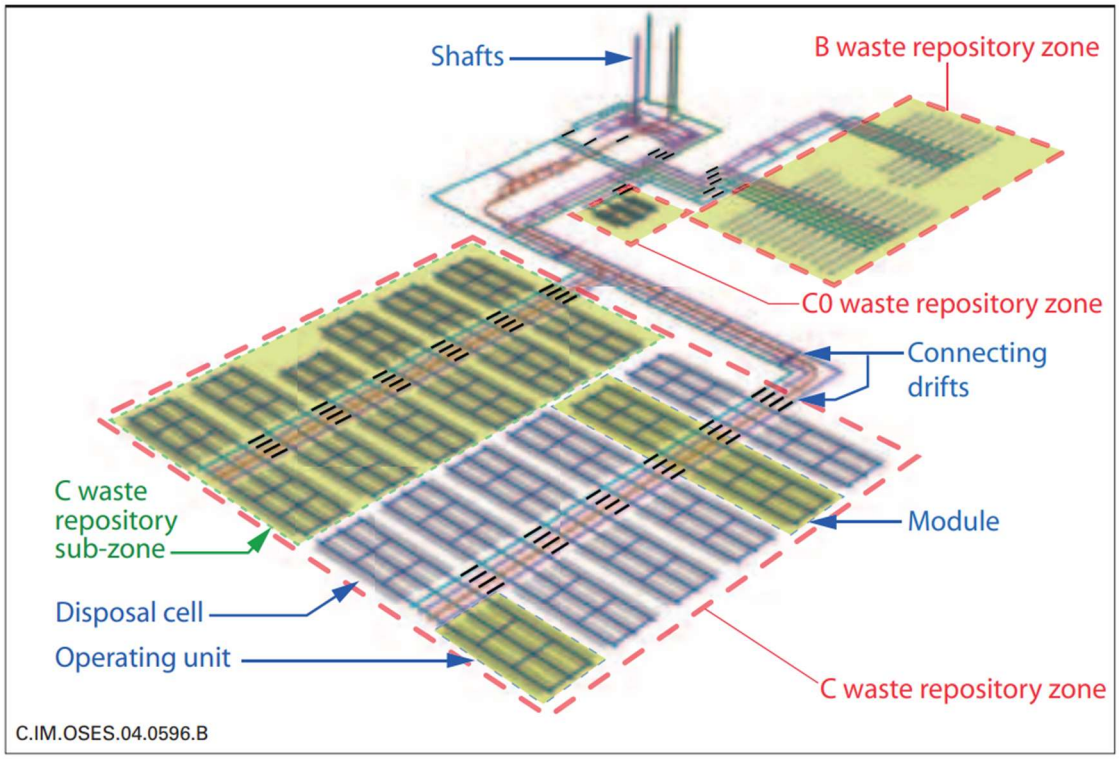
② Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay の“Seal failure”シナリオにおける地下水流動解析

(a) Dossier 2005 Argile の“Seal failure”シナリオ

Dossier 2005 Argile（付図 3-32）では、基本シナリオ（Normal evolution scenario）における種々の仮定が成立せず一部の安全機能が十全ではないことを想定した代替シナリオ（Altered evolution scenarios）について定量的な安価解析を行うことにより、多重バリアシステムが将来予測に含まれる種々の不確実性にどの程度の耐性を有するかを評価している（ANDRA, 2005a）。“Seal failure”シナリオは、前述の代替シナリオ（Altered evolution scenarios）の一つとして想定されているものであり、ANDRA(2005a)における長期的安全確保の中心となっている極めて低透水性の粘土層の安全機能がシーリングシステムの機能喪失によって脅威に晒されることを想定した核種移行解析が行われている。

“Seal failure”シナリオでは、アクセス坑道、水平連絡坑道及び止水プラグ等のいずれかあるいは全てが機能喪失して連続した高透水性の経路が形成されることを想定している。“Seal failure”シナリオのうち、アクセス坑道、地下坑道及び止水プラグの全てが機能喪失し連続した高透水性の経路が形成されることを想定し、かつ、鉛直上方への動水勾配を仮定した最も悲観的なケースでは、透水性の上昇した地下坑道が周囲の岩盤から地下水を集水し、それが端部に位置する高透水性のアクセス坑道（立坑）に流入して速やかに地表に至るという流動場が形成されて

いる。本項では、“Seal failure”シナリオにおいて、透水性の上昇した地下坑道が周囲の岩盤から地下水を集水し、それが端部に位置する高透水性のアクセス坑道（立坑）に流入して速やかに地表に至るという流動場の根拠となる地下水流動解析の内容について、ANDRA(2005a)に基づいて述べる。



付図 3-32　Dossier 2005 Argile で検討された処分場の概略図(ANDRA, 2005a)

(b) シナリオ定義

ANDRA(2005a)では、坑道系におけるシール材の役割について以下の記述がある。

水の循環を制限するために、アクセス通路内にも低い透水性を回復する必要がある。この機能は、直観的には埋め戻し材でも達成できるように思われるがそうではなく、特別なデバイス（シール材）によって達成される。

（中略）

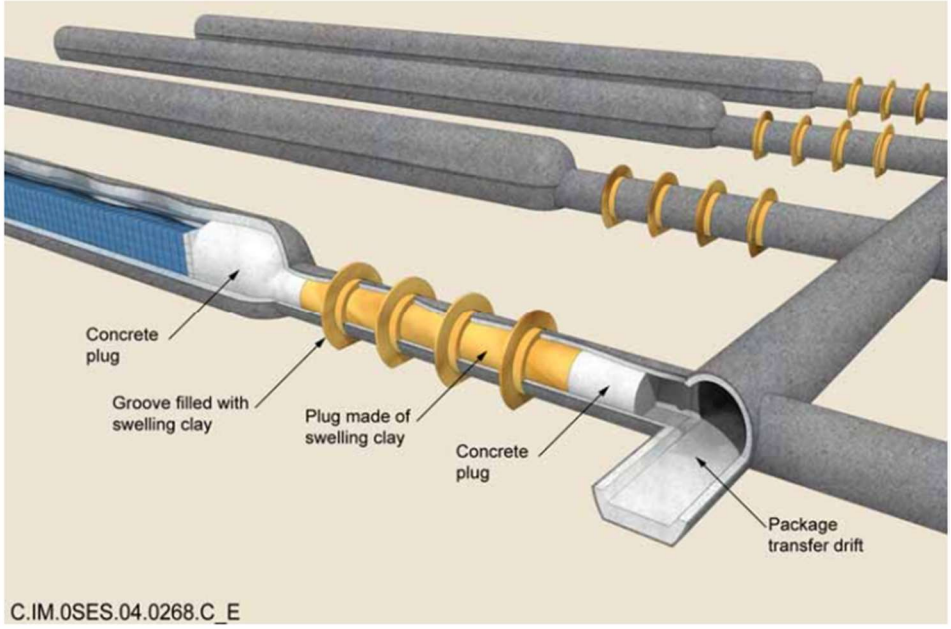
これらの構造物（(引用注：シール材のこと)）は、非常に低い透水率の物質からできており、膨潤する粘土（ベントナイト、膨潤粘土<<MX80>>）と工学的な強度を増す珪質砂からできている。これらが地下水に再飽和することで、

・アクセス経路をふさぐ。

・母岩に対して膨潤圧がかかることで、母岩と共に非常に低い透水率のシールとなる。

この膨潤圧によって、限られた範囲内においては破砕領域が埋められ、十分な水理的環境に回復することができる(3.7.3.1 Limiting the water flow from the overlying geological formations penetrated by the access structures, p.125)。

上記の記述の通り、坑道系のシール材は坑道周囲の EDZ をある程度埋めることが期待されている（付図 3-33）。



付図 3-33　B 廃棄物処分場の埋め戻しイメージ(ANDRA, 2005a)
膨潤したシール材（黄色）がある程度母岩方向に広がることでシールする。

“Seal failure”シナリオは、シール材の全体または一部における欠陥を想定している。具体的には以下の通りである。

- 岩盤と膨潤したシール材との間の接触不良、またはEDZの過剰な発達に起因して、EDZを経由した部分的なショートカットが発生する。ショートカットの発生により、放射性核種が移流によって、水平連絡坑道及びアクセス坑道を介して地表に向かって移動することができるようになる。
- 処分セル内において安全機能が保証されている範囲を超過するような化学的条件の変化が発生し、「放射性核種放出の制限及び処分場内の放射性核種の固定化」機能の部分的な欠陥をもたらす。
- シール材の透水性が全般的に劣化する。

また、以下のシール材が検討対象となっている。

- C 廃棄物エリア及び使用済み燃料処分場エリアのプラグ。
- C 廃棄物エリア及び使用済み燃料処分場エリア(処分場モジュール及びそのシール材も含む)内の水平連絡坑道のシール材。B 廃棄物の処分セルのシール材、B 廃棄物エリアのシール材、地表―処分場連絡坑道周辺のシール材、地表―処分場アクセス坑道のシール材。

解析対象ケースは付表 3-10 にまとめた。

付表 3-10　代替シナリオ（Altered evolution scenarios）の“Seal failure”シナリオにおける解析対象ケース(ANDRA, 2005a)

	処分セルプラグ	処分場モジュールと処分セルのシール材	水平連絡坑道のシール材	アクセス坑道のシール材
基本シナリオ(Normal evolution scenario)	C 廃棄物処分セルプラグのみ欠陥	有効	有効	有効
ケース 1：シャフトシール材不良シナリオ	C 廃棄物処分セルプラグのみ欠陥	有効	有効	不良
ケース 2：水平坑道シール材不良シナリオ	C 廃棄物処分セルプラグのみ欠陥	不良	不良	有効
ケース 3：全シール材不良シナリオ	B、C 廃棄物のセルプラグの欠陥	不良	不良	不良
ケース 4：処分場の廃棄	C 廃棄物処分セルプラグのみ欠陥	有効	有効	シール材なし

水理解析は計算量の削減のため、使用済み燃料処分場エリア（CU1、 CU2）及びガラス化廃棄物エリア（C1/C2、 C3/C4）に限定された。シール材の全体的な劣化（付図 3-34 及び付図 3-35）の表現は、坑道においては比較的迅速な移動が予想される(ANDRA, 2005a)ことから、基本シナリオの水理地質学的モデルに対応する動水勾配 0.2 [m/m] (区域内の最大値)が計算に採用されている。ANDRA(2005a)では、以下のような記述がある。

設計された構造では比較的迅速な移動が予想されるため、現在の水文地質モデルに対応する動水勾配、つまり 0.2 m / m（処分場内の最高値）が計算に採用されている。(7.2.2.1 Generic data for all calculation cases, p.472)。

また、EDZ については基本シナリオと同等にシャフト半径 R に対して任意の値である 0.1R の範囲を想定しているが、このシナリオではシール材によって埋められることがないと想定されている。なお、0.1R という範囲については以下のような記述がある。

フラクチャ領域は、0.1 R（R はシャフト半径）まで伸び、シールによって埋められていないと想定されている。なお、前述の範囲は、モデルでは Callovo-Oxfordian 層のその区域におけるフラクチャ領域を予測できないため、任意である（7.2.2.2 Distinction according to calculation case, p.473)。

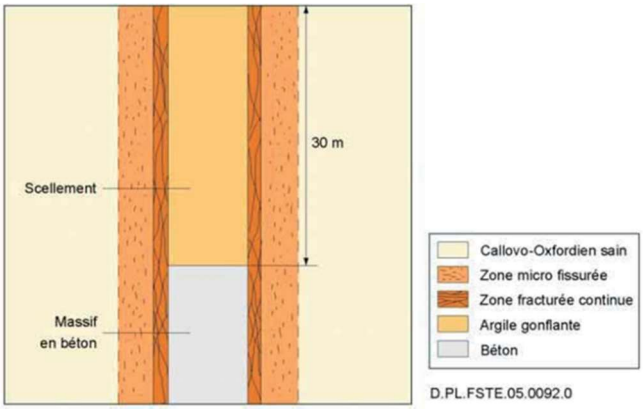
ケース 1、2、3 においては以下の付表 3-11 の透水係数が割り当てられている。なお、ケース 4 に対しては欠陥のあるシール材の透水係数は 1.0×10^{-6} [m/s]が使用された。ケース 4 の透水係数の設定については以下の記述の通りである。

● *計算ケース 4: 立坑のシール材が無効状態での処分場の廃棄*

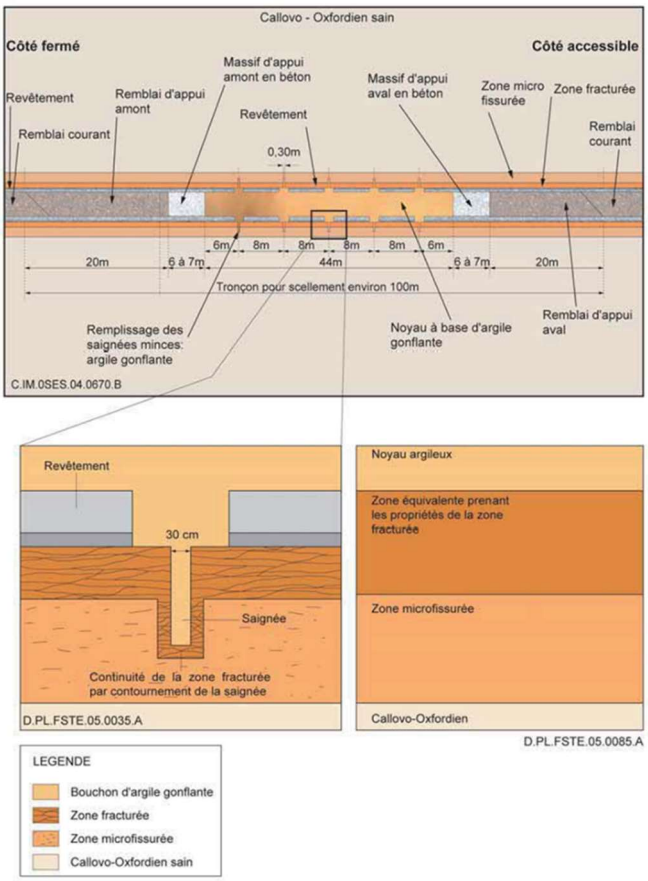
処分場は放棄され、シャフトはシールされていないと仮定する。しかし、他のすべての構造(メインアクセス水平坑道及び二次接続水平坑道、処分セルアクセス水平坑道)は、埋め戻され、封止される。つまり全ての水平坑道は閉鎖される。このケースは、破壊的な事象(立坑のシール欠如)が処分場放棄の時点から生じるので、他のものとは異なって分析される。
この特定の状態では、立坑の閉鎖不良は、シール材が設置されるべき位置における高透水性(1E-6 m/s)としてモデル化される。なお、立坑のシール材が有効である場合には 1E-11 m/s である(7.2.2.2 Distinction according to calculation case, p.746)。

ANDRA (2005a)ではシール材に欠陥のある場合に地下水の流動経路となると想定されるフラクチャ領域の透水係数を 5.0×10^{-9} [m/s]及び 5.0×10^{-6} [m/s]に、微小亀裂領域の透水係数を 5.0×10^{-11} [m/s]及び 5.0×10^{-9} [m/s]とした感度解析を実施している(なお後者は"劣化した(Degraded)" EDZ と呼ばれている)。感度解析の結論として以下のように述べられていることから、最も悲観的なケースにおいても坑道系を通過する地下水量は大きく増加することがないと想定されていることが考えられる。

EDZ の性状が、処分場の坑道系、特にシャフトから流出する流れに著しく影響を及ぼすことが確認された。しかしながら、最も悲観的な構成においてさえ、フローは非常に小さいままである。(中略)主要な移動経路は依然として地質学的障壁である。(7.2.6 Lessons drawn from the seal failure altered evolution scenario, p.509)。



付図 3-34　欠陥のあるシャフトの概略図(ANDRA, 2005a)



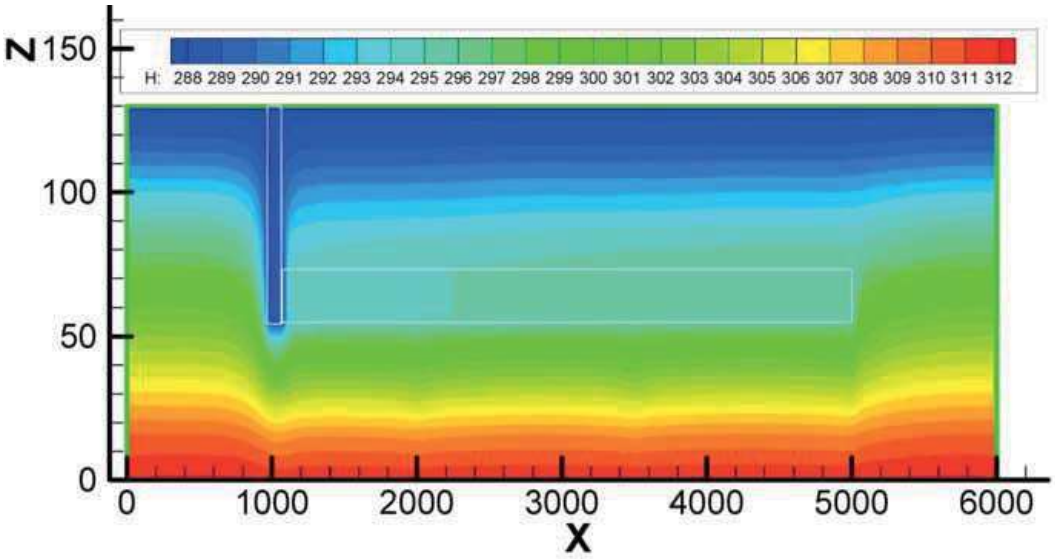
付図 3-35　欠陥のある水平連絡坑道の概略図(ANDRA, 2005a)

付表 3-11　水理解析（基本シナリオ及び“Seal failure”シナリオのケース 1、2、3）における透水係数(ANDRA, 2005a)

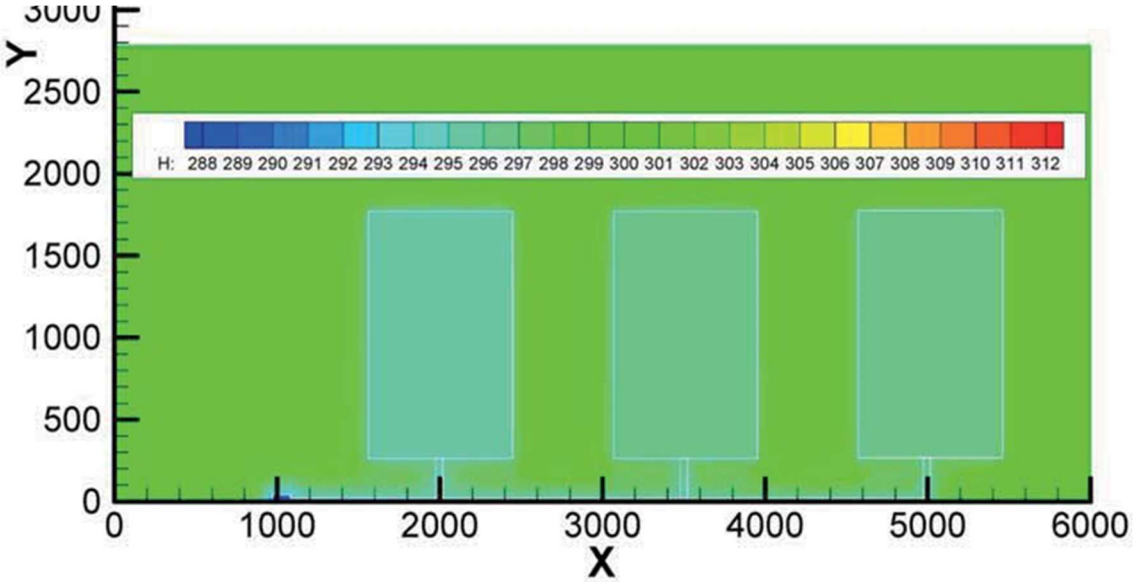
シール材の透水係数	$K = 10^{-11}$ m/s
フラクチャ領域の透水係数	$K = 5.0\times10^{-9}$ m/s
微小亀裂領域の透水性	$K = 5.0\times10^{-11}$ m/s
Callovo-Oxfordian 層における鉛直方向の透水性	$K_V = 5.0\times10^{-14}$ m/s
Callovo-Oxfordian 層における水平方向の透水性	$K_H = 5.0\times10^{-13}$ m/s

(c) 解析結果

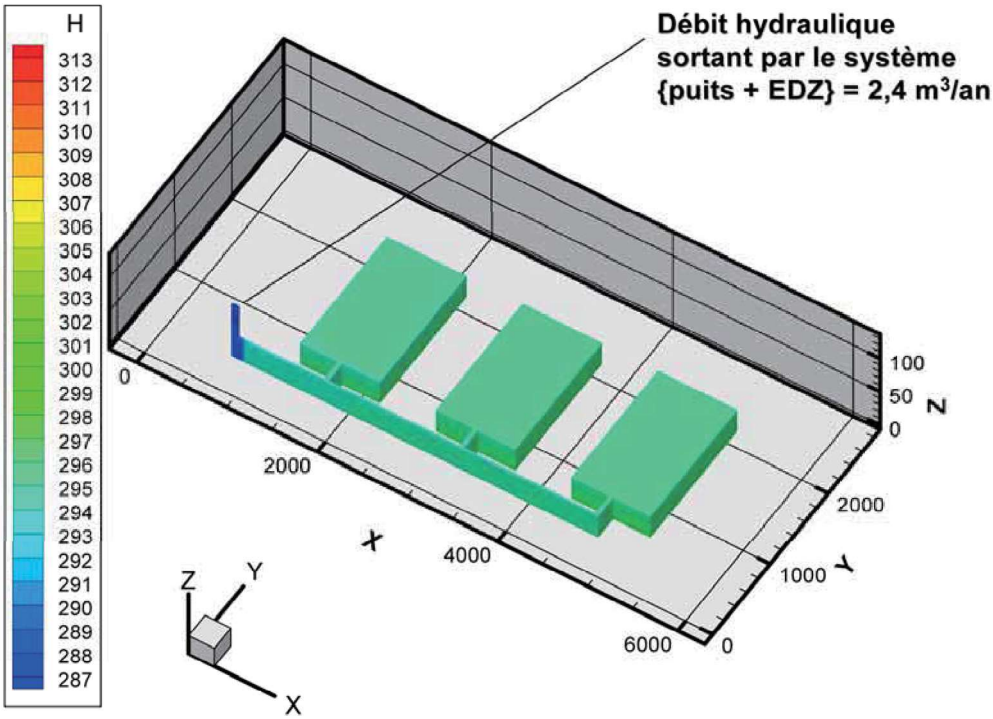
使用済み燃料処分場エリア（CU1、 CU2）の水理解析の結果、ケース 1、2、4 においては、基本ケースに比較して移流経路の変化はあまりなく、拡散による移動のほうが優勢であると評価されている。一方、最も悲観的なケース（ケース 3 : 全シール欠陥シナリオ）においては、アクセス坑道周辺において基本シナリオに比較して 4m 水理水頭が低下することが示された。シャフトを経由して排出される水量は約 2.4 m^3/年と算出された（付図 3-36～付図 3-38）。



付図 3-36　CU1 使用済み燃料処分場エリアのアクセス坑道の断面における水理水頭の分布（ケース 3）(ANDRA, 2005a)

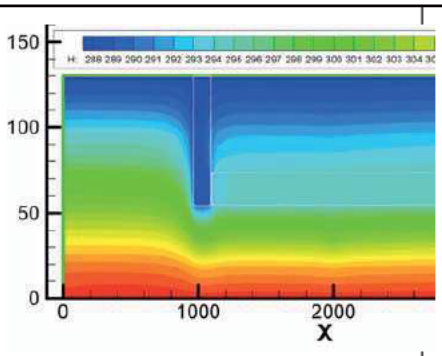


付図 3-37　CU1 使用済み燃料処分場エリアの水平断面における
水理水頭の分布（ケース 3）(ANDRA, 2005a)

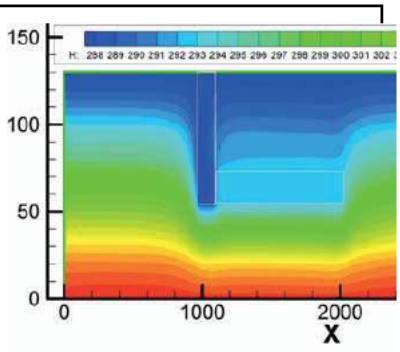


付図 3-38　CU1 使用済み燃料処分場エリアにおける流れの分布
（ケース 3）(ANDRA, 2005a)

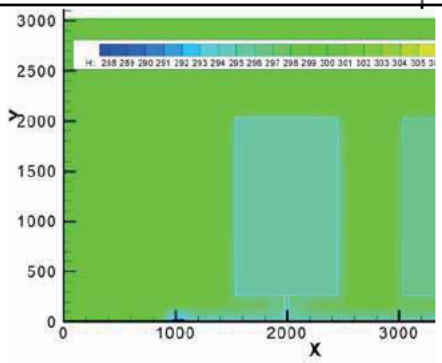
C 廃棄物エリアの解析結果（付図 3-39）においても、CU1 使用済み燃料処分場エリアと定性的には同様の結果となった。最も悲観的な状態(ケース 3)では、水理水頭は、C1/C2 エリアでは約 5 メートル、C3/C4 エリアでは 6 メートル低下する。C 廃棄物エリアにおいてはアクセス坑道から排出される水流は、CU1 使用済み燃料エリアについて評価されたものよりも低い。



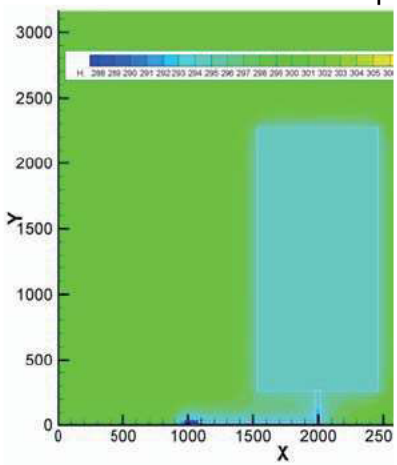
Coupe verticale - colis types C1/C2



Coupe verticale - colis types C3/C4



Coupe horizontale - colis タイプ C1/C2



Coupe horizontale - colis タイプ C3/C4

付図 3-39　C 廃棄物処分場エリアにおける水理水頭の分布
（ケース 3）(ANDRA, 2005a)

