

分置

地層処分の極限安全性 に関する研究（Ⅱ）

（要 約）

（動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書）

1998年2月

株式会社 三菱総合研究所

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107-8445 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Research Study for Extremely Unlikely Scenario of High level Waste Disposal : Part(II)

Hiroo Ohkubo*

Abstract

In this research, each event and process relevant to the key works(or scenario initiator) such as human intrusion, uplift/erosion and climatic change have been identified and the catastrophic scenario, which inspires ordinary people to have tremendous concern, has been analyzed.

Based upon the characteristic events and processes of each scenario considered in the above and through the research of existing model of such risk, quantitative concept (release amount magnitude, release mode, release form, frequency of release, probability etc.) and impact on repository system, facility and environment have been analyzed, defended and defined. Model which can assess and analyze such impact has been built. Using these models, risks directly or indirectly caused by HLW repository have been calculated.

The risk calculated by the model developed in the above has been visualized and presented by comparing with other risks.

This report is the result of research conducted by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract No.:090D0163

Department, section, and the name of staff in charge:

Hiroyuki Umeki, Isolation System Research Program, Radioactive Waste Management Project, Environmental Technology Development Division

* Energy and Natural Resources Dept., Research Center for Environment and Development.

目 次

まえがき	1
1. はじめに	3
2. 方法論	4
2.1 放射線学的影響	4
2.2 非放射線学的影響	5
2.3 発生可能性の評価	5
2.4 確率の評価	5
2.5 不確実性	6
3. 人間侵入シナリオ	7
3.1 背景	7
3.2 人間侵入シナリオの候補	8
3.3 シナリオ解析	12
3.3.1 杭柱掘削活動シナリオ	12
3.3.2 採鉱シナリオ	12
4. 隆起・侵食シナリオ	13
4.1 背景	13
4.2 隆起・侵食シナリオの候補	14
4.3 シナリオ解析	21
5. 気候変動シナリオ	22
5.1 背景	22
5.2 候補となる気候変動シナリオ	24
5.3 シナリオ解析	27
5.3.1 海水準低下シナリオ	27
5.3.2 海水準上昇シナリオ	27

5.3.3 浸水量増加シナリオ	28
5.3.4 浸水量減少シナリオ	28
5.4 気候変動の複合的影響の結果	29
6. 評価結果の解釈	30
6.1 ほとんど起こり得ない事象及び長期的環境プロセスによるリスク ..	30
6.2 評価結果のスライド化	32
あとがき	33
参考文献	35

表 目 次

表 1	人間侵入シナリオの定性的評価のまとめ	9
表 2	隆起・侵食シナリオの定性的評価のまとめ	15
表 3	HLW 処分場の露出の放射線学的影響	21
表 4	気候変動シナリオの定性的評価のまとめ	25
表 5	日本におけるほとんど起こり得ない事象、長期的環境プロセス 及び他の事故による期待死亡率	31

目 次

図 1	検討対象の候補となる人間侵入事象の概観	8
図 2	処分場を覆う深さの変化の原因	13
図 3	気候変動の原因の候補	23
図 4	気候変動の影響	24
図 5	気候変動シナリオによる線量の経時変化	29
図 6	処分場の放射線学的リスクと他の原因による死亡リスクとの比較 ..	30

まえがき

地層処分の安全性は、性能評価によって示される処分システムの将来挙動の予測に基づいて判断される。しかし、性能評価の構造は、シナリオ解析、モデルとデータを用いた影響解析を含む複雑なものであり、性能評価に直接かかわっていない専門家あるいは一般