なお、CU1 使用済み燃料処分場エリアについて、EDZ の透水係数に関する感度解析も実施されている（付図 3-40）。

	Reference calculation Phenomenological EDZ	Sensitivity calculation 'Degraded' EDZ
Fractured zone	$K = 5.10^{-9}$ m/s Anions : $De_{Anions} = 1.10^{-11}$ m²/s $\omega_{Anions} = 0.15$ Cations : $De_{Cations} = 5.10^{-10}$ m²/s $\omega_{Cations} = 0.20$ Phenomenological geochemical retention	$K = 10^{-6}$ m/s pessimistic coefficient ($Dp = De / \omega = 2.10^{-9}$ m²/s) No geochemical retention
Microfissured zone	$K = 5.10^{-11}$ m/s Anions : $De_{Anions} = 5.10^{-12}$ m²/s $\omega_{Anions} = 0.05$ Cations : $De_{Cations} = 2,5.10^{-10}$ m²/s $\omega_{Cations} = 0.18$ Phenomenological geochemical retention	$K = 5.10^{-9}$ m/s Anions : $De_{Anions} = 1.10^{-11}$ m²/s $\omega_{Anions} = 0.04$ Cations : $De_{Cations} = 5.10^{-10}$ m²/s $\omega_{Cations} = 0.21$ Conservative geochemical retention

付図 3-40　EDZ の透水係数に関する感度解析(ANDRA, 2005a)

最終的には、EDZ の透水係数に関する感度解析を含めた結論として、計算ケース別の立坑経由で排出される水量（付図 3-41）が示された。“Seal failure”シナリオにおいては、すべてのシール材に欠陥がある場合、また、EDZ の透水率が高い場合に立坑を介した地下水の排出が増加することが示された。なお、ANDRA(2005a)には坑道系（EDZ）に流入する地下水量についての検討は明記されていない。結論部分の以下のような記述から、大局的には、周囲の地層から処分場システムに流入する地下水が坑道系を通り立坑から排出されると想定されていることが示唆される。

シールが«水循環に対する抵抗»に大きく貢献していることは注目に値する。ただし、地質学的媒体（デッドエンドタイプツリーレイアウト（引用注：行き止まりの構造のこと。2) ③(b)に後述）によって発揮される）は、すべてのシール材が破損した場合でも、水の流入を制限することで冗長性のあるシール機能を果たす。

（中略）

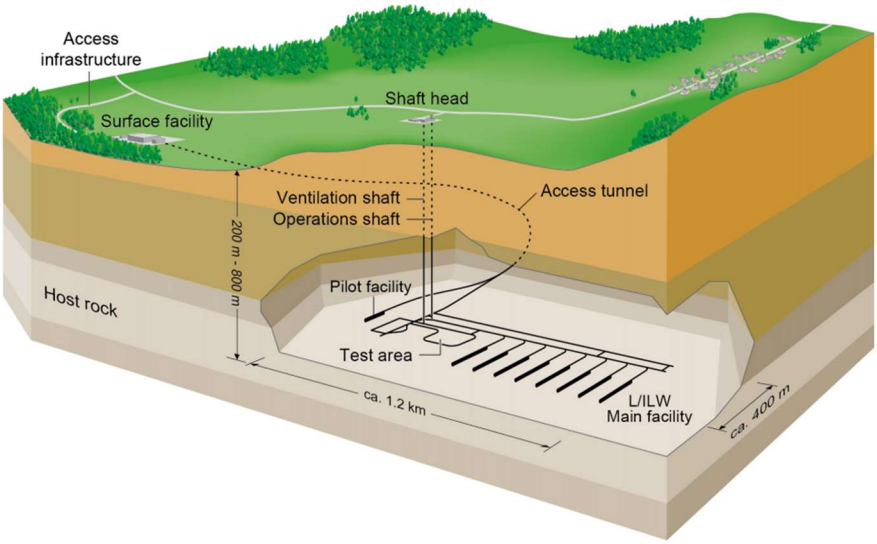
これらのシステムの有効性のために、「シール材欠陥」の影響は、基本変遷シナリオの影響よりも大きいようには見えない（7.2.6 Lessons drawn from the seal failure altered evolution scenario, p.511）。

Situations	Hydraulic flow leaving the shafts (m^3/year) Disposal of spent fuel - S2 scenario
All seals effective (normal evolution scenario)	0.5
Access structure seals failed	1.0
Shaft abandonment	1.4
Drift seals failed	0.75
All seals failed	2.4
All seals effective + degraded EDZ	6.3
All seals failed + degraded EDZ	7.5
Access structure seals failed + degraded EDZ	7.1

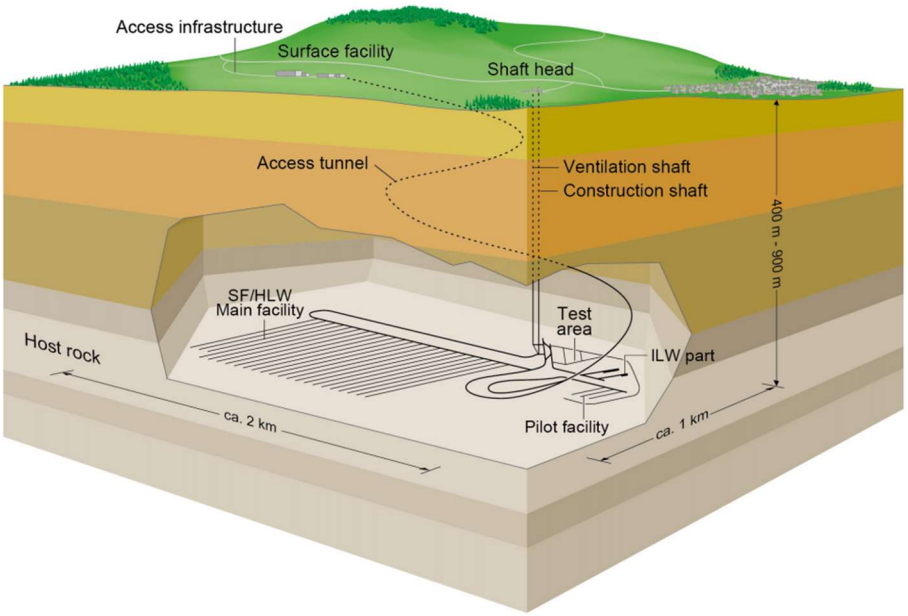
付図 3-41　“Seal failure”シナリオの計算ケース及び EDZ の透水係数が高くなった場合の立坑から排出される水量(ANDRA, 2005a)

(d) Opalinus clay の水理解析

スイスの Opalinus clay プロジェクトにおいては、HLW 及び L/ILW（付図 3-42 及び付図 3-43）を対象として、主要なバリア機能である粘土層の低透水性に対して脅威となり得るシーリングシステムの機能低下及び坑道に沿った地下水流動経路の形成を想定して安全評価を行っている。本項では、透水性の上昇した地下坑道が周囲の岩盤から地下水を集水し、それが端部に位置する高透水性のアクセス坑道（立坑）に流入して速やかに地表に至るという流動場の根拠となる地下水流動解析の内容を述べる。



付図 3-42　L/ILW 処分場の概念図(NAGRA, 2014)
地上と処分エリアを連絡するのは、2 本の立坑（換気シャフト及び建築用シャフト）及び 1 本の斜道（アクセス坑道）である。



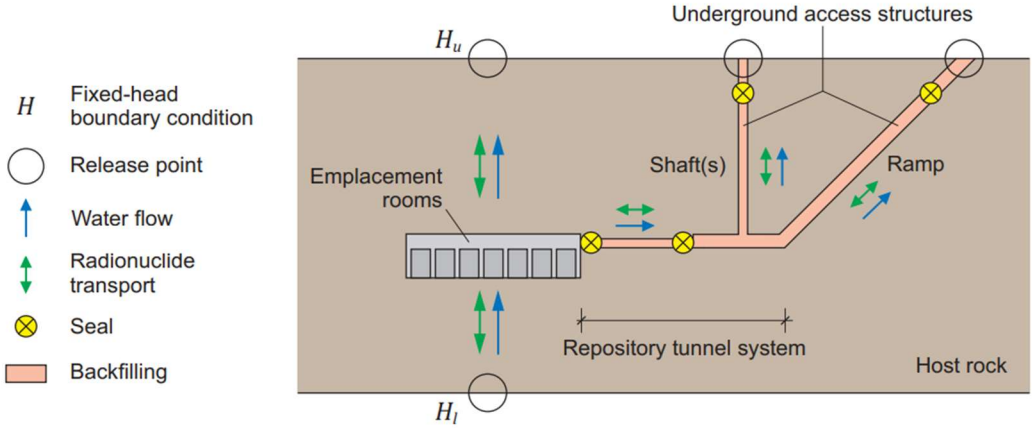
付図 3-43　HLW 処分場の概念図(NAGRA, 2014)
地上と処分エリアを連絡するのは、2 本の立坑（換気シャフト及び建築用シャフト）及び
1 本の斜道（アクセス坑道）である。

(e) 背景及びシナリオ定義

Project Opalinus Clay では、NAGRA(2002a)及び NAGRA(2002b)によって自然の動水勾配、トンネルの収束、処分場由来のガスによって生成される水流が坑道系を介して流動することを想定した放射性核種放出のシナリオが放射性核種輸送モデリングですでに評価されている。NAGRA(2014)は、母岩からの地下水流入だけでなく処分場の坑道系から流入するシナリオを加え、それらの先行研究を補完した位置づけである。

NAGRA(2014)における検討の主要な目的は、地下の処分場への主要アクセス坑道として斜道とシャフトを比較することにある。経緯としては、2012 年の SGT Stage2 における主要な議題が地下施設へのアクセスルートをシールする最新技術であったことから、閉鎖後の安全性に対するさまざまな種類のアクセスルートの影響を体系的に評価するために以前の分析の拡張を提示した、と言及されている。本項目では、透水性の上昇した地下坑道が周囲の岩盤から地下水を集水し、それが端部に位置する高透水性のアクセス坑道（立坑）に流入して速やかに地表に至るという流動場の根拠となる地下水流動解析の内容を、NAGRA(2014)に基づいて述べる。

付図 3-44 は処分場の概念モデルである。定置された廃棄物を含む処分エリア、処分エリアの連絡坑道、及びアクセス坑道（2 つの主要なタイプである斜道と立坑）を概略的に示している。すべての地下構造物は埋め戻され、シール材は指定された場所に設置される想定である。



付図 3-44　坑道システムを介した放射性核種の移動に関する概念モデル(NAGRA, 2014)
母岩の上下には比較的透水性の高い帯水層が存在し、悲観的な想定として上の帯水層には下の帯水層よりも小さな水理水頭値が割り当てられている。青の長い矢印はこの水頭差による地下水の流向を示す。

比較的透水性の高い地層（帯水層）が、母岩の上下に存在する。これらの帯水層では水理水頭が異なり、母岩を通る地下水の流れが広く鉛直方向になる（付図 3-44 の長い青い矢印）。アクセス坑道を介した放射性核種の放出に関する悲観的な仮定として、上の帯水層には下にある帯水層よりも低い水理水頭値が割り当てられている。NAGRA(2014)では、ほとんどのシナリオでシール材と埋め戻し材料がバリア機能を完全に満たさないと想定されているため、坑道系に沿った水流と放射性核種の輸送が生じる可能性がある（付図 3-44 の短い青と緑の矢印）。また、坑道系を介する流れの他にも、母岩を経由した放射性核種の移動も生じる（付図 3-44 の緑の長い矢印）。なお、母岩の境界に到達する放射性核種（その到達地点は放出点とも呼ばれる）は、即座に生物圏に移動すると想定されている。

NAGRA(2014)におけるモデリングアプローチによる安全評価は、最終的には以下の 3 つのステップで個人線量を算出することで評価を行う。まず、坑道ネットワーク（処分エリアを含む）がフローモデルに実装され、坑道系に沿った流量が計算される。次に、関連するすべての輸送経路が輸送モデルに実装される。その際個々の輸送経路内の流量はフローモデル計算から取得される。最後に、生物圏線量換算係数を使用して、処分場システムの出口地点で計算された放射性核種放出率から個人線量を算出する。

流れのモデル化において、母岩、処分エリア、その他の地下構造（後者の 2 つは EDZ に囲まれている）はそれぞれ、等方性の流動特性を備えた飽和した均質な多孔質媒体としてモデル化されている。また、流れはダルシー則に支配されていると仮定し、定常状態の流れが推定された。

処分場の坑道系に沿った流量は、抵抗ネットワークアプローチによって計算される。このアプローチでは、すべての地下構造が連続的な抵抗として表され、これらはレグと呼ばれる。各地下構造の軸に沿った連続的な流れと水理水頭分布は、分析的アプローチを使用して明示的に計算される。結節点で結合されているレグは、大きく 2 種類ある。

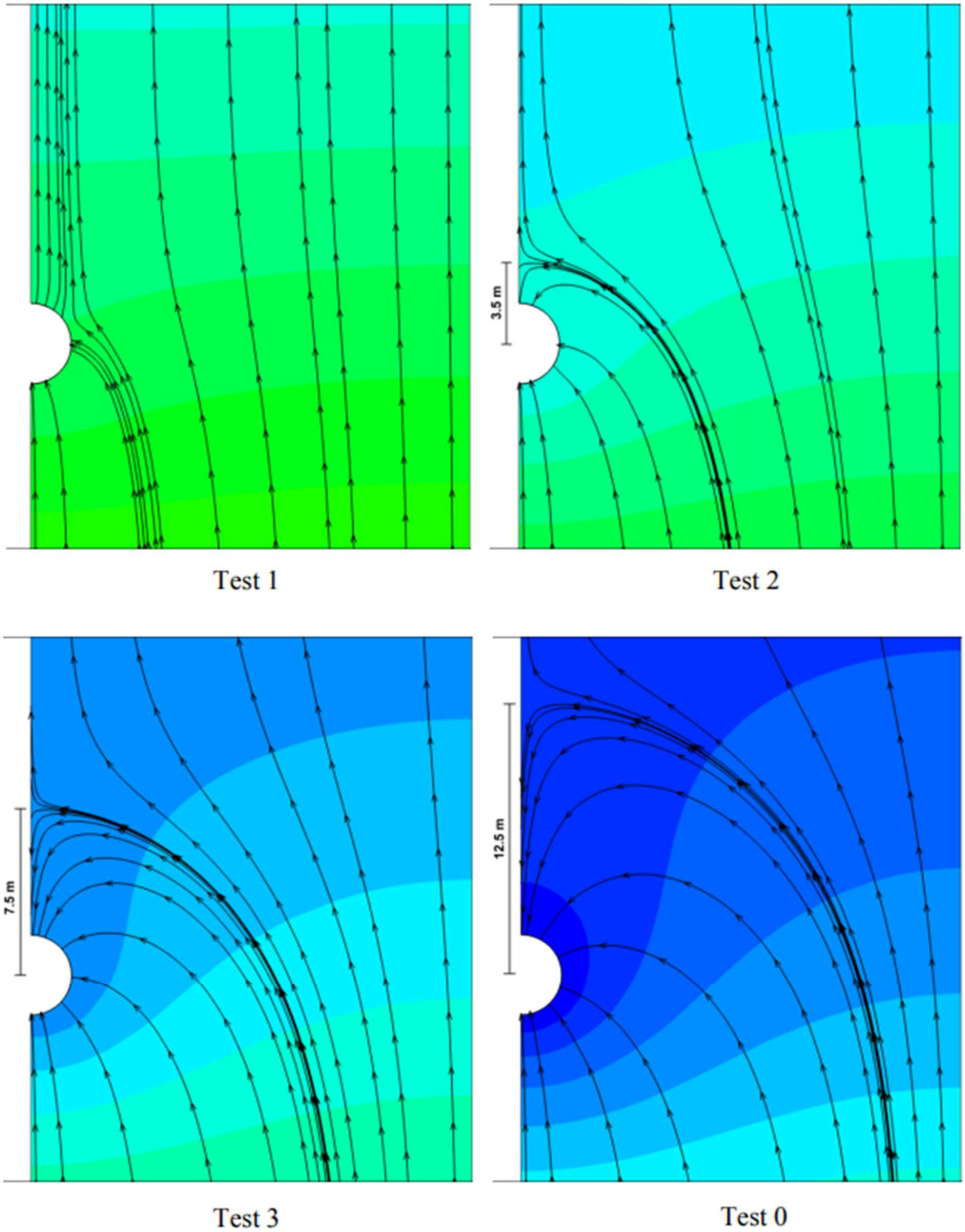
- Dead-end レグ：1 つの閉じた端と 1 つ以上の坑道に接続するもう一方の端を持つレグ（例：廃棄物定置エリア）

・ Open-end レグ：両端が（i）1 つ以上のレグに接続する、または（ii）水理水頭が指定された境界を持つポイントに接続する（例：建設用アクセス坑道、斜道、立坑）

レグに沿った水理水頭分布の計算では、坑道系への水の流入と坑道系に沿った水の流れの両方が考慮された。この場合、坑道系と周囲の母岩の間の水理水頭差によって流れが発生する。地下構造のシステムを通る流れは、周囲の動水勾配に比例して変化する。

各レグは、均質な等方性材料の真っ直ぐな円形チューブ（トンネルと呼ばれる）として概念化され、さらに環状の均質かつ等方性の領域（EDZ）に囲まれる。

まず、SF / HLW 廃棄物定置室周辺の坑道断面における水理水頭分布が検討された（付図 3-45）。坑道の水理水頭は 45m(Test1)、 30m(Test2)、 15m(Test3)、 0m(Test0)と設定された。なお、処分場深度の周囲の水頭は 55m と設定された。坑道内の水理水頭が下がった場合、周囲の岩盤から地下水を集水することが示唆される。

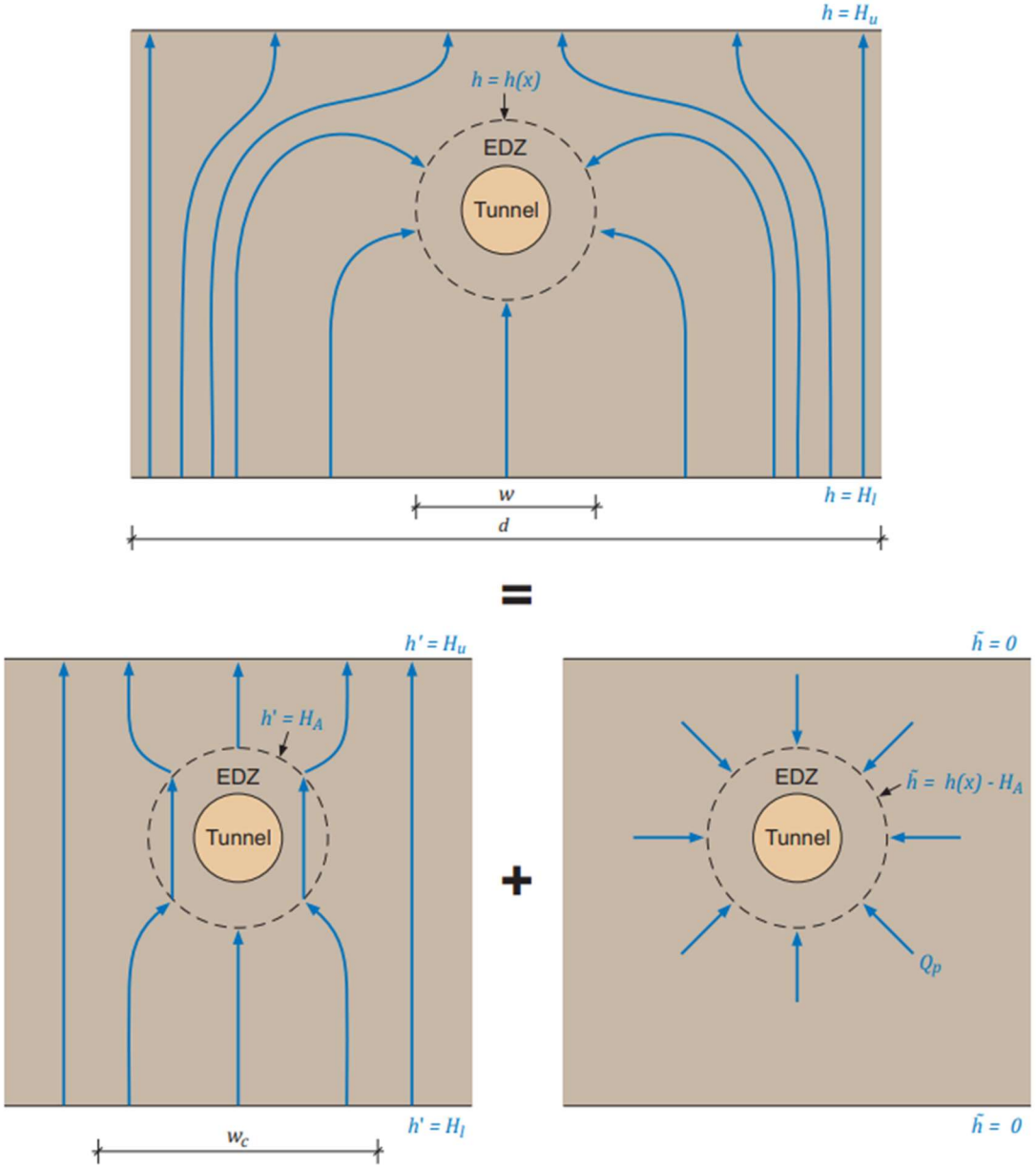


付図 3-45　SF / HLW 設置室周辺の坑道断面における水理水頭分布と流線(NAGRA, 2014)
坑道の水理水頭は 45m(Test1)、 30m(Test2)、 15m(Test3)、 0m(Test0)と設定された。なお、処分場深度の周囲の水頭は 55m である。

なお、坑道周囲の流れは以下の流れの足し合わせとなる（付図 3-46）。

- 構造（トンネルとその EDZ）が水のシンクとして機能しなかった場合に発生する周囲の動水勾配に起因する流動場。

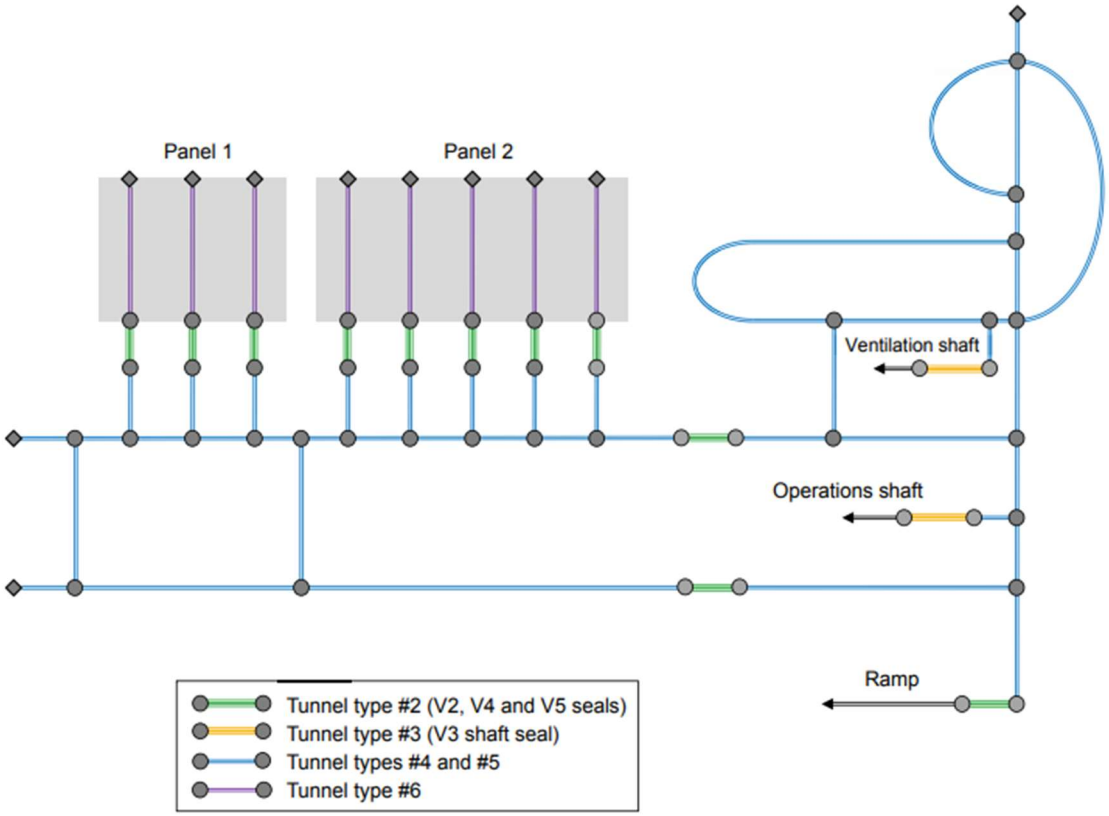
・　周囲の水圧勾配がない場合の、構造物単独のシンク効果による流動場。



付図 3-46　坑道鉛直断面の水流(NAGRA, 2014)
（左下）構造（トンネルとその EDZ）が水のシンクとして機能しなかった場合に発生する周囲の動水勾配に起因する流動場（右下）周囲の水圧勾配がない場合の、構造物単独のシンク効果による流動場。（上）坑道周囲で生じる流動場。

この図において、水理水頭 h[m] は h'[m] （付図 3-46 左）と h~[m]（付図 3-46 右）の和である。また、H_u[m] 及びH_l[m] はそれぞれ母岩の上下の境界における水理水頭、H_A[m] は処分場深度における水理水頭、h(x)[m] は坑道に沿った水理水頭を表す。

付図 3-47 は斜道をメインアクセス坑道とした L / ILW 処分場のフローモデルの例である。地下構造は特性に応じて、6 つの異なるトンネルタイプ（＃1～＃6）のいずれかに割り当てられる。基準ケースにおいて各タイプに割り当てられたパラメータ付図 3-48 に示す。



付図 3-47　斜道をメインアクセス坑道とした L / ILW 処分場の基準ケースのフローモデル (NAGRA, 2014)

トンネルは材質等によって 6 タイプ設定された。なお、メインアクセス坑道が斜道ではなく 3 番目の立坑である代替レイアウトでは、ランプシール（トンネルタイプ#2）がシャフトシール（トンネルタイプ#3）に置き換えられる。

Tunnel type (backfill / sealing material)		Tunnel			EDZ		
		K	n	ρ_s	K	n	ρ_s
		[m/s]	[-]	[kg/m^3]	[m/s]	[-]	[kg/m^3]
#1	SF / HLW emplacement rooms and seal V1 (compacted bentonite)	1E-13	0.36 (0.05)[2]	1'650	1E-12	0.14[1]	2'430
#2	Seals V2, V4, V5 (compacted sand / bentonite mixture 70/30)	1E-11	0.27[3]	480	1E-11		
#3	Shaft seal V3 (compacted bentonite)	1E-13	0.36 (0.05)[2]	1'650	1E-12		
#4	Other tunnels (sand / bentonite mixture 70/30)	1E-9	0.3	450	1E-10		
#5	Other tunnels (crushed host rock)	1E-9	0.4	1'500	1E-10		
#6	L/ILW and ILW emplacement rooms [2] (mortar)	1E-6	0.2	not required	1E-10		

[1] Senger & Ewing (2008), valid for an equivalent porous medium

[2] Nagra (2010)

[3] Nagra (2008e)

付図 3-48　トンネルタイプ別の性質と基準ケースにおけるパラメータ
（透水係数 K、 孔隙率 n、 密度 ρ）(NAGRA, 2014)

解析は基準ケースに加え、付図 3-49 のケースについて行われている。

Set	Tunnel #1 and shafts #3		Tunnel #2		Tunnels #4 and #5		Tunnel #6		Host rock	
	Tunnel K1 K1-V1 K3	EDZ KDZ1 KDZ1-V1 KDZ3	Tunnel K2-V2 K2-V4 K2-V5	EDZ KDZ2-V2 KDZ2-V4 KDZ2-V5	Tunnel K4 K5	EDZ KDZ4 KDZ5	Tunnel K6	EDZ KDZ6	HLW KROCK	L/ILW KROCK
BC	1E-13	1E-12	1E-11	1E-11	1E-9	1E-10	1E-6	1E-10	2E-14	1E-13
Overriding system analyses (SA)										
SA1	1E-12	1E-11	as *BC*		as *BC*		as *BC*		as *BC*	
SA2	1E-11	1E-10	as #1 and #3		as *BC*		as *BC*		as *BC*	
SA3	1E-10	1E-9	as #1 and #3		1E-9	1E-9	1E-6	1E-9	as *BC*	
SA4	1E-9	1E-8	as #1 and #3				1E-6	1E-8	as *BC*	
SA5	1E-8	1E-7	as #1 and #3				1E-6	1E-7	as *BC*	
SA6	1E-7	1E-6	as #1 and #3				1E-6	1E-6	as *BC*	

Set	Tunnels #1 and #2	Tunnels #4 and #5	Shafts #3	Tunnel #6	Host rock
Quality of horizontal seals (QHS)					
BC_3S	as *BC*				
QHS1	as *SA2*	as *BC*	as *BC*	as *BC*	as *BC*
QHS2	as *QHS1*		1E-11 (EDZ only)	as *BC*	as *BC*
QHS1_3S	as *QHS1* but with a third shaft instead of a ramp (see Appendix A.1)				
QHS2_3S	as *QHS2* but with a third shaft instead of a ramp (see Appendix A.1)				

Note: Hydraulic conductivity values are in [m s^{-1}].

付図 3-49　計算ケース(NAGRA, 2014)
BC は base case（基準ケース）を表す。

基準ケースは、閉鎖後の段階での廃棄物定置エリアからの放射性核種の放出が、主に岩盤を通して鉛直方向に発生する状況を表している（レファレンスシナリオと呼ばれる）。基準ケースにおいては、廃棄物定置エリアから坑道系に流出する流れは非常に少なく、フローモデリングでは検出できない。基準ケースは、少なくともニアフィールドにおいては拡散が主要な輸送プロセスであり、坑道系に沿った放射性核種の放出は無視できる(NAGRA, 2014)。

一方、各処分場について、処分坑道及びアクセス坑道で透水係数の値が徐々に増加する 6 つのケース（SA1 から SA6）が定義されている。たとえば、SF / HLW 処分場の EDZ で想定される透水係数の値は、1.0×10^{-11} [m/s]（SA1）から 1.0×10^{-6} [m/s]（ケース SA6）の範囲となる。ただし、これらの値はあくまで仮説として決定されており、埋め戻し材やシール材等の品質劣化や EDZ の状態変化等とは関連はない(NAGRA, 2014)。特に、SA4 から SA6 のケースは極端ケースとみなすことができる。パラメーターセット SA4 で想定される透水係数は、例えば、ベントナイ

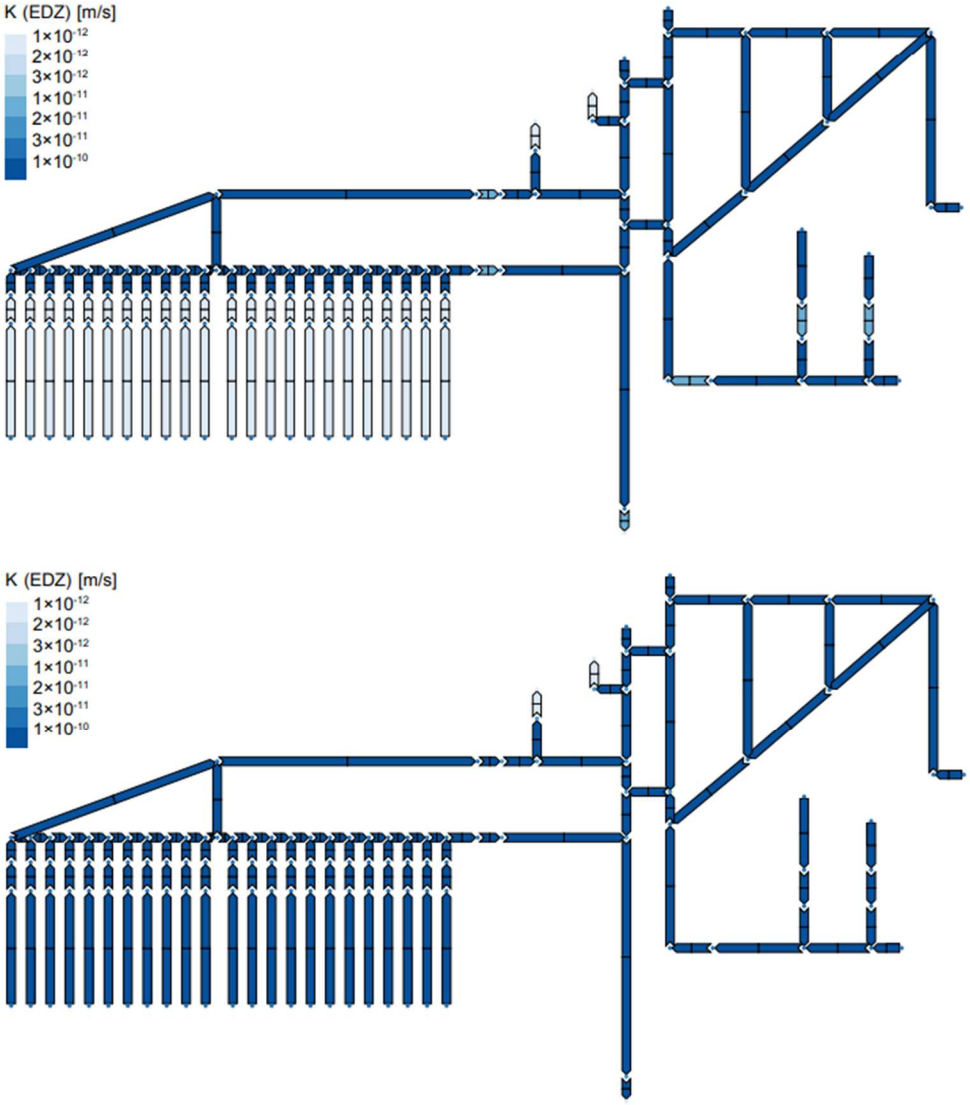
トシールの透水係数、SF / HLW 設置室のバックフィル、及び関連する EDZ が基準ケース値を 4 桁上回る。これらの透水係数の設定については、解析の結果から以下のように述べられている。

坑道系の透水係数を徐々に増加させる(BC→SA1→SA2→…→SA6)と流量は増加していくが、ある程度流量が収束していくことが見て取れる（SA5 と SA6 では結果にあまり大差がない)。これは最終的には流入量が母岩の透水係数に制約されているためである（5.1.2 Overriding system analyses, p.55)。

以上のように、最も悲観的なケースにおいても、坑道系を流れる水量が最終的に母岩の透水係数に依存することが述べられている。

また、水平方向の流動についても 5 つの計算ケースが定義された。この計算ケースの検討目的は、処分場の坑道系を介した地下水流動の観点から、水平シール（斜道シールを含む）の品質が低い場合にメインアクセスルートとして斜坑と立坑のどちらが優位であるかどうかを評価することにある。基準の処分場レイアウトにおいて、ケース QHS1 は、すべての水平シールとそれぞれの EDZ の透水係数が BC に対して増加すると想定している。

付図 3-50 は、ケース HLW_BC 及び HLW_QHS1 のフローネットワークを示しており、レグの色は EDZ の透水係数を示す。ケース QHS2 では、立坑の EDZ についてさらに透水係数を想定している。斜道の代わりに 3 番目の立坑を使用した代替レイアウトの場合、BC_3S、QHS1_3S、及び QHS2_3S の類似の計算ケースが定義されている。

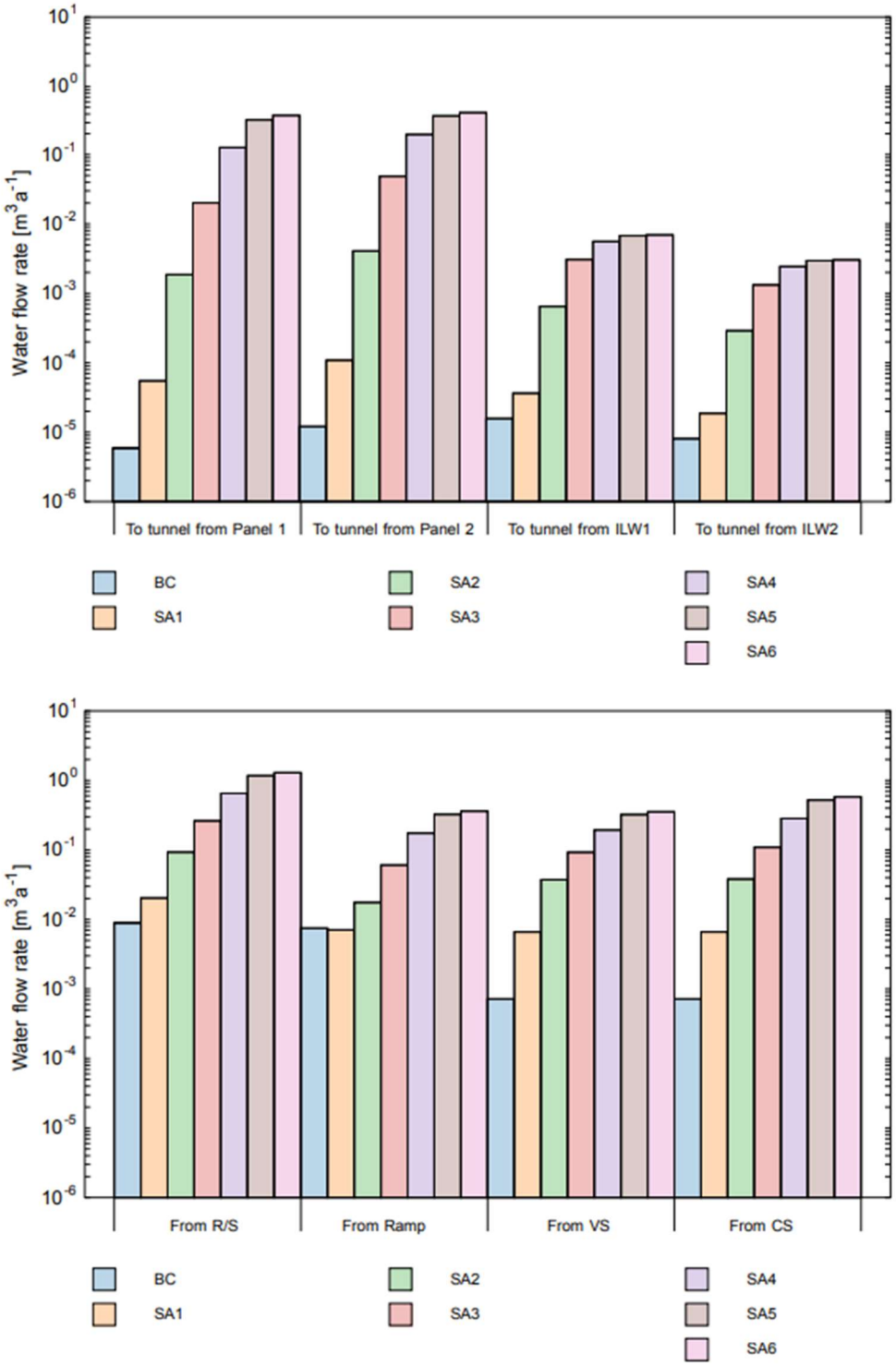


付図 3-50　HLW_BC のフローネットワーク（上）と HLW_QHS1 のフローネットワーク（下）
(NAGRA, 2014)
レグの色は EDZ の透水係数を示す。

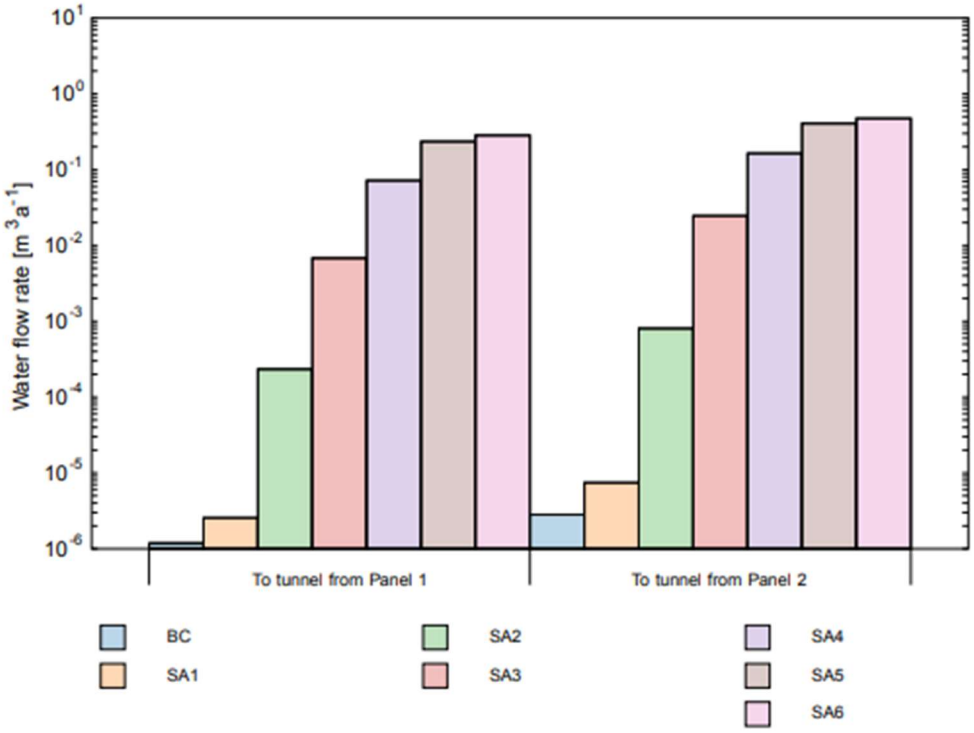
(f) 解析結果

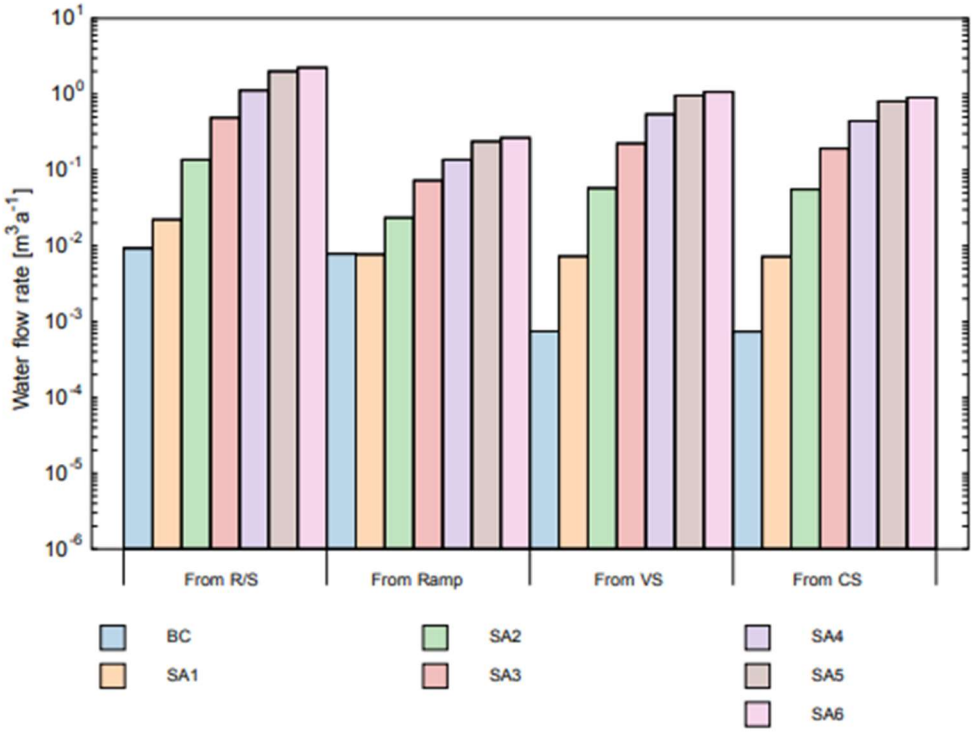
基準ケースについては、廃棄物定置エリアからの流量は非常に低く、ダルシー流動は 1 年あたりマイクロメートル以下のオーダーであった。

坑道系の透水係数が低下する極端ケースにおいて、HLW 及び ILW 処分場の解析結果を付図 3-51 及び付図 3-52 に示す。



付図 3-51　HLW 処分場における処分パネルから主要エリアへ流出する流量（上）
(NAGRA, 2014)
HLW 処分場における斜道及び立坑に存在する流量（下）。上下図とも、BC は基準ケースを示し SA1~6 は高透水率ケースを示す。下図の R/S は斜道及び立坑から排出される総量、VS は換気シャフトからの排出量、CS は建設用シャフトからの排出量を示す。

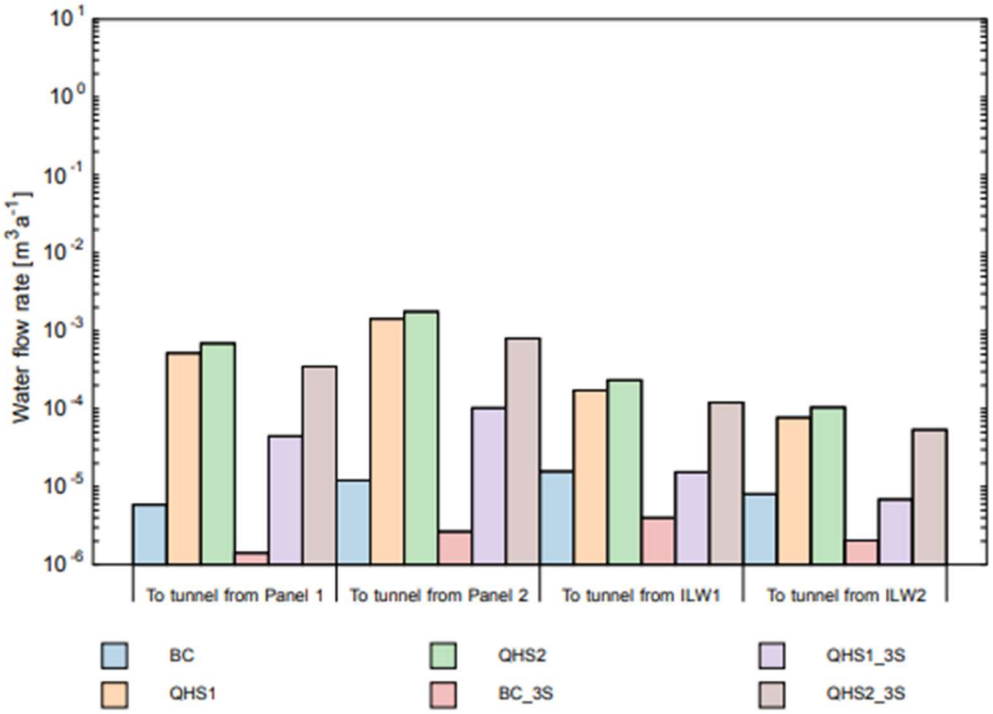


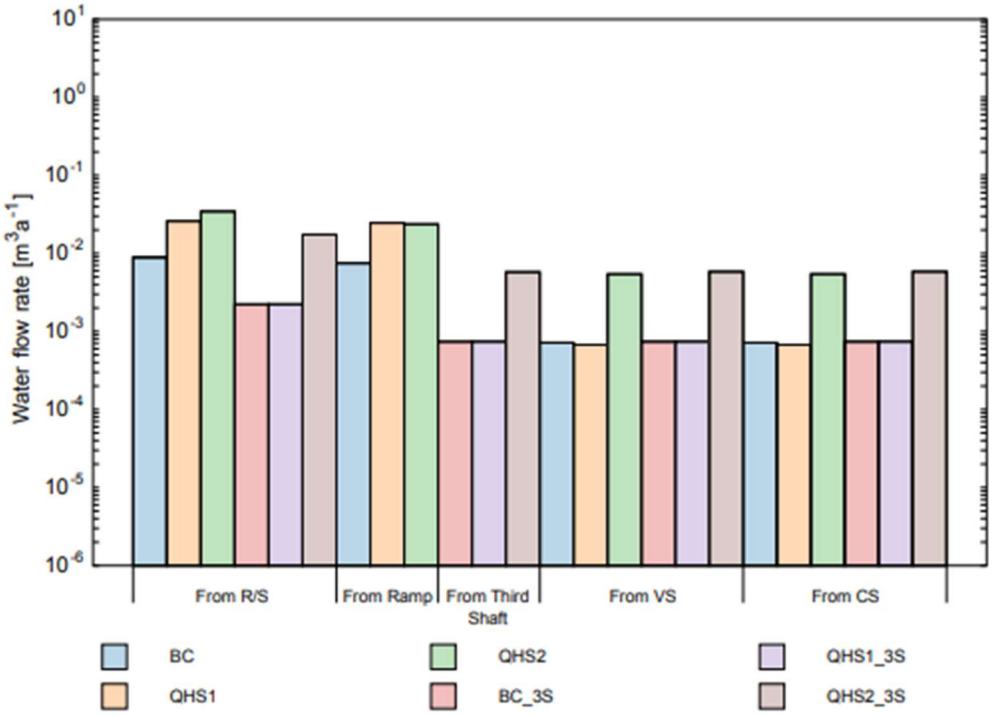


付図 3-52　L/ILW 処分場における処分パネルから主要エリアへ流出する流量（上）
(NAGRA, 2014)
L/ILW 処分場における斜道及び立坑に存在する流量（下）。上下図とも、BC は基準ケースを示し SA1~6 は高透水率ケースを示す。下図の R/S は斜道及び立坑から排出される総量、VS は換気シャフトからの排出量、CS は建設用シャフトからの排出量を示す。

2 つのタイプの処分場（HLW 処分場及び L/ILW 処分場）は、処分場レイアウト、埋め戻し材、シール材、地質環境等が同等であるため似た傾向を示す。斜道及び 2 本の立坑に沿った地下水流動は 0.001 のオーダーで、これは先行研究(Smith et al., 2004)とも一致している。

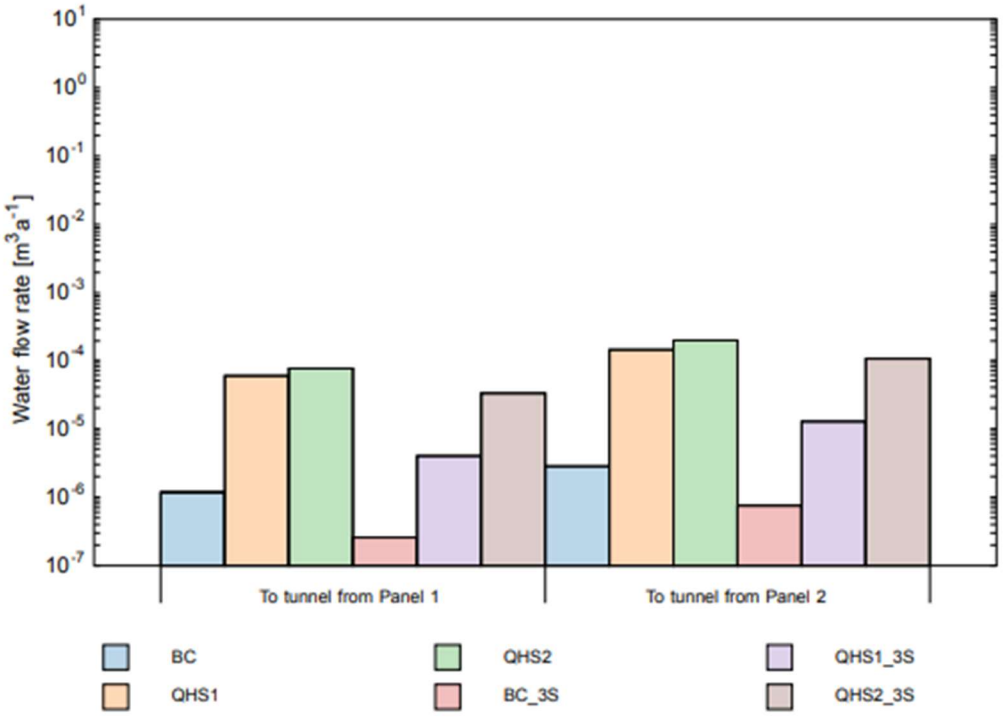
水平方向の流れについては、付図 3-53 及び付図 3-54 のような結果になった。QHS1 ケースでは廃棄物定置エリア及び EDZ において基準ケースに比較して透水係数が 2 桁変化しているが、斜道や立坑には大きな影響は見られない。一方、処分パネルから斜道（なお斜道のシールは水平方向とみなされている）への流れは有意に増加している。

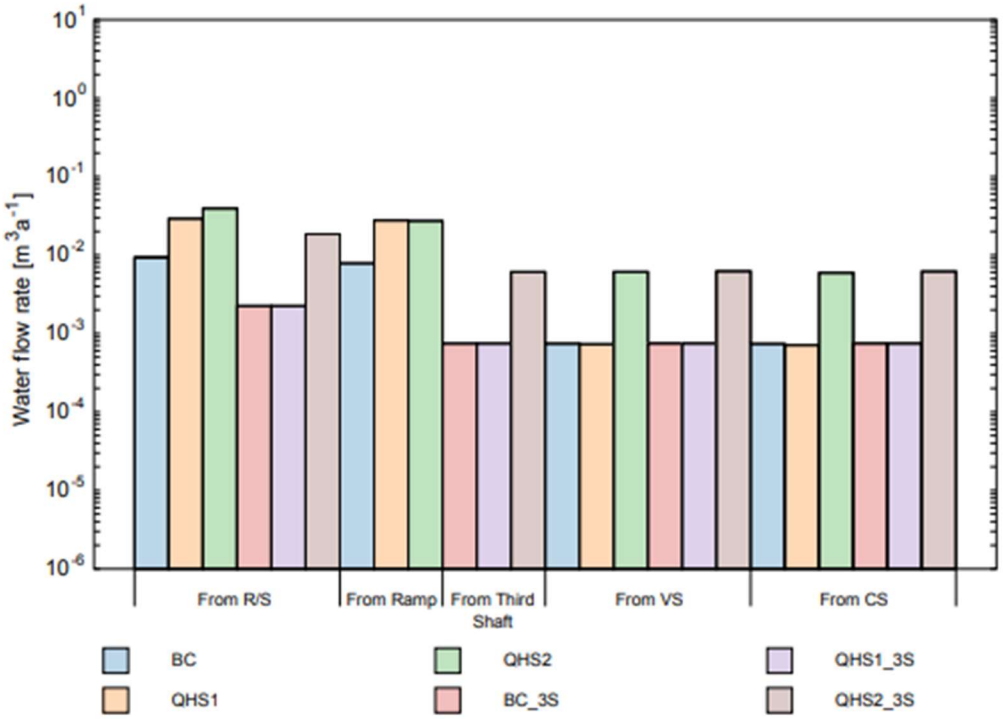




付図 3-53　HLW 処分場における主要な処分パネルから坑道へ流出する流量（上）(NAGRA, 2014)

HLW 処分場における斜道及び立坑に存在する流量（下）。上下図とも、BC は基準ケースを示す。QHS1、 QHS2 は水平方向のシール材品質劣化ケース、末尾に 3S が付くものはアクセス坑道として立坑を使用する代替レイアウトケースを示す。





付図 3-54　L/ILW 処分場における主要な処分パネルから坑道へ流出する流量（上）(NAGRA, 2014)

L/ILW 処分場における斜道及び立坑に存在する流量（下）。上下図とも、BC は基準ケースを示す。QHS1、 QHS2 は水平方向のシール材品質劣化ケース、末尾に 3S が付くものはアクセス坑道として立坑を使用する代替レイアウトケースを示す。

前項の検討より、悲観的な想定として、Opalinus clay の処分場の上位・下位の高透水性の帯水層の存在により鉛直上方に地下水が流動するような環境である場合、かつ、処分パネルを含む坑道系の透水係数が非常に大きい場合、地層中の地下水が坑道系によって集水され、処分パネルから坑道系を介して排出されるような流れが形成されることが示唆される。

なお、個人線量の検討より、これらの極端ケースにおいても防護目標の基準には達しないことは報告書内で示されている。

③ アクセス坑道の本数について

Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay において SR-Site と同様にアクセス坑道から流入した地表水が地下施設を経由して別の立坑（換気用立坑等）から流出する流動を想定すると主要なバリアである低透水性の粘土層の安全機能が完全に無力化されることが考えられる。

本項では、SR-Site、Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay における処分場のアクセス坑道の本数についての検討の背景及び安全性（排気システムや避難等）への懸念に対する検討について述べる。

(a) SR-Site のアクセス坑道のデザインに関する記述

(a)-1 処分場レイアウト全般及び処分場への地下水流入に関する記述

SKB（2011）では、「処分場システムの初期状態（initial state）の包括的な記述は、安全性評価の主要な基盤の 1 つである」と述べている。処分場システムの初期状態とは、主に処分場の設計仕様を意味する。SR-Site の処分場システムの初期状態は多くの Production report にまとめられているが、安全関連の前提条件を設定するための始点となっているのは SR-Can（使用済み燃料のキャニスタ封入施設の検討プロジェクト）で検討されたリファレンスデザインである。SR-Can で定義された安全機能の基準は、設計の前提条件を策定するための基礎としても使用されている。SKB（2011）には、「サイトに適応した処分場施設の最終レイアウトの開発には、観察法に基づく反復設計プロセスの使用が必要である。なお観察法とは、高度な監視及び測定技術等を用いた順応的管理を利用した、リスクベースのアプローチである。」との記載があり、サイトに適応した処分場をデザインすることを前提条件として、最終レイアウトが検討されていることが言及されている。

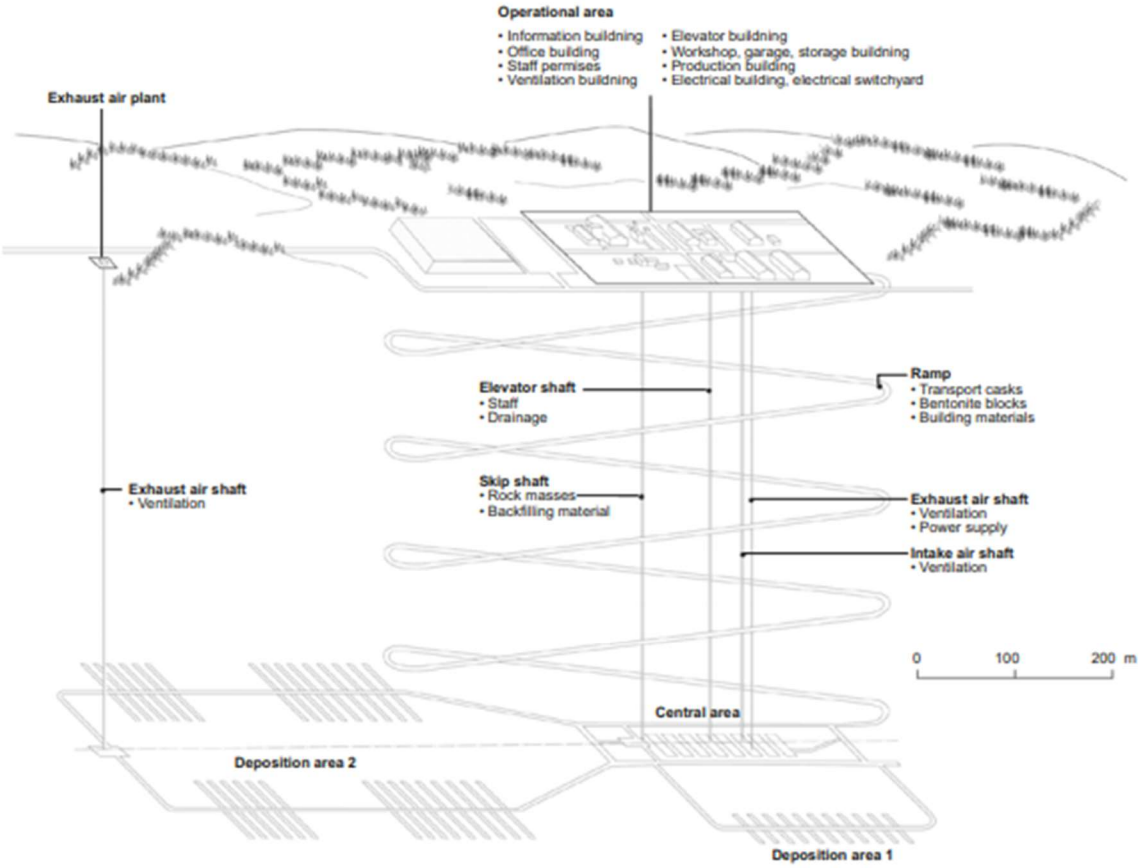
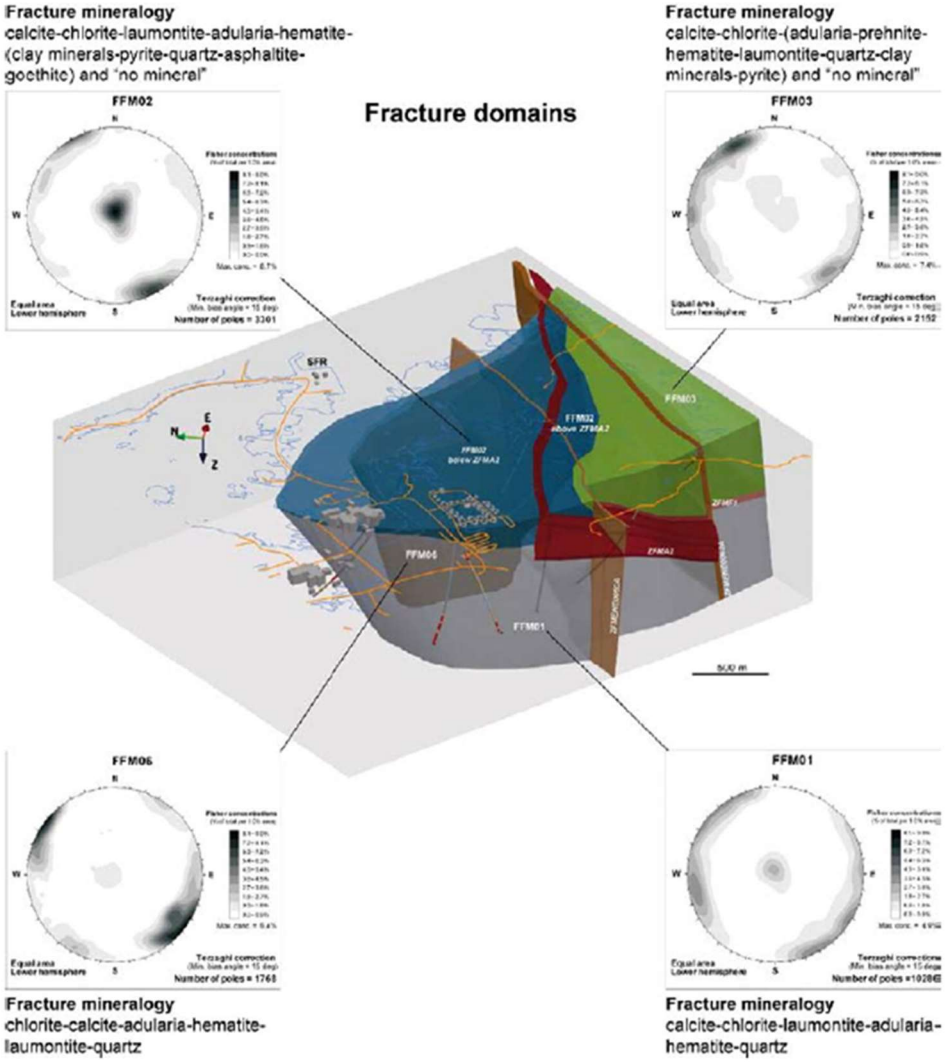


Figure 5-3. *General repository layout showing the location of the underground functional areas (Access, Central and Deposition areas) and the surface facilities.*

付図 3-55　SR-Site のレイアウト(SKB, 2011）

Forsmark のサイトエンジニアリングレポート（SKB, 2009）では、坑道系を含む処分場レイアウトがサイトの亀裂帯の分布に対して最適化されていることが記載されている。



付図 3-56　Forsmark の亀裂帯分布の 3D モデル（SKB, 2009）

(1)で概説した Incompletely sealed repository シナリオにおいてはアクセス坑道、処分場システム及び処分エリアの換気シャフトが地下水の経路となることが示されており、例えば Dossier 2005 Argile において坑道系の出口が 1 か所にまとめられている点と対照的である。処分エリアの換気シャフトについては SKB(2009)に以下の記述がある。

処分エリアにおいては安全な労働環境の維持と処分場深さにおける換気のため十分な数の換気シャフトが必要である。処分エリアにおいては例えば廃棄物の定置が完了して埋め戻された後等には新鮮な空気の需要がある領域が限られており、労働環境及び操業時安全性に関して要求されるレベルを達成するには直径 3m の換気シャフトが 2 本あればよい。これらの換気シャフトの位置は、換気システム及び環境に関する SKB の専門家らの協業によって提案された（4.4.3 Ventilation, p.37)。

ただし 2 本の換気シャフトのうち 1 本は初めから建設され操業時から運用されるものであり、一方 2 本目の換気シャフトは処分場の操業開始から 20 年後に建設されることが記述されている。

上述の通り、SR-Site では処分場エリアにおいても十分な換気を維持するために換気シャフトは必要とみなされているようである。しかし、SKB(2009)には換気シャフトの一方または両方を削減するため空気の流れを最適化する可能性を評価する研究が進行中であるとの記述がある。ここで述べられている研究報告書は現段階では見当たらなかった。

(b) 処分場の安全性に関する記述

地下施設全般に対してはSKB(2009)に以下の記述がある：

操業時のオペレーションや処分場の安全性はスウェーデンの地下施設に対する規制に従う必要がある。AFS2003.2(Arbetsmiljöverket, 2003)に従って施設全般に対して予備的なリスクアセスメントが実施された（5.4 Helth and safety, p.52)。

SKB(2008)に評価されたリスク及びその回避策・緩和策がまとめられている（付図 3-57)。

§ in AFS 2003:2	Risk	Preventive/damage reducing activity	Comment
2 § General Before underground work can start, sufficient investigations and a risk assessment have to be performed.	Insufficient knowledge of the rock	The purpose of the site investigation as well as parts of design step D2 is to understand the rock behaviour. This is also considered in the technical risk assessment for design step D2.	
3 §–8 § General Relates to working methods, equipment, communication, protective gear, light, warning signs and traffic rules.	Accidents, ill health, work-related injuries	These kinds of risks can not be handled or influenced at this stage of the process but are submitted to separate studies during the next design step or construction. However, the facility layout shall be designed to fully separate the different activities deposotion of canisters and rock construction works. No traffic from neither activity is allowed to pass the other activity. The management system shall include instructions on physical protection and safe handling of nuclear material and nuclear waste.	
9 § General Refer to trafficked areas	Traffic accidents	/SKB 2007/ describes tunnel widths and passage of vehicles. It is, however, uncertain whether or not a pedestrian path has been planned for. This issue should be addressed.	
10 § Ventilation	Air pollutions, bad climate (temperature, moisture, oxygen levels). Spreading of blasting fumes and dust. Spreading of fire fumes. Radon	/SKB 2007/ describes the dimensions for ventilation and exhaust-air shafts. Other dimensions are dealt with in separate ventilation studies.	
11 §–13 § Remote controlling	Accidents	These kinds of risks can not be handled or influenced at this moment but are submitted to separate studies in fututre design step or construction.	
14 §–19 § Vehicles	Air pollution, accidents, light	These kinds of risks cannot be handled in detail at this stage but creating a layout that aims to make transportation efficient should decrease the risks substantially. The details are submitted to separate studies during the next design step or construction.	
20 § Transport roads Regarding the standard of transport roads	Accidents, work-related injuries	/SKB 2007/ describes construction of transport roads.	
21 §–22 § Radon	Ill health	Control of radon during construction, ventilation (§ 10).	
23 § Evacuation, rescue, fire protection Relates to alarm systems	Fire-related accidents	A fire protection evaluation with regard to the fire risks related to the construction strategy based on the linear development method will be made separately and is not included in this report.	
24 § Evacuation, rescue, fire protection Two separate escape routes should be available at all times. If not, rescue chambers should be available.	Fire-related accidents	A fire protection evaluation with regard to the fire risks related to the construction strategy based on using separating the linear development method will be made separately and is not included in this report.	According to instructions from SKB, rescue chambers will not be necessary during excavation and backfill of deposition tunnels even if the length exceeds 150 m.
25 §–28 § Evacuation, rescue, fire protection Consider action plan, minimization of fire stress, installations, fire fighting	Fire-related accidents, accidents	A fire portection evaluation with regard to the fire risks related to the construction strategy based on the linear development method will be made separately and is not included in this report. Other risks can not be handled or influenced at this stage of the process but are submitted to separate studies during the next design step or construction.	
29 §–34 § Rock drilling 35 § Handling of boulders and mechanical demolishing 36 § Handling of rock 37 §–40 § Rock inspection, scaling, rock reinforcements and maintenance of rock chamber § 41 Elevators § 42 Pregnant and breast feeding employees	Ill health, work-related injuries, accidents	These kinds of risks can not be handled or influenced at this stage of the process but are submitted to separate studies during the next design step or construction.	

付図 3-57　AFS2003.2 に基づく SR-Site のリスクアセスメント概要(SKB, 2008)

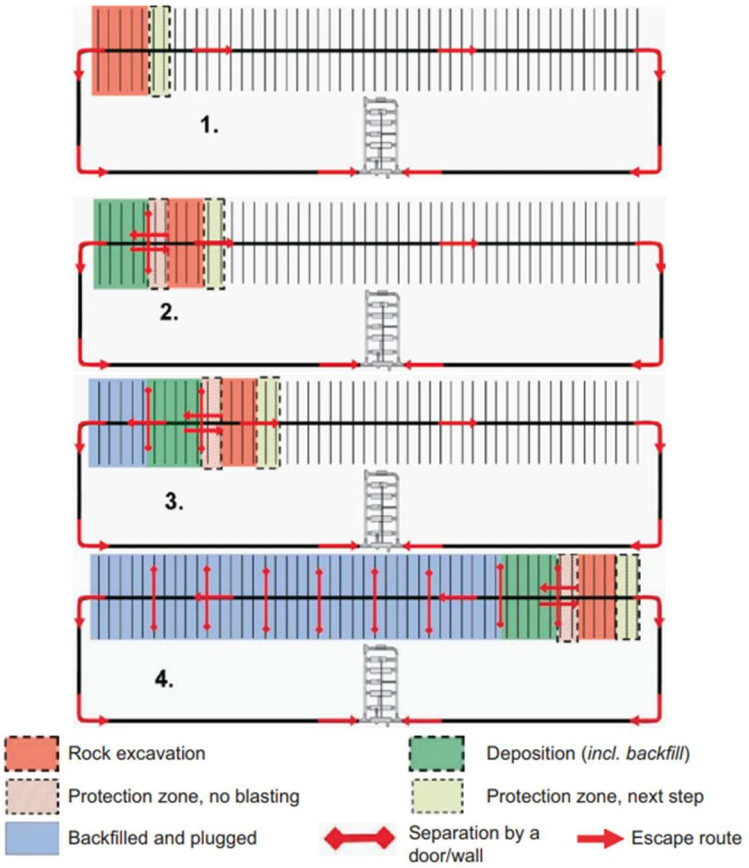
リスクとしては主に地質に関する知識不足、オペレーション時の事故・災害、空気汚染と環境、火災が挙げられている。オペレーションに関わる点は未だ評価できない旨が記載されているものの、処分場設計においてこれらの項目に対する回避策・緩和策が検討されていることが示されている。

(c) 避難経路について

SKB(2009)には以下の記述がある。

すべての作業エリアについて一般的には 2 つの避難経路が必要とされる。この要求に対しては、常に 2 つの出口にアクセス可能になる建設・定置のオペレーション（Seperation by linear-development method）によって対応する（5.4.1 Escape routes, p.52）。

Seperation by linear-development method について SKB(2008)及び SKB(2009)は以下のように説明されている（付図 3-58）。



付図 3-58　SR-Site の定置・建設オペレーションの概要（SKB, 2009）

Seperation by linear-development method は、処分坑道建設、廃棄体の定置、埋め戻しを 1 本の主要坑道沿いに順に行っていくオペレーションである。避難経路は付図 3-58 に示される通り常に 2 つの経路が確保されている他、このオペレーションの利点として掘削予定のキャパシティーを効率よく利用できる点、オペレーションが計画しやすい点、建設効率や必要なリソースがレ

イアウトに依存しない点等が挙げられている。欠点としては輸送距離が挙げられており、それに関連して換気設備、防火壁等の安全設備が追加で必要である点や避難経路についての戦略の検討が必要であると述べられている。

(d) 換気について

処分エリアの換気シャフトについては 2)③(a)および(b)に述べたとおりであるが、処分場システム全体の換気の仕組みについては、SKB(2009)に以下の記述がある：

新鮮な空気は中央エリアの換気シャフト直上に建設される換気施設によって供給される。空気を供給するためのシステムは全てこの建物に設置され、圧力チャンバーが空気の需給を調整する。

（中略）

処分エリアでの操業中は中央エリアから空気が供給され、処分エリアの換気シャフトは新しい坑道が掘削された際に、行き止まりとなっている新しい坑道内を換気するために短期間のみ必要とされる。これには中央エリア近辺において高い空気圧が必要であり、外側の換気シャフトの近くでより低い圧力になっている必要がある。そのため処分場深さの換気シャフト近傍には排気ファンが設置される。また、処分坑道が操業中には、処分坑道の端部に新鮮な空気を供給するために、各処分坑道に一時的な小さなファンが配置される。

(5.4.2 Ventilation system, p.53)

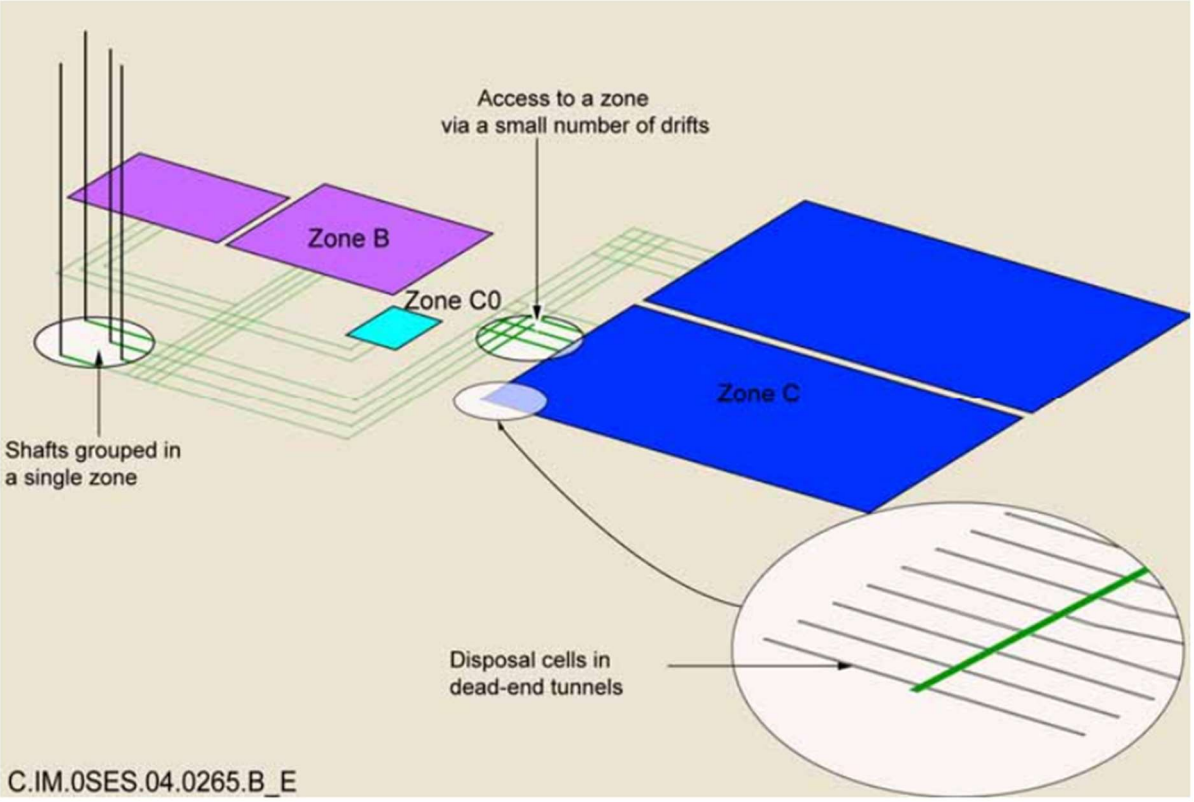
行き止まりとなっている坑道への空気の供給については上述の通り検討されている様子であるが、詳細な分析の記述や参照文献は見当たらない。

(e) Dossier 2005 Argile のアクセス坑道のデザインに関する記述

(e)-1 処分場レイアウト全般に関する記述

Dossier 2005 Argile において、処分場のデザインは、多様な種類の廃棄物を処分・管理すること、また、それぞれの廃棄物の特性に合わせたものであることが念頭に置かれ、処分場デザインの上では、特に長期的な安全性、回収可能性に対する柔軟性、オペレーション上の安全性が重要な要素とみなされている(ANDRA, 2005b)。

処分場は処分セル、Callovo-Oxfordian 層（泥岩）の天然バリア、処分パッケージから成る。そして処分場エリアは主に B 廃棄物エリア、C 廃棄物エリアから成り、それらがお互いに物理的に離れた場所に設計されている。処分セルの建設、廃棄物の定置等のため処分エリアへアクセスする際には鉛直方向に掘られたアクセス坑道と、処分エリアとアクセス坑道をつなぐ水平連絡坑道が用いられる。なお、立坑は廃棄物の輸送用、換気用、作業員の移動用、建築材料の輸送用の 4 本があり、1 か所にまとめられている（付図 3-59）。



付図 3-59　Dossier 2005 Argile の処分場の概念図(ANDRA, 2005b)

ANDRA(2005b)では坑道は全て行き止まり（dead end）の構造になっており、立坑は全て 1 か所にまとめられている。このような処分場のデザインについては、ANDRA(2005b)に以下のような説明がなされている。

水理学的な平衡状態になった処分場においては、Callovo-Oxfordian 層には水理水頭の高いほうから低い方向への一定方向の地下水の流れが形成される。しかしその水流は、廃棄セルと、アクセス及びそれに接続した水平連絡坑道によって妨害されやすい。処分場の規模では、妨害される合計フローは、坑道と処分セルの累積表面積に比例し、 1 年に数立方メートルと評価されている。

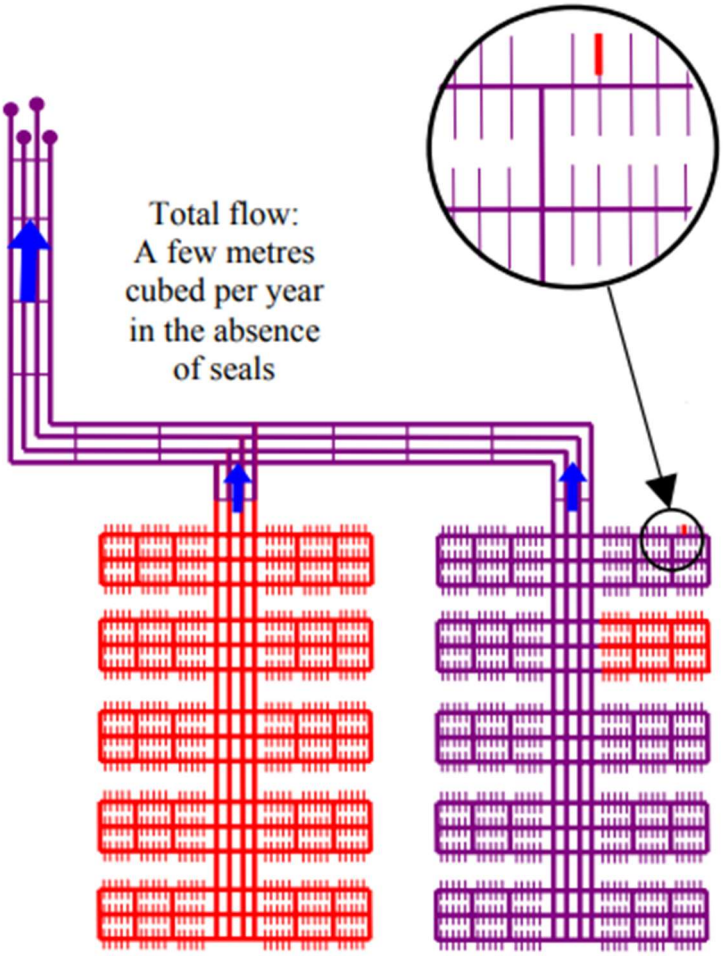
処分場全体の透水性が低く、Callovo-Oxfordian 層のアルギライトの透水性に近い場合、処分場の構造物（処分パッケージを含む処分セルまたは坑道）によって遮断された水流は、坑道系を循環することなく、Callovo-Oxfordian 層に戻る。処分場の設計は、この状況に近づくことを目指している。そのため、アクセス坑道と水平連絡坑道にシール材を取り付け、水の循環を抑止する。これらのシールのおかげで、処分場の存在による地下水の流れの大幅な変動は少なくなる。

鉛直方向の動水勾配が生じた場合、処分場によって流路を妨害された流れのごく一部のみがアクセス坑道と水平連絡坑道を介して流動する。その量は、シール材の透水係数を 1E-11 m/s として処分場全体で年間数百リットルであると評価されている。この場合は想定される流量が少ないので、処分場内の水の速度は無視でき、パッケージから放出される放射性核種の移動は、移流ではなく拡散によって生じると考えることができる。したがって、これらの放射性核種は、坑道系を経由するのではなく Callovo-Oxfordian 層に優先的に移行する。

一方、坑道系のシールに欠陥がある場合、処分場内を経由する水流を抑止することはできなくなる。鉛直方向の動水勾配がある場合、アクセス坑道と水平連絡坑道を介して排出される水量は増加する。動水勾配が 0.2 で、シールがない場合、アクセス坑道を介して排出される流量は 2～3 m^3 /年になる。

他の懸念事項を別にすればこの流量は低いと言えるが、Andra ではこのような経路による放射性核種移行を抑制するためのアーキテクチャートポロジーを採用している。(6.3.3.2 Water flows drained into the argillite after return to hydraulic equilibrium, p.268) (なお、筆者による仮訳)

Dossier 2005 Argile で採用されているアーキテクチャートポロジーの一つは、付図 3-60 に示すようなデッドエンドタイプツリーレイアウトである。



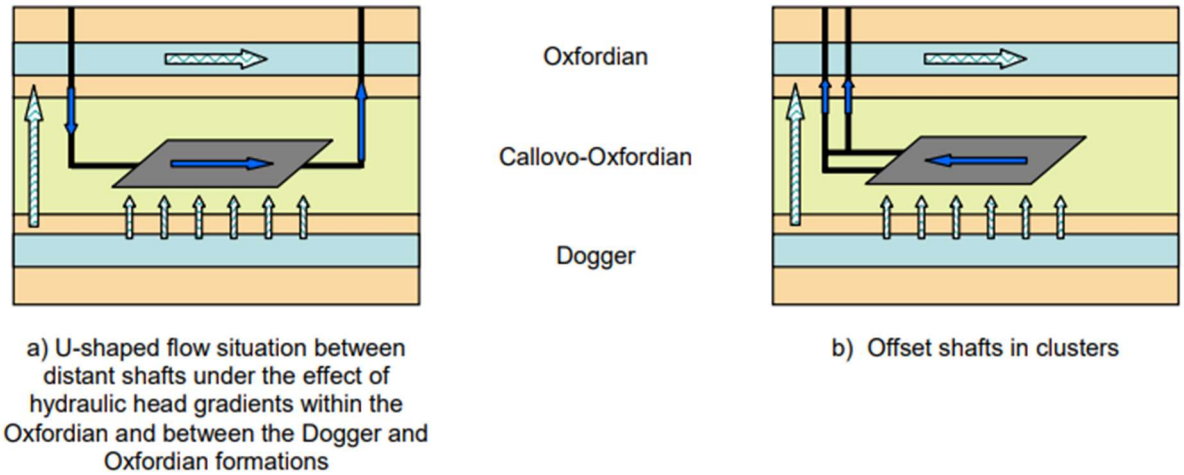
付図 3-60　デッドエンドタイプツリーレイアウトの概念図(ANDRA, 2005b)
処分孔は全て行き止まり（デッドエンド）の構造になっており、立坑は 1 か所にまとめられている。

デッドエンドタイプツリーレイアウトでは、ツリー構造の処分坑道のそれぞれの行き止まりに流入する水の流れは、最終的に Callovo-Oxfordian 層によってシールされる。また、他のツリーからの流入を回避するため、ツリー構造は地下水の流向と平行に設計されている。処分場内を循環する移流の速度は最終的には個々の処分セルでの速度に近い非常に小さな値となり、一方処分

セルから排出された流れは、主要な坑道系に向かって徐々に統合される。

また、この設計においては周囲の地層から坑道系を介して処分場に流入する流れを抑制するため、坑道系の出口は一か所にまとめられている（付図 3-61）。ANDRA(2005b)に坑道出口のデザインについて以下のような言及があり、母岩による地質学的バリアの無効化を防ぐために坑道系の出口がまとめられていることが示唆されている。

立坑出口が離れている場合、その間の水理水頭の違いによって処分場を通過する U 字型の流れを誘発し、それが上層の地層と接触する可能性がある。この場合、坑道系を流れる水の流れに対しては、((訳注)Callovo-Oxfordian 層の)低透水率のアルギライトの効力は制限される。（6.3.3.3 Water flows trapped by the shafts in overlying formations, p.269）



付図 3-61　坑道出口のオプション(ANDRA, 2005b)

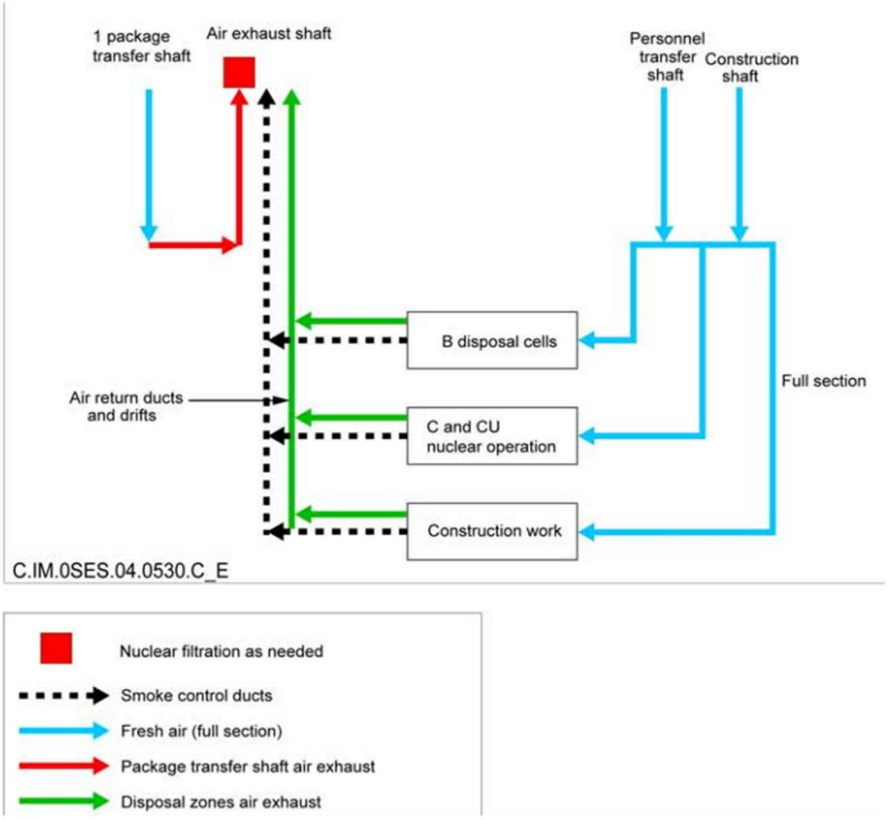
a) 坑道出口が離れているパターン。動水勾配の差異によって U 字型の流れが誘発される。b) 坑道出口が 1 か所にまとめられたパターン。この場合、処分場を介した流れが抑制される

(e)-2 処分場レイアウトと安全性に関する記述

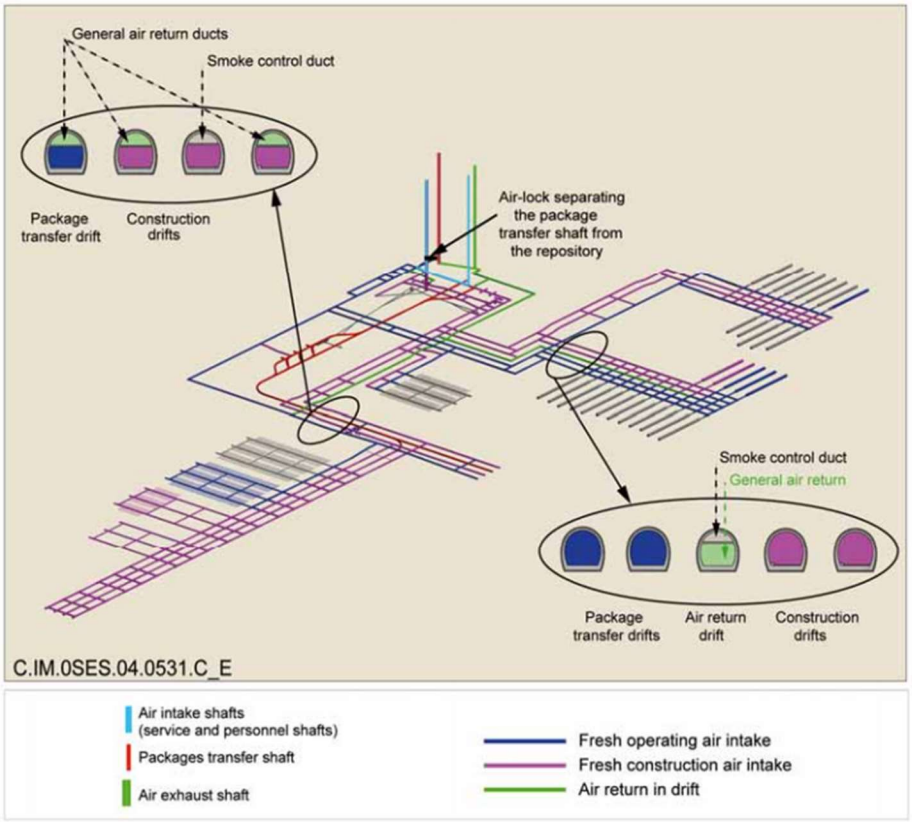
一方、処分坑道が全て行き止まりの構造になっていることで、建設・運用時の換気能力に対して懸念が生じる可能性がある。Dossier 2005 Argile においては換気用シャフトについて以下のような記述があり、各廃棄物エリアについて換気能力に対して検討が行われている。ただし、ANDRA(2005b)には定量的な評価についての記述はなく、詳細な分析については提示されていない。

換気は、すべての地下構造物の衛生と安全に不可欠な要素である。そのため、構造の設計段階から考慮する必要がある要素である。これにより、職員は絶えず換気される新鮮な空気の中で作業することができ、火災の際に職員を避難させ、煙を制御することが可能になる。（6.1.3.4 Ventilation of underground installations, p.255）

付図 3-62 及び付図 3-63 は処分場全体の換気システムの概念図である。



付図 3-62　処分場の換気システムの概念図(ANDRA, 2005b)
4 本の立坑のうち、3 本から空気が流入し、排気用の 1 本から排出される。



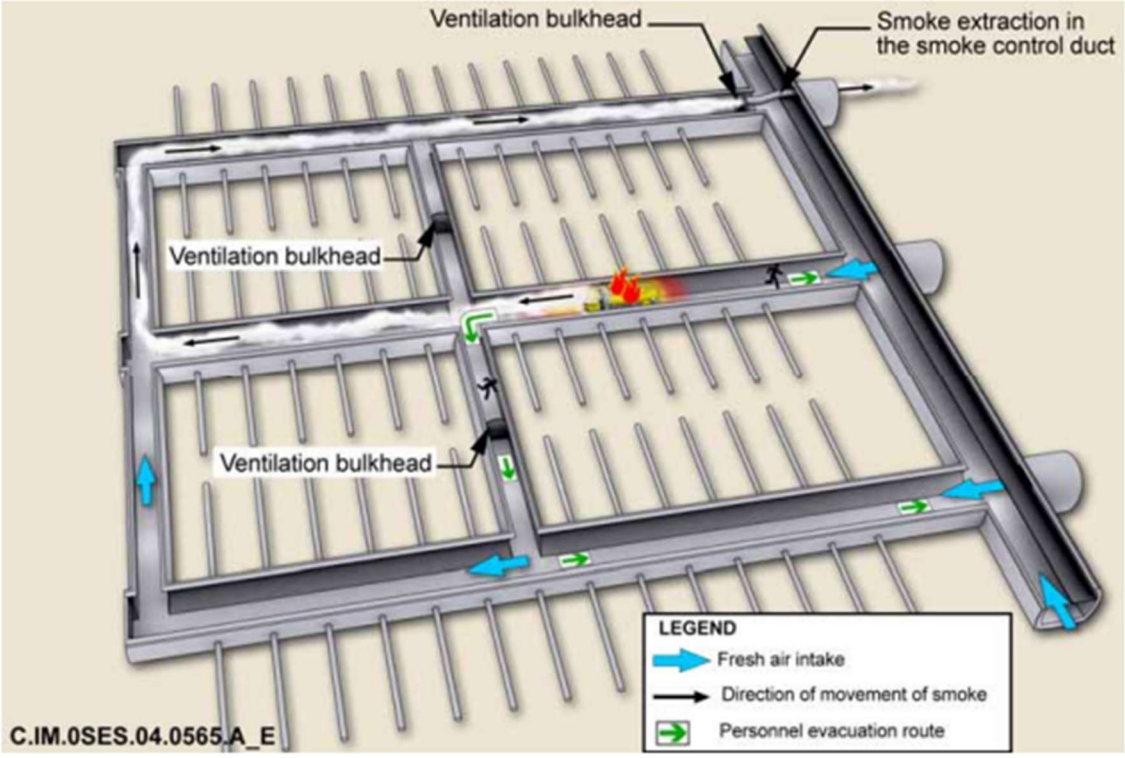
付図 3-63　処分場の換気システムの概念図(ANDRA, 2005b)
換気設備は、水平孔から成る吸気口ネットワークで構成される。排気と煙の除去は、建設中の余剰スペース及び廃棄物パッケージの移動用水平孔に付属する排気ダクトまたは排気水平孔のネットワークを介して行われる。

B 廃棄物エリア、C 廃棄物エリアの両エリアで、加圧された新鮮な空気が供給され、減圧された排気孔から空気が排出される設計となっている。デッドエンドタイプツリーレイアウト（4 本の立坑が 1 か所にまとめられ、処分孔は全て行き止まりの構造になっている）が、各廃棄物エリアにおいて換気は十分に行われることが示唆されている。ただし根拠となる詳細な分析についての記述は見当たらない。

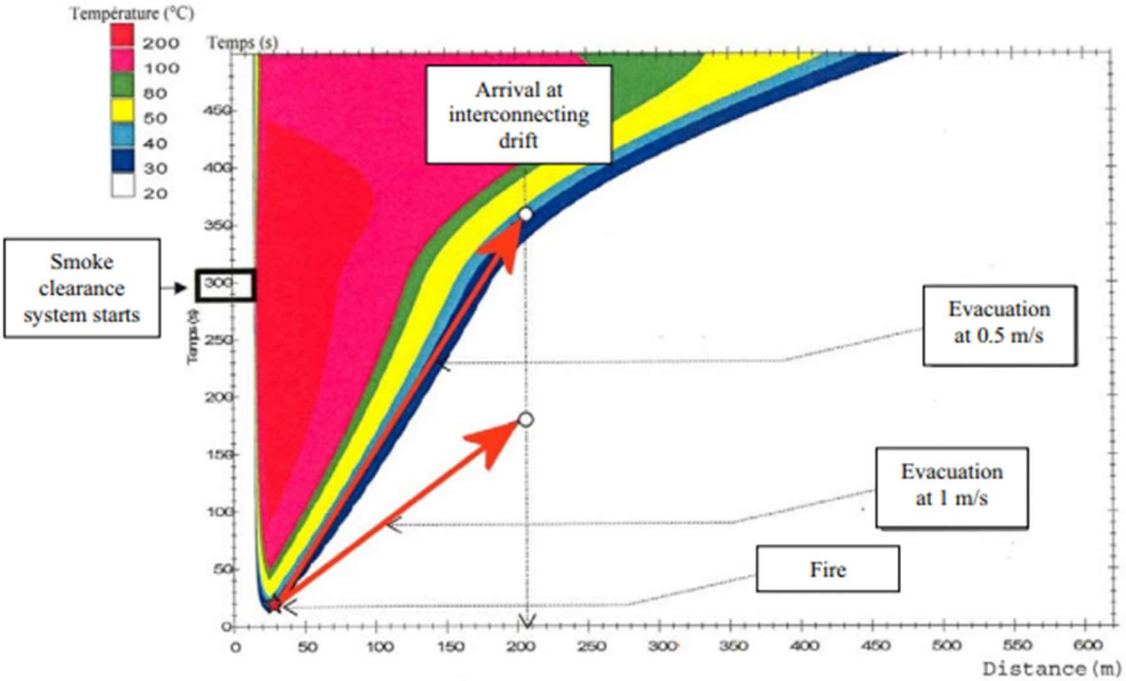
また、坑内で火災が発生した際の作業員の避難については火災のパターン（煙の発生状況及び発生場所）に応じて避難のシミュレーションが実施され、作業員が直ちに新鮮な空気のある場所に避難できることを確認している（付図 3-64 及び付図 3-65）。これについては、以下のような言及がある。

地下貯蔵施設においては、2 種類の火災が発生する可能性がある。すなわち、水平坑道の接続部分において煙が層状に広がる火災、または C 廃棄物エリア及び使用済み燃料処分場エリアにおいて煙が坑道に充満する火災である（(訳注：火災発生時には風速 1m/s 以下において煙が層状になり、それ以上では坑内に充満するように広がることが前の章で言及されている)）。平行に広がる水平孔に一定の間隔で直行する坑道を配置することで、どちらのタイプの火災においても人員が速やかに煙のない新鮮な空気を得られる場所に退避でき、安全な状態で地表まで避難できること

がシミュレーションから示された。ただし、いくつかのケース（煙の層が充満し排気速度が遅い場合）では、煙が逃げる人に追いつく可能性があり、作業員の呼吸の確保と目の保護が必要となる可能性がある（11.4.2 Simulation of personnel evacuation conditions, p.463）（なお、筆者による仮訳）。



付図 3-64　C 廃棄物エリアにおける火災時の避難経路の例(ANDRA, 2005b)
処分エリアの水平坑道には 200m ごとに直行する坑道が配置されており、そこに遮断壁を配置することで、作業員が速やかに煙のないエリアに避難できる。

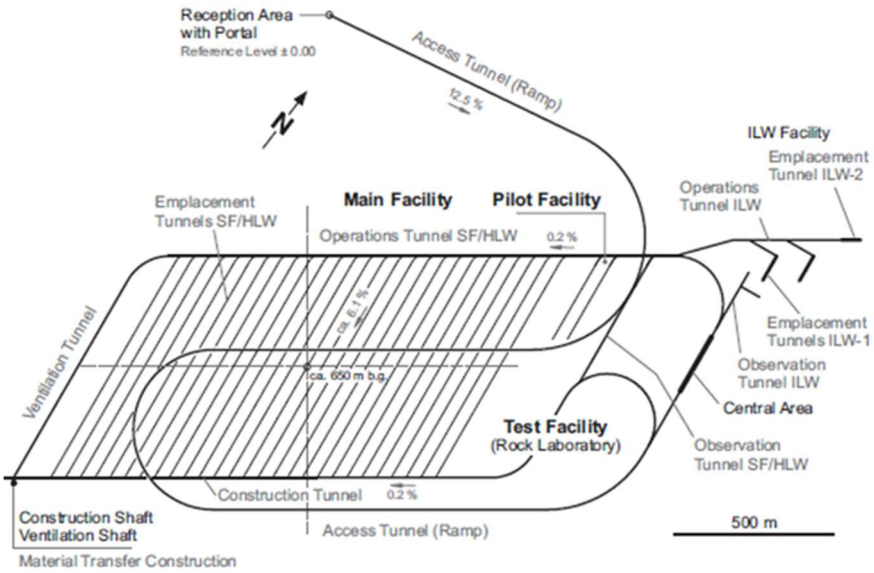


付図 3-65　C 廃棄物エリアにおける火災発生時の熱輸送シミュレーション(ANDRA, 2005b)

処分エリアの水平坑道には 200m ごとに直行する坑道が配置されており、火災発生時には作業員は最大 200m 移動することで隣の水平坑道に移動することができる。最低限 0.5m/s の速度で移動すれば、安全に隣の水平坑道に移動することができることを示す。作業員は隣の水平坑道まで退避できれば、新鮮な空気が確保された状態で安全に地上に避難することができる。

(f) Opalinus Clay のアクセス坑道のデザインに関する記述

Opalinus Clay における処分場の全体的な処分場レイアウトを付図 3-66 に示す。



付図 3-66　Opalinus clay の処分場デザイン概念（NAGRA, 2002a）

廃棄物の定置エリア、操業トンネル及び建設トンネルは、Opalinus 粘土層の中心部で深さ約 650 m で掘削され、南東に緩やかに傾斜している（NAGRA, 2002a）。

しかし、アクセス坑道の本数やレイアウトについては、NAGRA の安全性評価レポート（NAGRA, 2002a）には詳細の記述が見当たらず、安全性に関する記述もない。工学的実現可能性レポート（NAGRA, 2002c)では運用上の安全性が定性的に検討されているようであるが、このレポートはドイツ語であり、かつ現在利用できない状態になっている。関連するドキュメントが公開されていないため、Opalinus clay で運用上の安全性がどのように考慮されているかは不明である。

3) 高透水性となった坑道中の核種移行解析

① SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおける核種移行解析の考え方

Incompletely sealed repository シナリオにおいては、SR-Site の「腐食によるキャニスタの破損」シナリオにおける中心腐食事例の決定論的計算に使用されたものと同じモデルを使用して、現在から 66,200 年後の破損したキャニスタにおける使用済み燃料からの放射性核種の放出率を計算する。計算では、破損したキャニスタ、及び処分孔内に依然として残っている緩衝材の物質のいかなるバリア機能も期待していない。従って、開口したキャニスタからの放射性核種の放出率は、燃料からの放出率及び処分孔内の地下水流速によって決まる。処分孔内の流量は 0.73m^3/年とした。この数値は「腐食によるキャニスタの破損」シナリオの解析において、流速の速い亀裂と交差する処分孔内の流れを表す。付図 3-67 のダルシー流速の計算結果から分かるように、流れへの影響が小さいことから、処分孔位置での開放坑道の移流への影響は、温暖な条件下では極めて小さいため、これらの計算に用いるのに適していると判断される。

計算において破損したキャニスタから放出された放射性核種は、中央領域と、中央領域の上方の開放シャフト及びアクセス坑道（斜坑）とに移行することが更に仮定される。水中の放射性核種の濃度は、キャニスタからの核種の放出速度と、水理地質学的分析における温暖な条件下で決

定された開放された坑道における水流 0.42L/s (13,230m³/年)とから計算される(Bockgård, 2010)。また、この水はサイトで生活するヒトによって利用される。

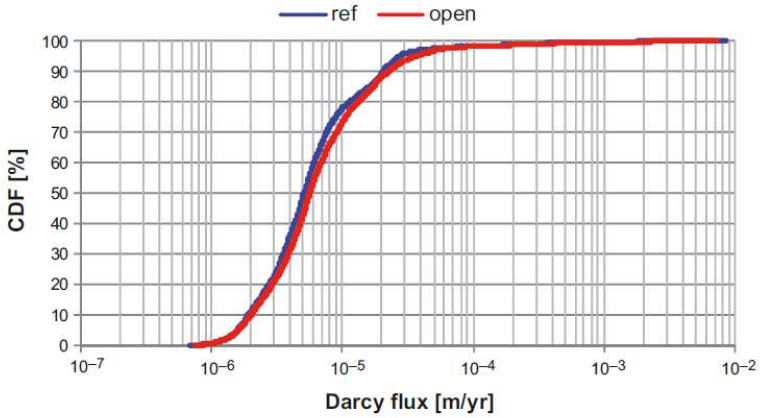


Figure 4-9. Cumulative density function of simulated Darcy flux at the 6,916 deposition hole positions during temperate conditions for the reference closure case (blue) and the open tunnel case (red).

付図 3-67　レファレンスケース及び坑道開放ケースにおける 6916 個の処分孔におけるダルシー流速の累積密度関数の比較（Bockgård, 2010）

SR-Site の安全評価におけるニアフィールド、ファーフィールドにおける放射性核種の放出と移行、生活圏における線量影響のモデル化・プロセスを付図 3-68 示す。

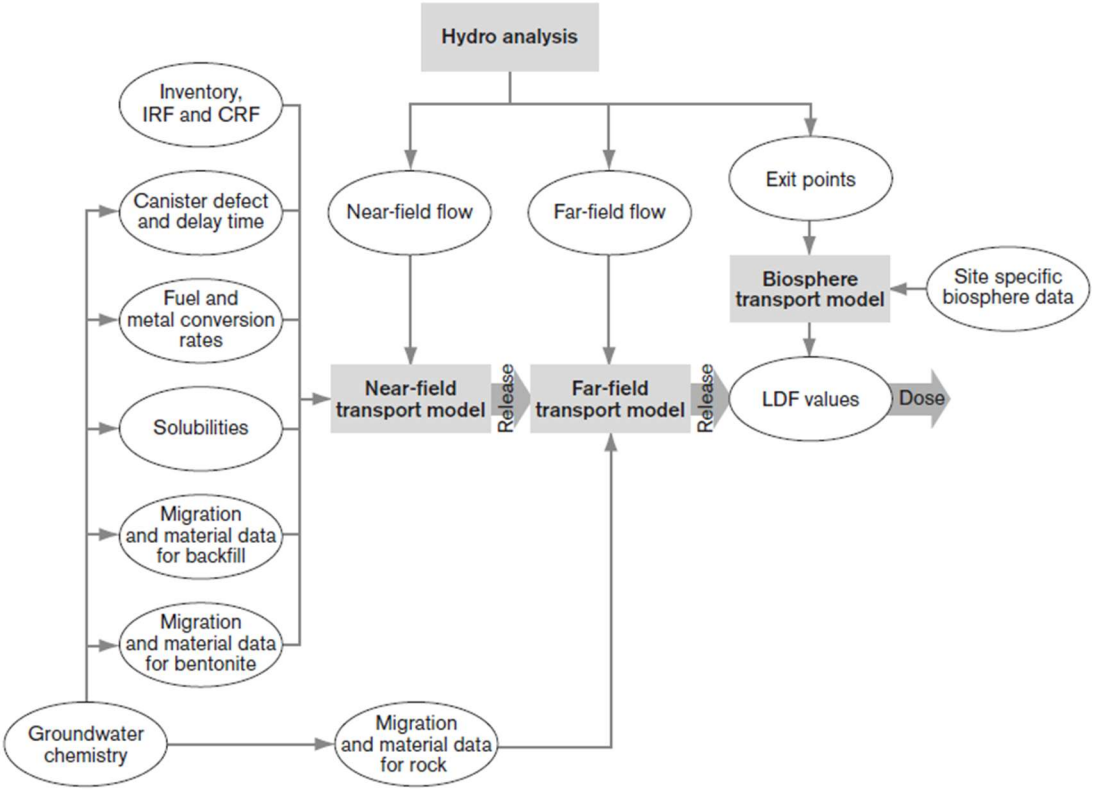


Figure 13-12. Models and data for the consequence calculations.

付図 3-68　一連の解析で用いられるモデル及びパラメータ
（SKB, 2011）

ニアフィールドを対象とした複数の移行経路をもつ核種移行解析には付図 3-69 のようなCOMP23 で作成されたモデルが用いられており、電気回路と同様、抵抗と容量を持つネットワークが用いられている。キャニスタの小さな開口部から亀裂への移行のように、詳細な離散化が必要な領域においては、計算を高速化するために解析解を用いている。キャニスタ内部からの核種放出、緩衝材及び処分坑道の埋め戻し材における放射性核種の移行に関連するプロセスがモデル化されている。これらの中で、放射性崩壊、金属腐食（一定の金属腐食速度）、燃料の溶解、ギャップ・インベントリの溶解（瞬時放出としてモデル化される）、放射性核種の Shared Solubility（共通の元素溶解度による核種の溶解/沈殿）、緩衝材における拡散及び収着、処分坑道埋め戻し材における移流、拡散及び収着、の各プロセスが含まれている。

キャニスタからの核種放出と緩衝材及び埋め戻し材における経路については次の 3 つの核種移行経路が考慮されている。なお、緩衝材に移流が生じている条件では Q1 の移行経路のみを考慮している。

・Q1：キャニスタの蓋に対して垂直方向で定置孔を横切る亀裂
・Q2：処分坑道の床における掘削影響領域（EDZ）（該当する領域が存在する場合）
・Q3：定置坑道と交差する亀裂—の移行経路

水理解析モデルにおいては、処分孔に交差する亀裂の本数、及びこれらの亀裂の性質は DFN によって統計的に決定される（詳細は Data report の Section 6.6 を参照）。もし亀裂が 2 本以上処分孔と交差している場合、保守的に複数の亀裂の輸送容量を 1 本の亀裂に加算してモデル化される。

Q2 を流れる等価な流速は水理解析モデルによって計算される。EDZ における移行特性は Data report の Section6.5 を参照のこと。処分坑道内の流速、及び処分孔から最も近い亀裂 Q3 への距離はニアフィールドモデルの中で計算される。この箇所は亀裂 Q3 を含めるために下流側に拡張される。処分孔の破壊の効果は、移行経路 Q1 への等価な流速への変換として取り扱われ、数値解析モデルの変更は必要としない。

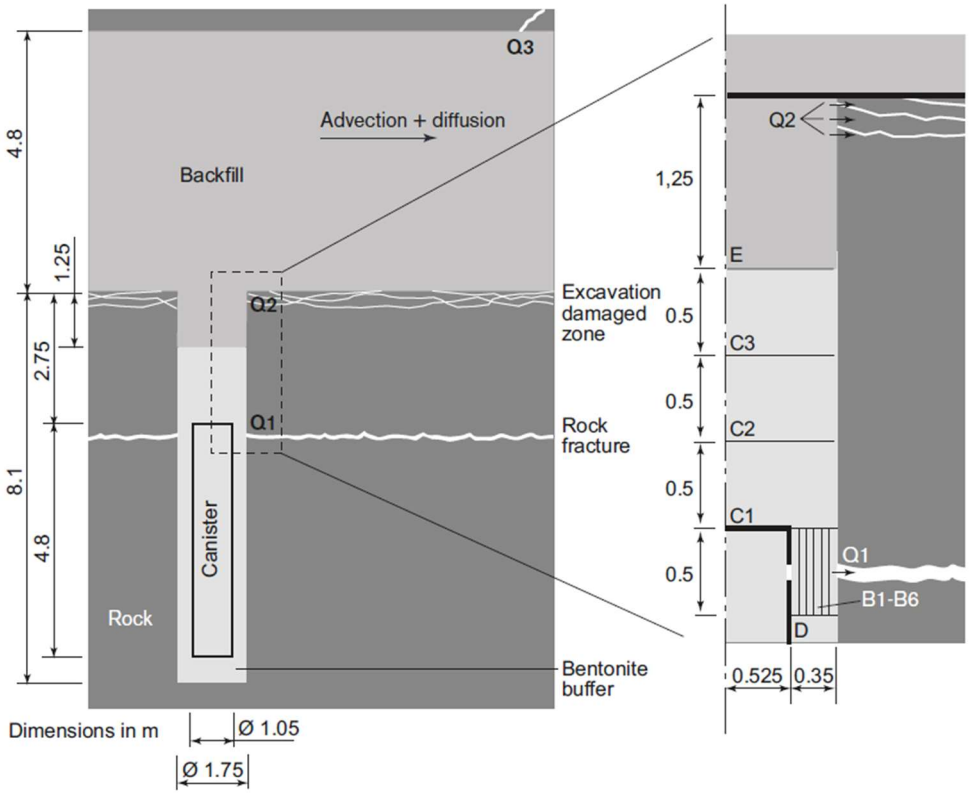


Figure 13-13. The near field and detail of its model representation as compartments B1–B6, C1–C3, D and E in the model COMP23. The transport paths Q1, Q2 and Q3 to a fracture intersecting the deposition hole, to the excavation damaged zone, and to a fracture intersecting the deposition tunnel, respectively, are also shown. (Potentially a minor EDZ around the deposition hole could exist, but as shown in the ***Underground construction report*** *such a zone would have very low – if any – connected hydraulic conductivity and is thus not included in the model.) The differentiation of compartments shown in this figure is relevant for a pinhole failure in the canister. All other analysed failure modes require less differentiated representations of the near field.*

付図 3-69　COMP23 でモデル化されたニアフィールドモデル
（SKB, 2011）

岩盤中の核種移行については液相中の放射性核種の移行をモデル化しており、移流・分散、及び線形吸着を伴うマトリクス拡散、崩壊を考慮した計算を行っている。地下水流動解析は主として、個別の亀裂を明示的に表現する DFN（離散亀裂ネットワークモデル）によりモデル化している。

②-1 Dossier 2005 Argile の“Seal failure”シナリオにおける核種移行解析の考え方

核種移行解析は前述の水理解析と同様、シーリングシステムの一部、もしくは全てが機能喪失したケースを対象に実施されている。Dossier 2005 Argile における核種移行解析の解析体系やモデル化の内容について、原環センターHP に記載の内容（原環センター, 2020）)を抜粋して以下の(a)～(c)に示す。Seal failure シナリオについては(d)に示す。

(a) 安全評価モデル

安全評価の線量計算には、ANDRA と CEA の共同プロジェクト（後にフランス電力株式会社（EDF）も参加）で開発した解析コード Alliance を利用している。Alliance は、複数の現象（水

理・物質移行・化学)、異なったパッケージを取り扱える総合的な解析プラットフォームであり、感度解析や不確実性の処理を実施すること可能である。計算の全体体系は付図 3-70 に示す概念で構成され、次の 2 つの移行経路を考慮しており、通常変遷シナリオ（SEN）では①のみを、代替変遷シナリオ（SEA）では①及び②の双方を考慮している。

1. 健全な地質バリアを介した移行経路（付図 3-71）
2. 人工構造物を介した移行経路（付図 3-72）

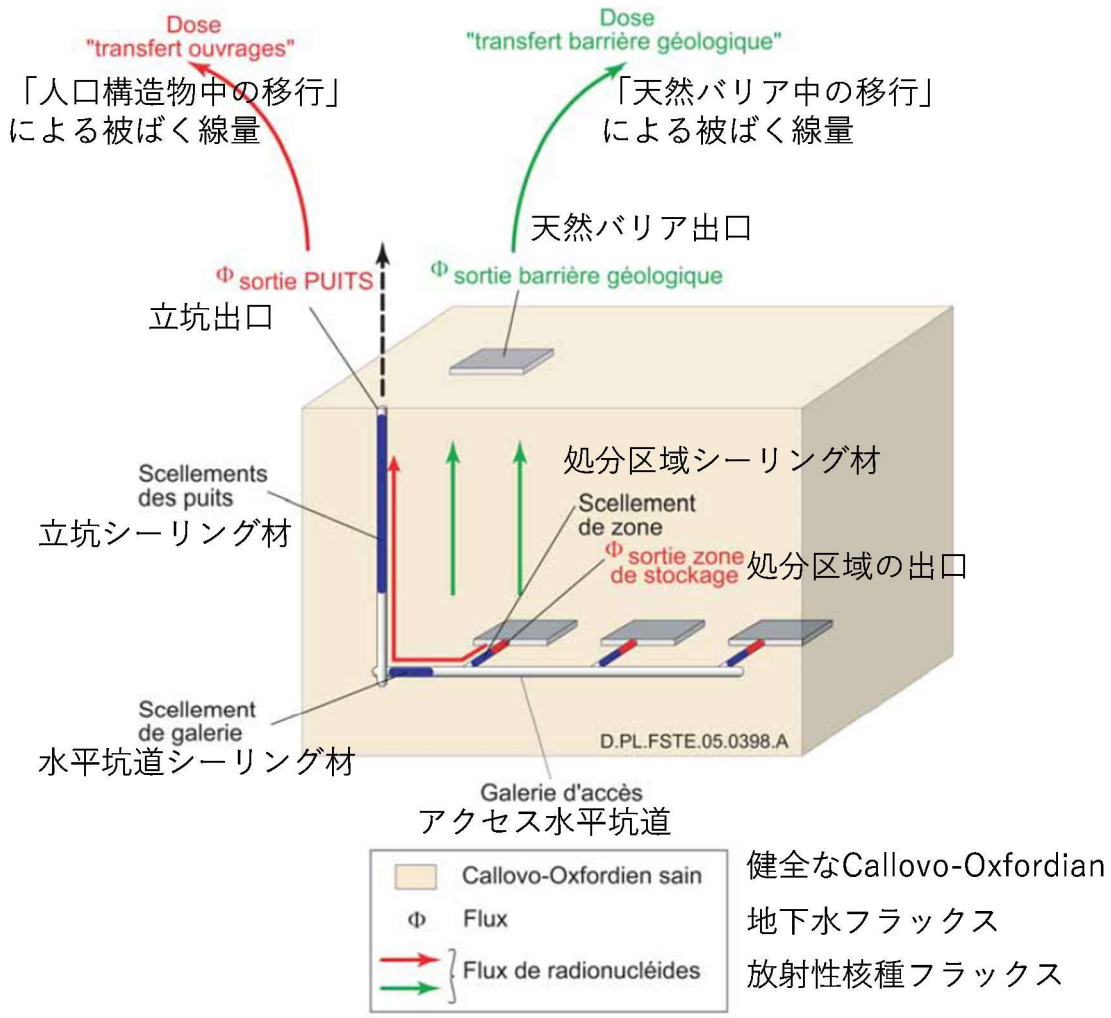


Figure 5.4-2 « Geological barrier » and « engineered structures » transfer pathways

付図 3-70　解析体系の全体図（原環センター, 2020）

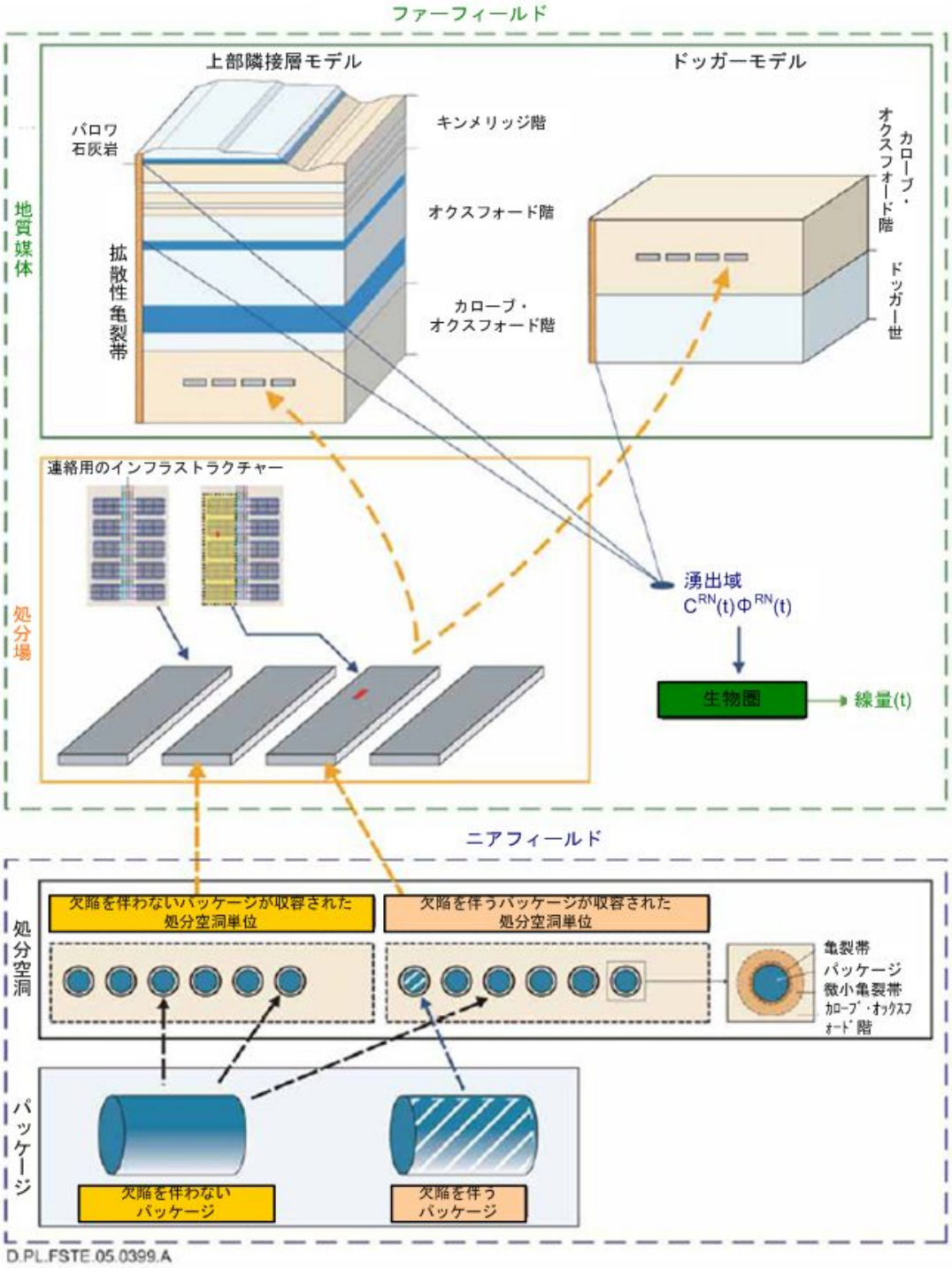


Figure 5.4-3 Calculation diagram for the transfer pathway through the sound geological barrier

付図 3-71　健全な地質バリアを通じた移行経路（原環センター, 2020）

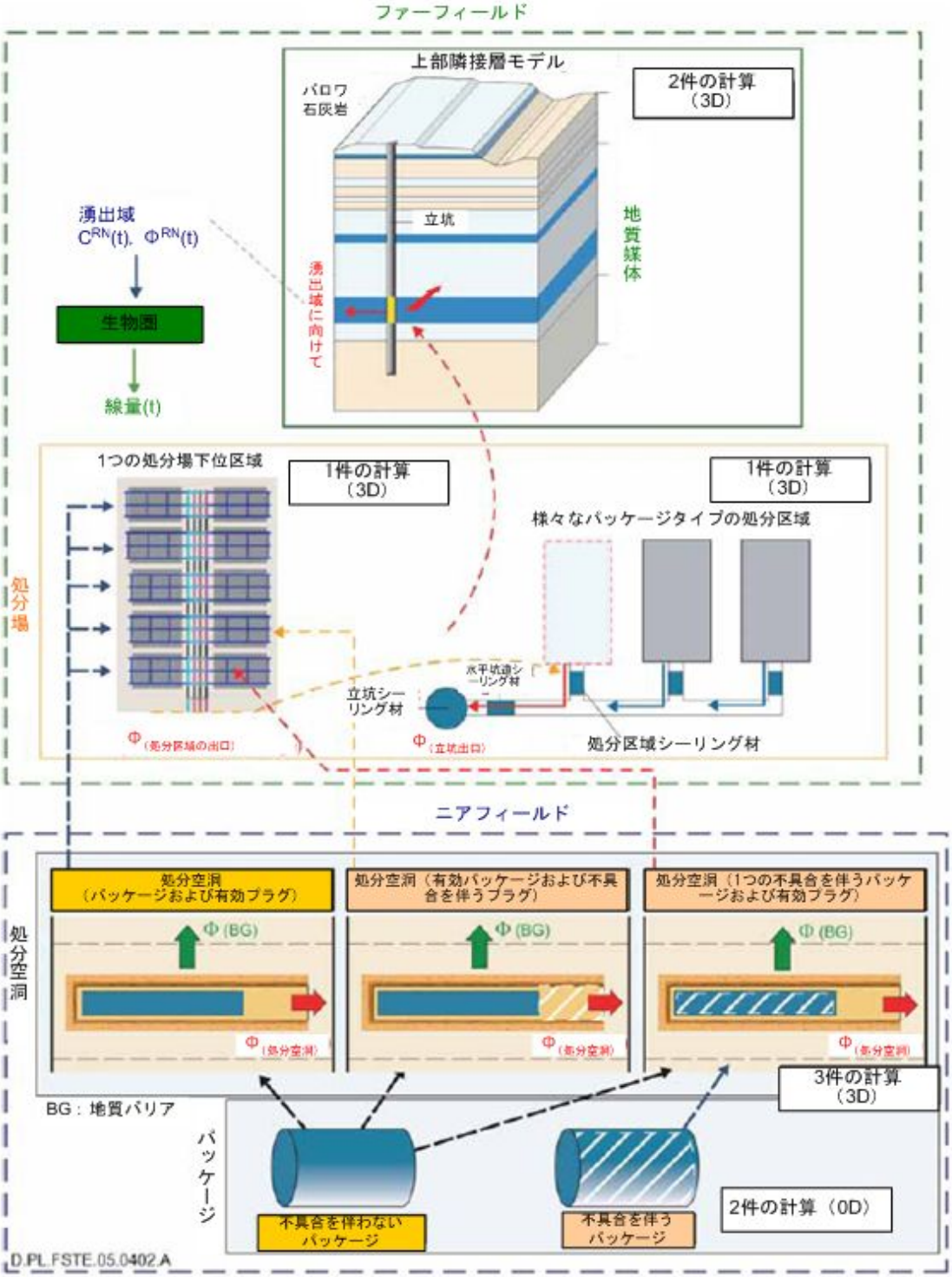


Figure 5.4-7 Calculation diagram for the transfer pathway through the engineered structures

付図 3-72　人工構造物を通じた移行経路（原環センター, 2020）

(b) 処分場構造物における移行のモデル化

処分場構造物内及び周辺域での核種移行については付図 3-73～付図 3-76 に示すように、①ガラス固化体から人工バリア（水平坑道）、②廃棄物 B から人工バリア（水平坑道）、③使用済燃料（CU 廃棄物）から人工バリア（水平坑道）、④人工バリア内での移行の 4 つを考慮している。

処分場構造物は、ニアフィールドの核種移行では「処分空洞」コンパートメント、ファーフィールドの核種移行では「処分場」コンパートメントに含まれる。「処分空洞」コンパートメントは、処分空洞全体を 6 個の処分空洞で構成される計算単位で代表し、シナリオや廃棄体の種類に応じて欠陥を伴うパッケージが含まれない計算単位と欠陥を含むパッケージが含まれる計算単位を区別している。処分場はパッケージ、プラグ及び処分空洞本体の等価多孔質媒体により表現し、更に掘削影響領域（EDZ）と空洞周辺の健全な母岩を含む高さ 15m の平行六面体で表現している。「処分空洞」コンパートメントは、「廃棄体パッケージ」コンパートメントから核種のモル流量を入力値として受取り、ファーフィールドの「処分場」コンパートメントに核種のモル流量を入力データとして与える。

ガラス固化体
（カテゴリC）

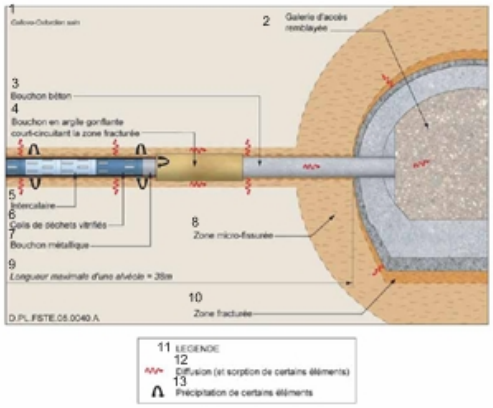


Figure 5.3-6 Representation of the C waste cells and containment characteristics

凡例
1:無傷のカローブ･オックスフォード階
2:埋め戻し材が設置されたアクセス用の水平坑道
3:コンクリート・プラグ
4:亀裂帯の連続性を遮断する膨潤性粘土プラグ
5:中仕切り
6:ガラス固化体パッケージ
7:金属製プラグ
8:微小亀裂帯
9:処分場の最大の長さ＝38 m
10:亀裂帯
11:凡例
12:拡散（および一部の元素の収着）
13:一部の元素の沈殿

付図 3-73　カテゴリ C における移行モデル概要（原環センター, 2020）

TRU廃棄物
（カテゴリB）

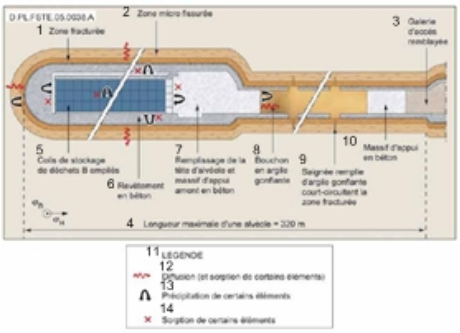


Figure 5.3-4 Representation of the B waste cells and containment characteristics

凡例
1:亀裂帯
2:微小亀裂帯
3:埋め戻し材が設置されたアクセス用の水平坑道
4:処分空洞の最大の長さ（320 m）
5:充填済み廃棄物B用の処分パッケージ
6:コンクリート・ライニング
7:処分空洞の付け根の部分の埋め戻しとコンクリート製の前方部分支持ブロック
8:膨潤性粘土のプラグ
9:亀裂帯の連続性を遮断する（膨潤性粘土が充填された）溝
10:コンクリート製の支持ブロック
11:凡例
12:拡散（および一部の元素の収着）
13:一部の元素の沈殿
14:一部の元素の収着

付図 3-74　カテゴリ B における移行モデル概要（原環センター, 2020）

使用済燃料
（CU廃棄物）

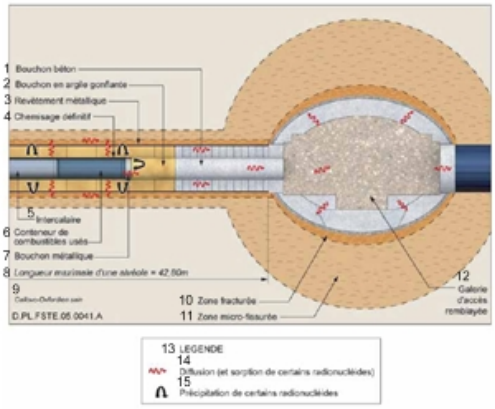


Figure 5.3-7 Representation of the spent fuel waste cells and containment characteristics

凡例
1：コンクリート・プラグ
2：膨潤性粘土プラグ
3：金属ライニング
4：最終ライナー
5：中仕切り
6：使用済燃料コンテナ
7：金属プラグ
8：処分空洞の最大長＝42.80 m
9：無傷のカローブ･オックスフォード階
10：亀裂帯
11：微小亀裂帯
12：埋め戻し材が設置されたアクセス用の水平坑道
13：凡例
14：拡散（および一部の放射性核種の収着）
15：一部の放射性核種の沈殿

付図 3-75　カテゴリ CU における移行モデル概要（原環センター, 2020）

水平坑道および
シーリング材

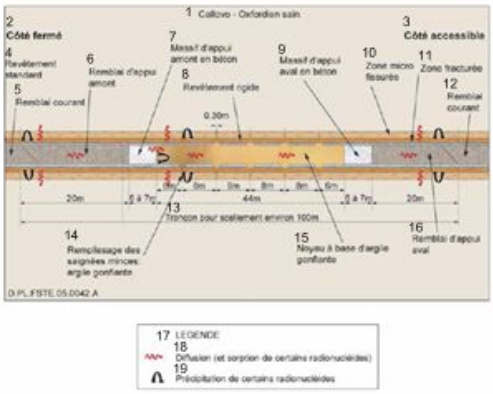


Figure 5.3-8 Representation of seals and containment characteristics

凡例
1：無傷のカローブ・オックスフォード階
2：閉鎖された側
3：アクセス可能な側
4：ライニング
5：通常の埋め戻し材
6：前方支持埋め戻し材
7：コンクリート製前方支持ブロック
8：ライニング
9：コンクリート製後方支持ブロック
10：微小亀裂帯
11：亀裂帯
12：通常の埋め戻し材
13：シーリング材の一辺（約100 m）
14：膨潤性粘土による細溝の充填
15：膨潤性粘土ベースの核
16：後方支持埋め戻し材
17：凡例
18：拡散（および一部の放射性核種の収着）
19：一部の放射性核種の沈殿

付図 3-76　人工バリア材における移行モデル概要（原環センター, 2020）

「処分場」コンパートメントの処分場は、「処分空洞」コンパートメントと同じく処分空洞を含む高さ 15m の平行六面体で表現し、幾つかの「計算モジュール」を組み合わせてモデル化している（付図 3-77)。廃棄物 B の処分空洞は 1 つの「計算モジュール」として取扱い、廃棄物 C（ガラス固化体）と使用済燃料 CU の「計算モジュール」は最低限 50m 離れた複数の「サブモジュール」を組み合わせている。

ニアフィールドとファーフィールドの核種移行計算では処分空洞周辺の母岩中の移行を重複して考慮することになる。この点については、ニアフィールド側の母岩中の核種移行計算において核種の移行時間を最小限短くする設定（核種の拡散係数を自由水中の拡散係数と同じ値とする）をしている。

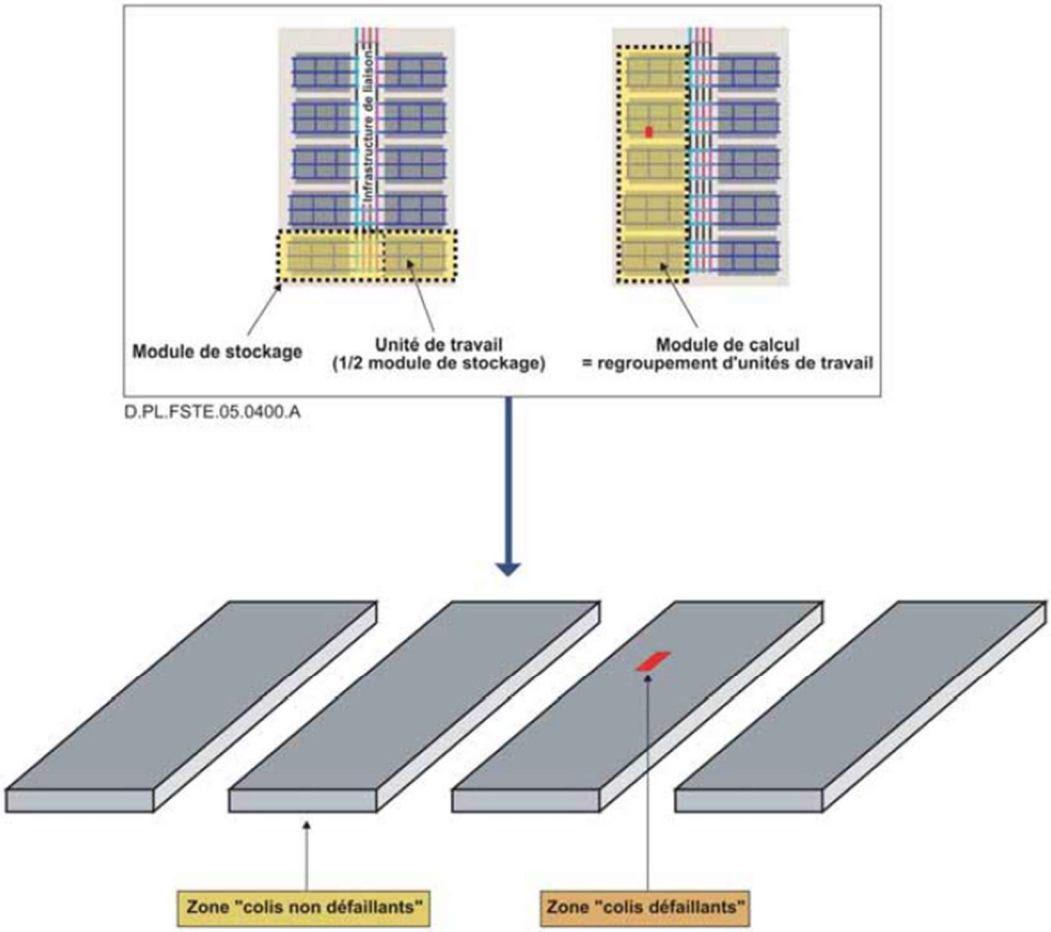


Figure 5.4-4 Principle of representation of « calculation modules » for the « repository » compartment

付図 3-77 「処分場」コンパートメントの計算モジュール（ANDRA, 2005a）

(c) 天然バリアのモデル化

処分坑道から地表までの地層図を付図 3-78 に示す。Callovo-Oxfordian 粘土層内での核種移行については、次のように設定している。

- Callovo-Oxfordian 粘土層を均質多孔質媒体と仮定し、そこでの移流／分散、拡散、溶解度制限、及び吸着による移行遅延を考慮
- リファレンス・シナリオ（SEN）では、コロイド形態による核種移行を考慮しない

なお、同粘土層の周囲地層での核種移行については、次のように設定している。

- 同粘土層の周囲の各地層を均質多孔質媒体と仮定し、そこでの移流／分散、拡散による核種移行を考慮。但し、溶解度の制限や吸着などの核種移行遅延機能は考慮しない
- リファレンス・シナリオでは、100 万年後の Callovo-Oxfordian 粘土層の周囲地層もモデル化

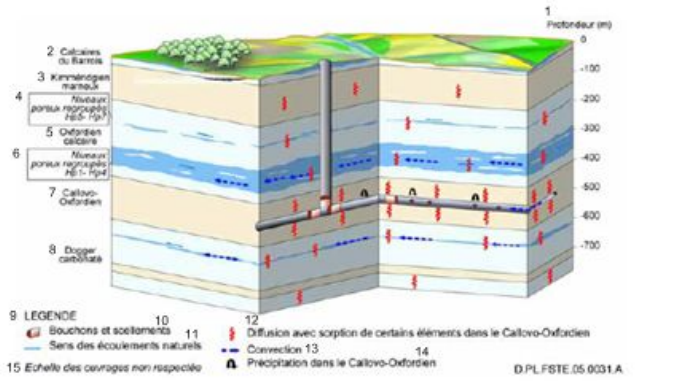


Figure 5.3-14 Representation of surrounding formations and properties of employed containment

凡例
1:深度（m）
2:バロワ石灰岩
3:キンメリッジ階マール
4:多孔質層Hp5-Hp7
5:オックスフォード階石灰岩
6:多孔質層Hp1-Hp4
7:カローブ・オックスフォード階粘土質岩
8:ドッガー世石灰岩
9:凡例
10:プラグおよびシーリング材
11:自然流動の方向
12:カローブ・オックスフォード階における（一部の元素の収着を伴う）拡散
13:対流
14:カローブ・オックスフォード階における沈殿
15:構造物の縮尺は正確なものではない

付図 3-78　処分坑道から地表までの地層図（原環センター, 2020）

(d) Seal failure シナリオの核種移行解析

予察解析の結果から、シーリングの機能喪失に関わらず、処分場パネル及び連絡坑道内は拡散場（もしくは拡散と移流が同程度）が保たれている。しかしながら、様々な計算から処分場の他の場所では、シーリングの機能喪失によって移流の影響が大きくなり、廃棄体パッケージから処分場の上部への核種移行を促進する結果が得られている。従って、放射性核種の閉じ込めに対する様々なシーリングの機能喪失の影響を評価することは妥当であり、特に処分場の容量及び地質環境による核種移行の遅延と減衰に対して重要である。

シーリングの機能喪失が起こると、廃棄体パッケージから放出された核種は処分坑道またはプラグに移行する。最終的にアクセス坑道へと到達するときの放射能量は以下に依存する。

- 廃棄体パッケージ内での初期の放射能量
- 処分坑道内を移行する際の移行経路を付図 3-79 に示す。廃棄体から放出された後、(1)垂直に移行し、Callovo-Oxfordian 粘土層に入る経路、及び(2)坑道内を水平に移行する経路である。各移行経路を通る核種の割合は、岩盤及び人工バリア内の核種の収着特性に依存する。処分場パネル内では拡散支配（もしくは移流と拡散が同程度）であるため、この分布は基本シナリオとほぼ同様である。

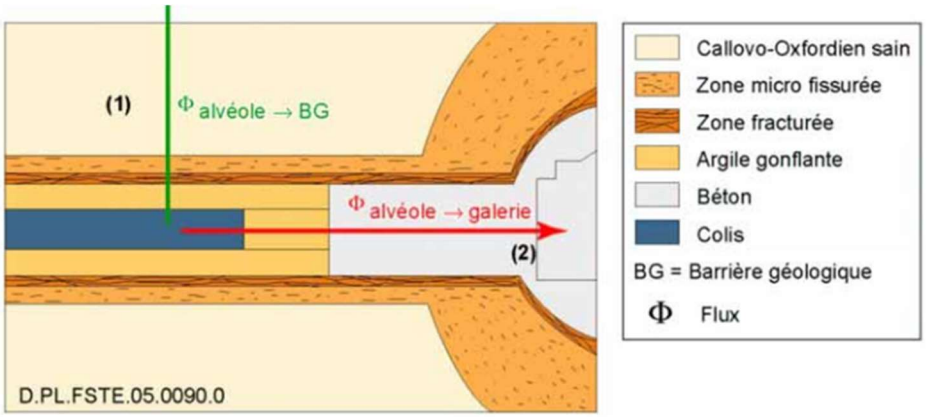


Figure 7.2-12 Seal failure' altered evolution scenario – Transfer pathways in case of C waste or spent fuel disposal cells

付図 3-79 Seal failure シナリオにおける C 廃棄体または使用済み燃料処分坑道の移行経路
（ANDRA, 2005a）

放射性核種がアクセス坑道に到達し、そしてアクセス坑道内に保持される能力について述べる。坑道内の核種移行は、坑道から Callovo-Oxfordian 粘土層への拡散による移行、（そして／もしくは）核種の崩壊によりパネルの出口から立坑の間で減衰するだろう（付図 3-80）。

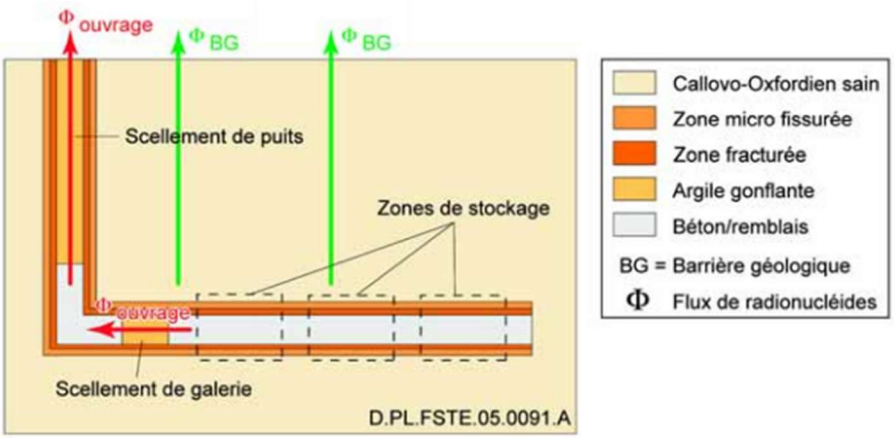
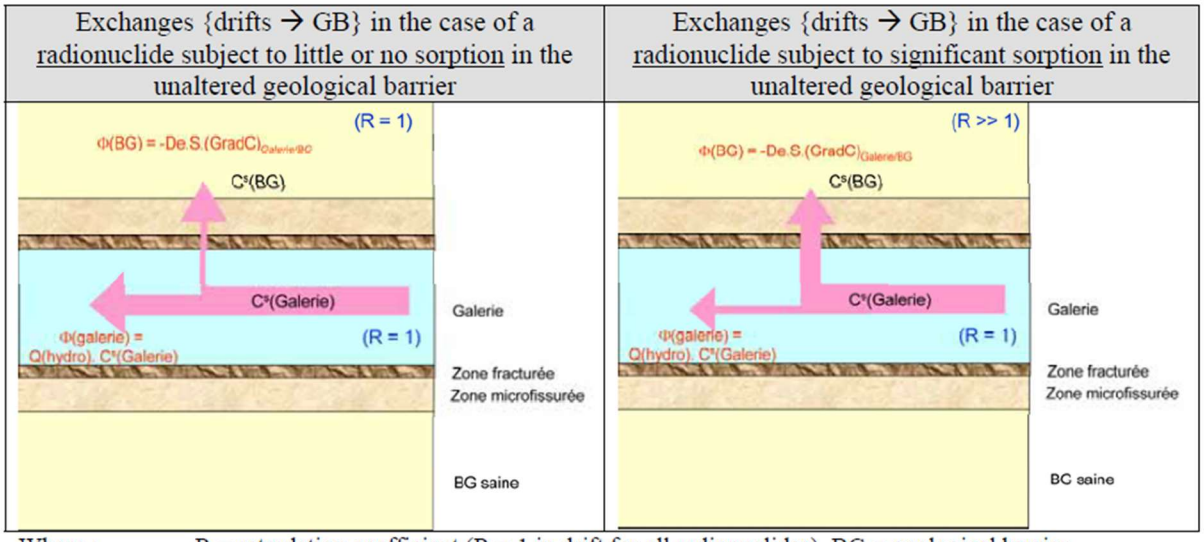


Figure 7.2-13 Seal failure' altered evolution scenario – Potential transfer pathways in case of seal failure

付図 3-80 Seal failure シナリオにおけるシーリング劣化による潜在的な移行経路
（ANDRA, 2005a）

実施された評価は、初めに廃棄体パッケージ内に存在していた放射性核種の大部分が、使用済み燃料処分場区域出口に到達する前に、坑道内の遅い移行による崩壊、及び/または Callovo-Oxfordian 粘土層中へと移行することを明確に示している。
考慮される全ての状況において、天然バリアで有意な収着をする長寿命放射性核種(Ni-59、Pd-107、Zr-93、Tc-99、Be-10、Ca-41、Cs-135 など)は、処分場領域出口において非常に低い(またはゼロ

でさえある)モル流量を示す。また、この結果はアクチニドでも同様であった。
移流が遅い区域内の数百 m のドリフトは、「収着障壁」として働く天然バリアへの移行を促進する効果がある（付図 3-81）。さらに、天然バリアの収着をほとんどまたは全く受けない中寿命放射性核種(Mo-93)のモル流量は、崩壊のために処分場出口でほぼ完全に減衰する。その結果、C-14、Cl-36、Se-79 及び I-129 のみが、ゾーン出口で無視できないモル流量を有する。以下の分析は、これらの 4 つの放射性核種に対処する。



Where : R = retardation coefficient (R = 1 in drift for all radionuclides), BG = geological barrier
De = diffusion coefficient in the unaltered geological barrier
C^s(GB) = solution concentration in the geological barrier
C^s(drift) = solution concentration in drift
Φ(GB) = radionuclide flux entering the unaltered geological barrier
Φ(drift) = flux travelling through backfilled drift
Q(hydro) = hydraulic flow through the drifts
S = exchange surface
$(GradC)_{drift/GB}$ = solution concentration gradient between the drift and the unaltered geological barrier

Figure 7.2-14 'Seal failure' altered evolution scenario – Exchanges from drift to geological barrier for radionuclides not subject to or strongly subject to sorption in the geological barrier

付図 3-81　天然バリアの収着性に応じた坑道から天然バリアへの核種移行割合の変化
（ANDRA, 2005a）

先に述べたように、鉛直な移行経路と水平な移行経路との間の核種の分配は、天然バリアにおける核種の保持性能に関連している。また、使用済み燃料処分セルのケースでは粘土製の人工バリアにおける核種の保持性能に関連している。検討した 4 つの放射性核種の遅延係数、溶解度、及び半減期を付表 3-12 に示す。

付表 3-12　Seal failure シナリオで用いられている核種移行パラメータ（ANDRA, 2005a）

Radionuclides	Radioactive decay half-life [years]	Geological barrier		Clay engineered barrier	
		Retardation coefficient [-]	Solubility [mol/m^3]	Retardation coefficient [-]	Solubility [mol/m^3]*
^{36}Cl	3.02 E+05	1	Soluble	1	Soluble
^{79}Se	6.50 E+04	1	5.10^{-7}	1	5.10^{-7}
^{129}I	1.57 E+07	1	Soluble	1	Soluble
^{14}C	5.73 E+03	6	2.3	1	2.3

Table 7.2-7　Seal failure' altered evolution scenario – Chemical retention characteristics of radionuclides mobilised in the Callovo-Oxfordian layer and in the swelling clay components (for radionuclides contributing to impact in the 'seal failure' altered evolution scenario)

100 万年後にニアフィールドに残存する放射性核種の質量分布を付表 3-13 に示す。天然バリアの内の残存割合（付図 3-79 の経路 1）と坑道内の残存割合（付図 3-79 の経路 2)、及びその合計を示している。それぞれ以下の傾向を示している。

- I-129 及び Cl-36 は非収着性、長半減期、かつ可溶性であるため、岩盤やベントナイトにはほとんど収着しないため、100 万年後にはほぼ全量が処分セルの外に放出されている。ニアフィールドにおける質量の現象は非常に少ないかほぼゼロである。廃棄体パッケージから放出された核種は、廃棄体とアクセス坑道の間の人工バリア内を拡散で移行し、坑道へと到達する（I-129 の場合 59%が坑道に入り、41%が母岩に入る)。なお、プラグの位置がゼロ濃度という境界条件のため、どの核種においても水平方向に移行しやすくなっている点に注意されたい。
- C-14 は中程度の半減期であり、母岩への収着性は低い。100 万年時点では 80%がニアフィールド内に閉じ込められている。人工バリアよりも岩盤への収着性がやや高いため、岩盤中の存在割合の方がやや多い。
- Se-79 は非収着性であるが溶解度が非常に小さいため、処分セルからの放出率が大きく低減される。このためニアフィールド中の存在割合が小さい。

CU1 使用済み燃料における他のどのケースにおいても、アクセス坑道及び処分セル内が拡散場に保たれるため、この質量分布は同様である。

付表 3-13　100 万年後の（CU1 リファレンス容器）
（ANGRA, 2005a）

Radionuclides	Mass exiting the near field of the disposal cell (mass entering and remaining in the host formation + mass entering the drift)	Distribution of radionuclide release from the disposal cells	
		Mass entering and remaining in the host formation (pathway 1 Figure 7.2-12)	Mass entering the drift *(pathway 2 – Figure 7.2-2)*
^{129}I	100.000 %	41 %	59 %
^{36}Cl	79 %	32 %	47 %
^{14}C	12 %	8 %	4 %
^{79}Se	0.29 %	0.17 %	0.12 %

Table 7.2-8　'Seal failure' altered evolution scenario – Distribution of transfer pathways in the near field of the disposal cell integrated to one million years – CU1 reference package

さらに、立坑に到達した核種の割合を示したのが付表 3-14 である。前述の通り、立坑へ到達する核種の割合は以下の点と密接に関係している。

- 廃棄体から立坑へまでの核種の移行時間（人工構造物内を移行）について、移行時間が長くなるほど崩壊による減衰の影響が大きくなる。一方で、移行が遅くなると、立坑へ到達する前に坑道から岩盤へと移行する割合が多くなる。
- 天然バリア中の核種の収着容量

坑道内の地下水流速は非常に遅いため（全てのシーリングが機能喪失した場合で最大 3×10^{-3} m/s 程度）、天然バリアへと移行しやすい。その結果、坑道内に残存する核種のほとんどが主要坑道付近からのものとなる。処分場内のモル流量はどの核種についても非常に小さく、最も悲観的なケースでも 100 万年後に立坑に存在する核種の割合は I-129 で 0.06%、Cl-36 で 0.03%である。

付表 3-14　全てのシーリングが機能喪失したケースにおける
100 万年後の質量分布（CU1 リファレンス容器）
（ANDRA, 2005a）

	Cell		Repository zone Efficiency of repository zone seals		Access structures Efficiency of shaft seals	
	Entering the drifts	*Entering the unaltered Callovo-Oxfordian*	*Exiting the repository sub-zone (i.e., before the repository zone seals)*	*Exiting the repository zone seals*	*Exiting the main connecting drift seals*	*Exit {shaft + EDZ}*
^{14}C	4 %	8 %	0.000032 %	0.00000053 %	nil	nil
^{36}Cl	47 %	32 %	0.033 %	0.011 %	0.005 %	0.004 %
^{129}I	59 %	41 %	0.056 %	0.022 %	0.012 %	0.011 %
^{79}Se	0.12 %	0.17 %	0.000042 %	0.00001 %	0.0000019 %	0.0000016 %

Table 7.2-11　'Seal failure' altered evolution scenario – Distribution and quantification of the various transfer pathways – All seals defective – CU1 reference package

被ばく線量評価の結果については(2)を参照のこと。

②-2 Opalinus clay の“Seal failure”シナリオにおける核種移行解析の考え方

Opalinus Clay の“Seal failure”シナリオでは前述の(3)で示した核種移行解析を実施している。ここでは、NAGRA におけるリファレンスシナリオも含む核種移行解析全般の設定について述べる。原環センターHP に記載の内容を抜粋して以下の(a)～(b)に示す。

(a) 安全評価モデル

(a)-1 リファレンスモデルチェイン

ニアフィールドから生物圏までを対象とした解析コードであり、レファレンスケース及びその他の大部分のケースがこのコードで計算された。

- STMAN コード群：廃棄体からの核種放出、人工バリアを通過する核種の移行及び地圏への放出を表現するモデル
  - SPENT：使用済燃料（SF）に適用
  - STRENG：ガラス固化体（HLW）に適用
  - STALLION：長半減期中レベル放射性廃棄物（ILW）に適用
- 地圏解析コード PICNIC
- 生物圏コード TAME

(a)-2 代替解析コード

Super-FEP（安全評価において特に重要性の高い FEP）では安全性に関連する側面を取り扱えない場合や、科学的理解の上で現状排除することが出来ないにもかかわらず有意な影響を与える仮定を盛り込むことが出来ない場合に、レファレンスモデルチェインの代替モデルとして以下の

解析コードが使用されている。

- 移行コード FRAC3DVS
- ガス移行モデル Gas Model

(a)-3 確率論的コード

いくつかのパラメータが同時に変化する場合の影響を包括的に検討するために、確率論的感度解析がレファレンスモデルチェインを用いて実施されている。確率密度関数あるいは公式に従ったパラメータを発生し、STMAN 等のレファレンスモデルチェインの入力ファイルを自動的に作成する汎用の一般入力処理コード GIPC が使用されている。

(b) 不確実性の取り扱い

Opalinus Clay の安全評価では、材料選定などの設計関連の不確実性は廃棄物管理計画の影響を多分に受けることから、設計に関連する不確実性は、設計関連オプションとして他の不確実性とは別に取り扱われている。処分システムとその変遷に影響を及ぼす可能性がある不確実性は、処分システムとその変遷に影響する FEPs の理解及び変遷を生じる可能性がある経路の概念化において特定される。特定された不確実性は、処分場の安全性の観点から、

- 安全性に対する影響度合い
- 事象及びプロセスの発生頻度、信頼性

をもとに判断され、安全性に対する影響が小さい不確実性や発生頻度、信頼性が小さい不確実性はその後の解析で考慮されないか、可能性の範囲外の過程をおく“what if？ケース”に含めて検討されている。安全性に対し影響が大きく、発生可能性や信頼性が高い不確実性は、次の 2 つの不確実性である。

- バリアシステムに影響を及ぼす安全性関連の不確実性
- 地表環境に影響する不確実性

バリアシステムに影響する安全性関連の不確実性については、

- 科学的に信頼できるモデル、データ、検証済みの解析コードによる影響の定量化
- 不確実性の回避もしくは低減

について判断され、どちらかが可能な場合には線量評価の評価ケースに組み込まれる。不確実性の定量化が困難で不確実性の回避もしくは低減が可能でない場合には、不確実性は悲観的もしくは保守的な仮定、パラメータを設定することにより取り扱われている。保守的な仮定、設定には、処分システムのロバスト性を示すために安全性に対し有利な FEPs をあえてシナリオや計算ケースに組み込まず除外する留保 FEPs が存在する。また、地表環境に影響する不確実性は、生物圏と将来の人間活動に関する不確実性であり、国際的合意に従う様式化された概念を定義し決定論的評価ケースを適用することにより取り扱っている。

4) 生活圏の想定

① SR-Site の Incompletely sealed repository シナリオにおける生活圏の考え方

Incompletely Sealed repository 被ばく線量の影響は、(Andersson, 2010)の他のシナリオで使用されているのと同じ放射性核種モデルを生物圏に使用して推定されている。処分場の中央部の上方の開放シャフト及びアクセス坑道（斜坑）内の水は、ヒト及びウシのための飲料水、ならびに野菜、根作物及び穀類の栽培のための潅漑水としても使用されると仮定される。計算に用いたデータを付表 3-15 にまとめた。

SKB の FHA report(SKB, 2010a)によれば、Incompletely sealed repository シナリオにおける放射性核種の放出及びその後の被ばく線量評価の前提条件は、以下のようなものが示されている。

- 現在から約 58, 000 年後まで持続する温帯条件の最初の期間中、キャニスタの腐食開口は起こらない。
- 現在から 66, 200 年まで続くその後の氷河期の間に、高透水性亀裂と交差し、処分坑道と開放主要坑道との間の交差部の近くに位置する処分孔内の 1 つのキャニスタが腐食開口する。
- 現在から 66, 200 年後、処分孔と交差する亀裂内の移流によって決定される速度で、開口したキャニスタ内の使用済み燃料から放射性核種が放出される。放出された放射性核種は地下水によって処分孔から中央領域、及び処分坑道及び開放した主要坑道及びアクセス坑道を介して中央領域の上方のアクセス坑道（斜坑）及びシャフトに移行する。開放系中の水中の放射性核種濃度は、温暖な状態について推定される開放坑道中の地下水の交換量によって決定される。
- アクセス坑道（斜坑）及びシャフト内の水は、農業目的及び飲料水として人間によって利用される。

付表 3-15　開放されたシャフト及びアクセス坑道（斜坑）中の水の飲用及び灌漑利用を想定した場合の被ばく線量評価で用いたパラメータ（Andersson, 2010）

Table 6-6. Data used in the calculations of dose consequences from using the water in the open shafts and ramps as drinking water and for irrigation.

Parameter	Value/assumption	Comment/reference
Dose conversion factors	Dose factors for external irradiation, inhalation and ingestion of food cultivated at the site	/Nordén et al. 2010/
Sorption coefficients	Element specific sorption coefficients for soil in the irrigated area	/Nordén et al. 2010/
Dust concentration in the air	$5 \cdot 10^{-8}$kg dry weight/m^3	/Nordén et al. 2010/
Inhalation rate	1 m^3 per hour	/Nordén et al. 2010/
Yearly intake of carbon	110 kg carbon per year	/Nordén et al. 2010/
Yearly intake of water	0.6 m^3/year	/Nordén et al. 2010/
Productivity of vegetables on irrigated land	0.135 kgC per m^2 and year	/Löfgren 2010/
Productivity of root crops on irrigated land	0.127 kgC per m^2 and year	/Löfgren 2010/
Productivity of cereals on irrigated land	0.114 kgC per m^2 and year	/Löfgren 2010/
Density of agricultural soil	323 kg dry weight/m^3	/Löfgren 2010/
Volume of irrigation water used each year	0.15 m^3/(m^2 y)	/Nordén et al. 2010/
Number of irrigation events per year	5	/Nordén et al. 2010/
Runoff	0.186 m/y	/Löfgren 2010/

以下に SKB の被ばく線量評価において用いられているランドスケープ線量換算係数（LDF）についての概要を示す。

- ランドスケープ線量換算係数について

スウェーデンの規制では、人間に生じる有害な影響を、最大被ばくグループの代表的な 1 人の個人がその生涯にわたって受ける平均年間リスクとして評価することを規定している。そのため、SR-Site では、放射性核種それぞれについて、一定の放出率で複数の“潜在的な放出域”（生物圏オブジェクト）に放出が続くと仮定して、フォルスマルク地区の将来の居住者が受ける年間実効線量を計算している。

SR-Site では、安全評価に係る時間スケールにわたり、特に長期の気候変動及びそれに伴う海岸線の移動（前進と後退）に起因して、生物圏にはかなりの変化が生じると考えている。処分場から核種が放出した場合、海底が陸地化するにつれて地表水での放射能濃度が高まると考えられ、海底堆積土に蓄積された核種が、既存あるいは干拓された湿地帯における陸上での食物連鎖に入ることができるようになる。したがって SR-Site では、処分地の少なくとも一部が陸地化している時期に、処分場から放出した核種による人間及び他の生物体への潜在被ばくが最も高くなると考えている。SR-Site では、間氷期におけるフォルスマルクの地表景観（ランドスケープ）に係る生物圏オブジェクトの時間的な進展を詳細にモデル化している。「ランドスケープ」は複数の生物圏オブジェクトから構成されるものである。

年間線量の推定値を得るために、SR-Site 評価では、“地圏からの核種放出率”に、「ランドスケープ線量換算係数」（LDF）を乗じている。

LDF は、放射性核種の放出率が一定である状況下において、最大被ばくグループの代表的個人が受ける平均年間線量として定義される値である。SR-Site では、「基本 LDF」（basic LDFs）は、長期において核種が連続的に放出される場合に適用し、数年から数百年の期間にわたる核種

のパルス放出（キャニスタ中の燃料が水と接触してインベントリの一定率が瞬時放出されることを仮定した場合）においては「修正 LDF」（modified LDFs）を用いている。

基本 LDF 値は、単位は（Sv/y per Bq/y）であり（年間 1Bq あたりの核種の生物圏への放出率によって人が受ける年間被ばく線量）、修正 LDF 値の単位は（Sv/y per Bq；1Bq あたりの核種の生物圏への放出によって人が受ける年間被ばく線量）である。

LDF を算出するために、SR-Site では、生物圏オブジェクトにおける放射性核種移行のモデル化を行っており、付図 3-82 にあるような「コンパートメント・モデル」を用いながら核種の蓄積をモデル化している。また、SR-Site では、生物圏オブジェクトに関する LDF の経時変化を核種毎に計算し、悲観的な措置として、様々なオブジェクトのうち、LDF が最も高い値となる時間においての値を“最大被ばくグループを表現するための LDF 値”として選択したとしている。 付図 3-83 には生物圏評価で使用するモデルの空間的/時間的次元の依存関係を示す。

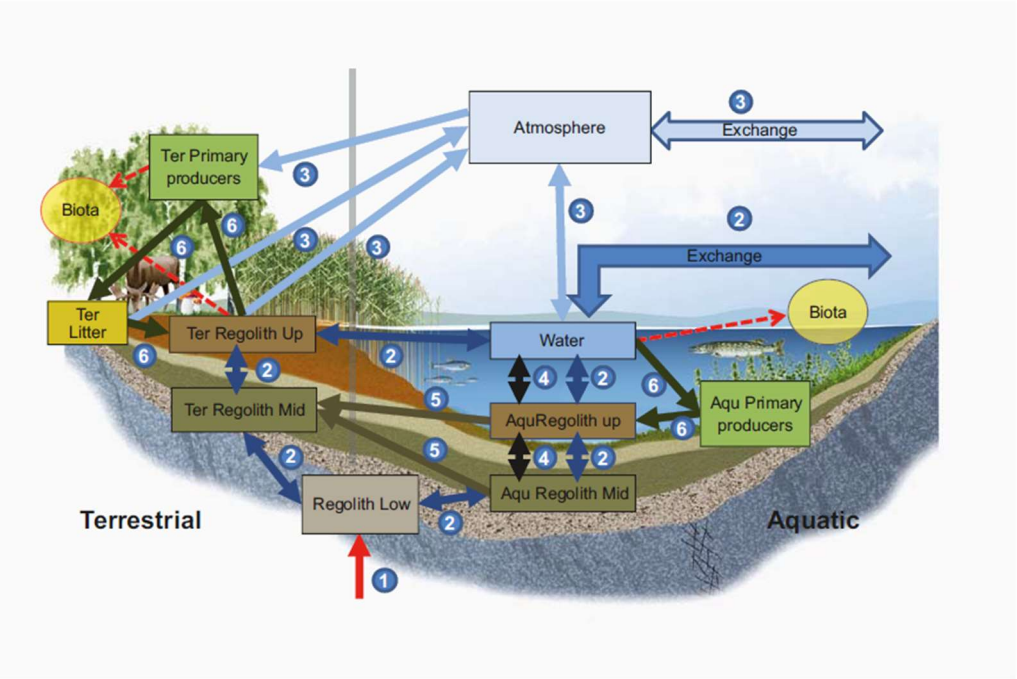


Figure 13-6. Conceptual illustration of the Radionuclide model for the biosphere. Boxes represent compartments, thick arrows fluxes, and dotted arrows concentration computations for non-human biota (these are not included in the mass balance). The model represents one object which contains an aquatic (right) and a terrestrial part (left) with a common lower regolith and atmosphere. The source flux (1 Bq/y) is represented by a red arrow (1). The radionuclide transport is mediated by different major processes, indicated with dark blue arrows for water (2), light blue for gas (3), black for sedimentation/resuspension (4), dark brown for terrestrialisation (5), and green for biological uptake/decomposition (6). Import from and export to surrounding objects in the landscape is represented by arrows marked "exchange". A detailed explanation can be found in /Andersson 2010/ and descriptions of the compartments are given in Table 13-1.

付図 3-82　生物圏に関する放射性核種モデルの概念的な模式図
（SKB, 2011）

四角はコンパートメントを表している。実線の矢印はフラックスを、点線の矢印は人間以外の生物相に関する濃度計算を表している（これらは質量収支に含まれない）。このモデルは、それぞれ一つの水域区画（右）と陸地区画（左）、そして共通の下部表層土及び大気で構成される 1 件

のオブジェクトを表している。ソース・フラックス（1 Bq/年）は、赤い矢印（1）によって示される。放射性核種移行には異なった主要プロセスが介在し、これらのプロセスは、水（2）に関しては紺色の矢印、気体（3）に関しては水色の矢印、沈降・堆積/再浮遊（4）に関しては黒色の矢印、陸地化（5）に関しては茶褐色の矢印、生物学的取り込み/分解（6）に関しては緑の矢印で示されている。ランドスケープ内の周囲のオブジェクトからの輸入及びそれへの輸出は、「EXCHANGE」（交換）と記された矢印で示される）。

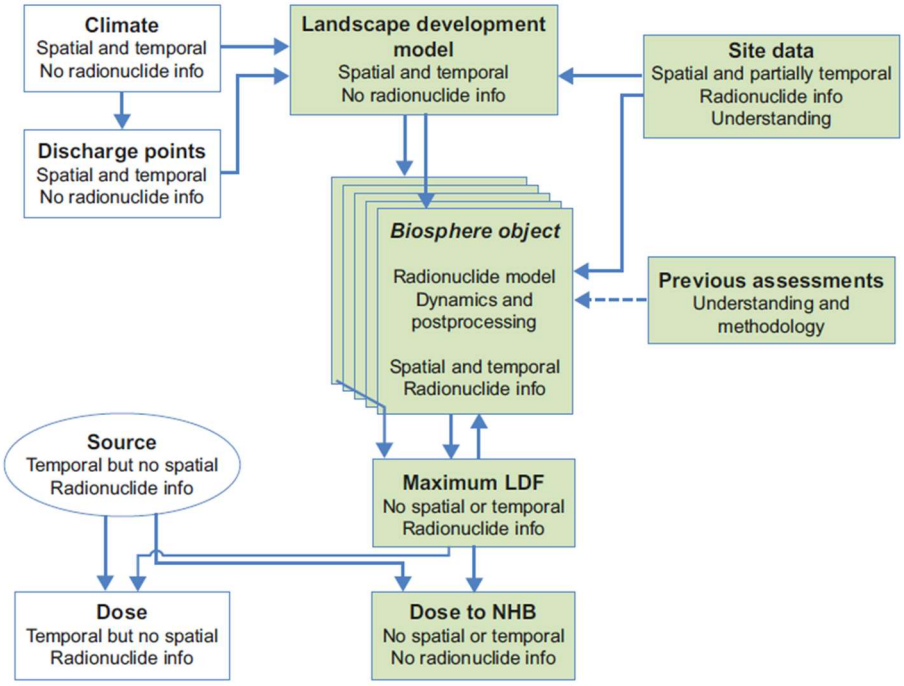


Figure 13-3. Major dependencies and spatial/temporal dimensions of models used in the biosphere assessment (grey). Climate scenarios and discharge points provide information, in temporal and spatial terms (but no radionuclide-specific information), that is used in the Landscape development model. The Radionuclide model provides temporally and spatially resolved radionuclide information. The maximum unit release dose (LDF) over all objects and time steps is a factor with no temporal or spatial dimension, used in the SR-Site calculation chain (see Section 13.4) to calculate doses to humans by multiplication with the source term (which has a temporal, but no spatial dimension). For doses to non-human biota (NHB), the source is directly used in the calculations of effects.

付図 3-83　生物圏評価（灰色）で使用されたモデルの空間的/時間的な次元の主要な依存関係（SKB, 2011）

気候シナリオ及び湧出ポイントは、ランドスケープ発展モデルで使用される時間的及び空間的な観点での情報をもたらす（ただし放射性核種固有の情報ではない）。また、放射性核種モデルは、時間的及び空間的に分解された放射性核種情報をもたらす。全てのオブジェクト及び時間ステップにわたる「最大単位放出線量」（LDF）は、時間的または空間的な次元を伴わない因数の一つであり、SR-Site の一連の計算で、人間に対する線量をソースターム（時間的な次元は伴うが、空間的な次元は備えていない）を乗じることによって算出するために使用している。「人間以外の生物相」（NHB）が受ける線量に関しては、線源は効果計算において直接使用している。具体的な LDF 値を付図 3-84 に示す（SKB, 2011）

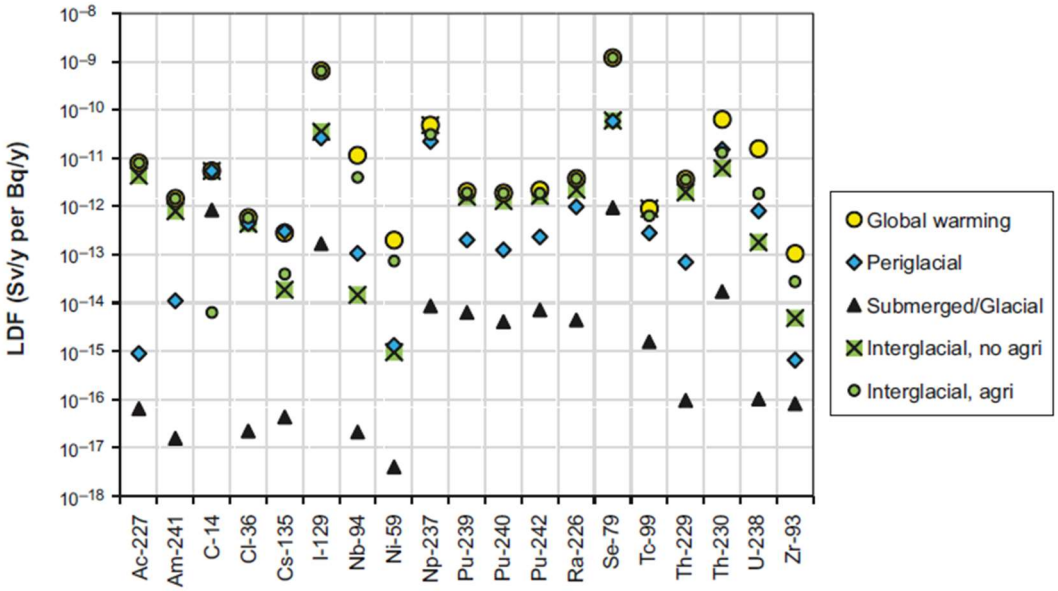


Figure 13-7. Resulting LDFs (i.e. the highest LDF over time among all biosphere objects) for different climate conditions /Avila et al. 2010/. LDFs for the initial submerged period were used to represent glacial conditions in the assessment. The effect on the LDFs of using agricultural products as food is visualised by including and excluding food from arable land during the interglacial period.

付図 3-84　ランドスケープ線量換算係数（SKB, 2011）

② Dossier 2005 Argile 及び Opalinus clay の“Seal failure”シナリオにおける生活圏の考え方

(a) Dossier 2005 Argile の”Seal failure”シナリオにおける生活圏の考え方

Andra(2005a)において安全性評価に関するシナリオ、プロセス、モデル構築について概説されている。モデリングに関しては以下の 2 つの経路が想定された。

- 欠陥のない地質学的障壁を経路とするケース（リファレンスケース）：原則として優先的な核種移行経路とみなされる
- 廃棄物の定置エリアからアクセス坑道までの地下施設を経路とするケース：この移動経路は、リファレンスケースの前に計算して地質学的障壁の経路と比較して弱い経路であることを確認するため、または、通常シナリオ（normal evolution scenario）、”Seal failure”シナリオ、”Very degraded operation”シナリオ等の EDZ 感度計算などにより移動の関連性がより高いと予想される場合の放射性核種を定量化するために行われる。

欠陥のない地質学的障壁を移行経路は、廃棄体パッケージ、廃棄セル、処分場構成要素、周囲への移動（「overlying」及び「Dogger」）及び生物圏の 5 つの領域からなる。このモデル化には、アクセス坑道は含まれなかった。全量が地質学的バリア（母岩）を通過する保守的な想定が使用された(Andra, 2005a）。

地下施設を経路とする場合には、移行経路は廃棄体パッケージ、廃棄セル、擾乱された環境及び坑道系の 4 領域からなる。坑道系から欠陥のない地質学的バリア（母岩）に移行しそこに残留しているモル流量と坑道に移行して残留しているモル流量を評価している。処分場は、サブゾーンとして廃棄セル、アクセス坑道、連絡坑道、EDZ、モジュールシールが取り扱われる。

Andra (2005a) では最も悲観的な想定をするため生物圏モデルにおいて水中の放射性核種の濃度が設定され、人は飲料水中または汚染された食物を介して直接均一な濃度の放射線にさらされることが想定された(Andra, 2005a)。2 つのモデル間の整合性は、最も悲観的な放射性核種濃度とその水の出口の周囲で算出された濃度とが等しいと想定することで担保される。なお揚水による地下水の流れへの影響や希釈については無視されている。

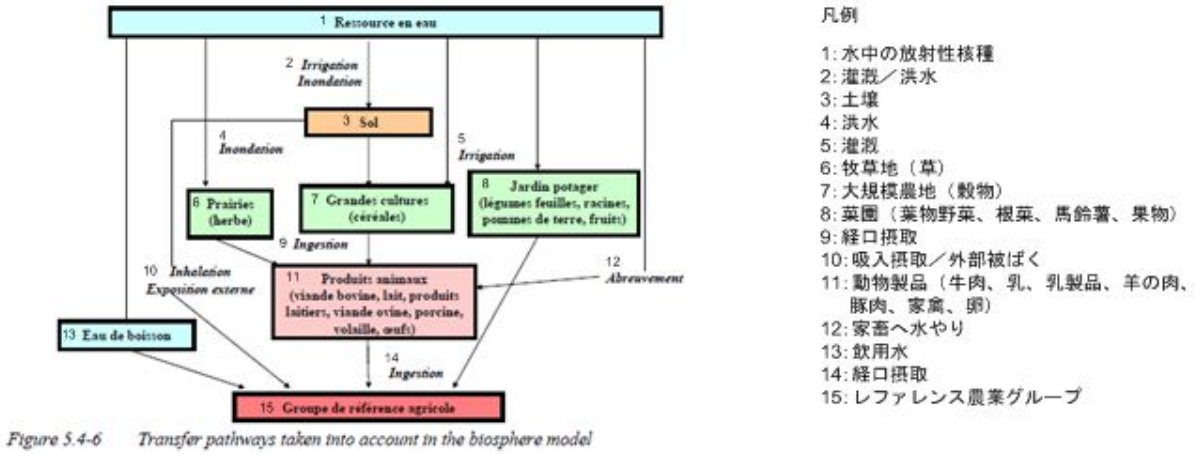
Andra(2005a) の評価計算では 2 つの移行経路を想定するが、生物圏モデル（入力として放射性核種濃度を使用しているようである）は同じものを使用している。

また、Andra (2005a) におけるリファレンスシナリオも含めた生活圏のモデル化の概要について、原環センターHP に記載の内容を以下に示す。

地圏（天然バリア）と生活圏のインターフェース（GBI）については、次のように設定している。

- 決定グループのメンバーが、飲用水または農業用水として水を汲み上げる井戸を GBI とする
- GBI となる井戸は、処分場設置場所に最も近い湧出域とし、その領域内にある最初の帯水層から揚水する
- 生活圏に放射性核種が到達するのはかなり将来になると思われるため、現在と 100 万年後の水理学モデルを用いて、湧出域を選定する

生活圏そのものについては、ANDRA は氷河気候においては遊牧民の行動様式が支配的となる可能性が高く、その場合は線量が低くなることから現在の気候（温暖気候）を想定して付図 3-85 のようにモデル化している。核種移行計算は Aquabios と呼ばれる解析コードを使用し、人間の食習慣についてはフランス国立統計経済研究所（INSEE）の調査結果に基づき設定している。大部分の核種についてはコンパートメント間の移行係数を定義したモデルを用いている。Cl-36 については自然界に安定元素がかなりの量で存在することから同位体平衡を考慮している。



付図 3-85　生活圏モデル（ANDRA, 2005a）

(b) Opalinus Clay の“Seal failure”シナリオにおける生活圏の考え方

NAGRA（2002a）には、一部の計算では算出されたニアフィールドまたは地圏への放出量を線量に変換する際に定常状態の生物圏線量換算係数が使用されるのに対し、時間に依存しないソースタームで短期的な線量計算が実行されているケースもあると述べられている。リファレンスシナリオに加えて、「代替シナリオ 2」には人間の行動に影響を受けて生じた放射性核種の放出に関する検討（放棄された処分場の概念を含む）が含まれている(NAGRA, 2002a)。この概念はリファレンスケースとは異なり、アクセス坑道系は適切な埋め戻し材・シーリングによって処理されず放棄されたと想定されている。ただし処分坑道及び作業用・建設用坑道は完全に埋め戻されたと想定されている(NAGRA, 2002a)。ここでは Opalinus 粘土層の飽和とクリープ変形の結果、初期に建設された坑道が崩壊すると想定されている。これにより、放棄された坑道の上部に三角形の進行性の損傷ゾーンが生じ、岩石やトンネルライナーの破片が坑道に落下する(NAGRA, 2002a)。NAGRA(2002a)では放棄された SF / HLW / ILW の処分場の地下水フラックスは定常抵抗ネットワークモデルに基づいて計算されており、大きな差異は Opalinus Clay から透水係数の大きな損傷した坑道系への地下水の流量が明示的に考慮されている点である。詳細な計算は TAME モデルによって実施された（なお、詳細は NAGRA(2002c)に詳しい）。

放棄された処分場のケースでは、適切に埋め戻された処分坑道系の中の廃棄体パッケージから埋め戻されずに放棄された坑道系までの最短の輸送距離は 100m である(NAGRA, 2002c)。最短でも 100m あることで多くの放射性核種が放棄された坑道系に到達する前に崩壊してしまうため、この冗長性が地下水流及び放射性核種の移動に対する効果的な障壁となる。悲観的な想定として、埋め戻さないまま放棄された坑道系に到着した放射性核種は坑道系の損傷ゾーンを介して Wedelsandstein 層に即座に放出されると想定されている（NAGRA,2002c）。なお、埋め戻された坑道系及び同等の多孔質媒体としてのシャフトの EDZ における核種移行速度は、地下水流と収着によって制御される（NAGRA, 2002c）。放射性核種が埋め戻されずに放棄されたアクセス坑道に到達し、その後 Wedelsandstein 層に到達すると、瞬時にリファレンスケースの生物圏へ輸送されることが想定されている（NAGRA, 2002c）。

放棄された処分場の計算では、リファレンスケースと同じ「モデルチェーン」が使用される（STMAN-PICNIC-TAME (NAGRA, 2002c)。評価の「モジュール」性を考えると、リファレンスケースと”Seal Failure”ケースは生物圏を含み全体的に同じモデルを使用しているようである。

参考文献

SKB (2010a): Handling of future human actions in the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-53.

ANDRA (2005a): Dossier 2005 Tome Safety evaluation of a geological repository.

NAGRA (2014): Modelling of Radionuclide Transport along the Underground Access Structures of Deep Geological Repositories Technical Report 14-10, NTB14-10.

SKB (2010c): THM modelling of buffer, backfill and other system components Critical processes and scenarios, SKB TR-10-11.

Sidborn M., Sandström B., Tullborg E. L., Delos A, Molinero J, Hallbeck L, Pedersen K, (2010): SR-Site. Oxygen ingress in the rock at Forsmark during a glacial cycle. SKB TR-10-57, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2010d): Design, production and initial state of the buffer. SKB TR-10-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2010e): Data report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-52, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Tullborg E-L., Smellie J., Nilsson A. C., Gimeno M. J., Puigdomenech I., Brüchert V., Molinero J., (2010): Sulphide contents in the groundwater at Forsmark. SKB TR-10-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bennet., D. G. (2012): Initial Review of SR-Site Main Report. SSM 2012:24. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.

Hicks, T., Baldwin, T., (2012): Initial review of chemical and erosional processes within the buffer and backfill – geochemical processes. SSM 2012:29. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.

Apted, M., Arthur, R., (2012): Initial review of chemical and erosional processes within the buffer and backfill – geochemical processes. SSM 2012:29. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.

Little, R., (2012): Review of SKB's radionuclide transport methodology. SSM 2012:55, Stockholm, Sweden.

Ofoegbu, G. I., Smart, K. J., (2012): Shear movement of near-field rock due to large earthquakes. SSM 2012:57. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.

Geier, J.E. (2015): Assessment of flow-related transport parameters used in the SR-Site safety case. SSM 2015:40. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.

Pensado, O., Mohanty, S., (2012): Independent radionuclide transport modelling. SSM 2012: 58. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden

SKB (2010g): Canister production report, 2010. Design, production and initial state of the canister. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Mohanty, S., Pensado, O., (2014): Reproduction of SKB's canister failure calculations. SSM 2014:33. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.

Penfold, J., (2014): Further reproduction of SKB's calculation cases and independent calculations of additional "what if" cases. SSM 2014:55. Strålsäkerhetsmyndigheten

(SSM).
Röhlig, K. J., (2015): Review of uncertainty propagation and sensitivity analysis in SR-Site. SSM 2015:05. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.
Geier, J. E., (2015): Assessment of flow-related transport parameters used in the SR-Site safety case. SSM 2015:40. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.
Benbow, S.J., Metcalfe, R., Burrow, J., (2015): Independent modelling of engineered barrier evolution and coupled THMC: canister corrosion calculations in SR-Site. SSM 2015:49. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.
Yoon, J. S., Stephansson, O., Min, K. B., (2016): Modelling of the thermal evolution of the KBS-3 repository at Forsmark and associated induced seismic activity. SSM 2016:23. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.
Pensado, O., (2017): Radionuclide release rates associated with bounding cases featuring relatively early canister failures in a spent fuel repository. SSM 2017: 15. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.
Bath, A., (2018): Review of geochemical data utilisation in SR-Site safety assessment. SSM 2018:15. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.
SSM (2019): SSM's external experts' reviews of SKB's report on supplementary information of canister integrity issues. SSM 2019:22. Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Stockholm, Sweden.
SKB (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project. Vols. 1-3. SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKB (2009a): Design premises for a KBS-3V repository based on the results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKB (2006): Long term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKB (2010h): Backfill production report, 2010. Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels. SKB TR-10-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKB (2010): Closure production report, 2010. Design, production and initial state of the closure. SKB TR-10-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
Åkesson M., Börgesson L., Kristensson O., (2010b): SR-Site Data report. THM modelling of buffer, backfill and other system components. SKB TR-10-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKB (2010j): FEP report, 2010 : FEP report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKB (2010k): Fuel and canister process report, 2010. Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
SKB (2010l): Buffer, backfill and closure process report, 2010. Buffer, backfill and closure

process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2010m): Radionuclide transport report, 2010. Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-50, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2010n): Model summary report, 2010. Model summary report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sena, C., Salas, J., Arcos, D., (2010): Aspects of geochemical evolution of the SKB near field in the frame of SR-Site. SKB TR-10-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Grandia, F., Galíndez, J. M, Molinero, J., Arcos, D., (2010): Evaluation of low-pH cement degradation in tunnel plugs and bottom plate systems in the frame of SR-Site. SKB TR-10-62, Svensk Kärnbränslehantering, AB.

SKB (2010o): Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-66, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2010p): Groundwater flow modelling of an abandoned partially open repository, SKB R-10-41.

Joyce S., Simpson T., Hartley L., Applegate D., Hoek J., Jackson P., Swan D., Marsic N., Follin S., (2010): Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark.SKB R-09-20, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Svensson U., Follin S., (2010): Groundwater flow modelling of the excavation and operational phases– Forsmark. SKB R-09-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.

NAGRA (2002a): Project Opalinus Clay: Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). NAGRA Technical Report NTB 02-05. NAGRA, Wettingen, Switzerland.

NAGRA (2002b): Project Opalinus Clay: Models, Codes and Data for Safety Assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). NAGRA Technical Report NTB 02-06. NAGRA, Wettingen, Switzerland.

Smith P., Gribi P., Mayer G., and Schneider J., (2004) Project Opalinus Clay (Entsorgungsnachweis): Supplementary calculations to illustrate the influence of EDZ hydraulic conductivity on radionuclide transport. Nagra Working Report NAB 04-12. Nagra, Wettingen, Switzerland.

SKB (2009): Underground design Forsmark. Layout D2. SKB R-08-116, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2008): Underground design Forsmark. Layout and construction plan. SKB R-08-113, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bockgård N., (2010): Groundwater flow modelling of an abandoned partially open repository. SR-Site

原子力環境整備促進・資金管理センター,2020：原子力環境整備促進・資金管理センターHP, https://www2.rwmc.or.jp/sa:dossier2005:methodology,2020 年 3/30 閲覧.

Andersson E. (ed), (2010): The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp.SKB TR-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. SKB TR-11-01. Volume 3.

Nagra (2002c): Project Opalinus Clay. Model, Codes and Data Assessment. Demonstration of disposal facility for spent ful, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsogungsnachweis). National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste. Wettingen, Switzerland.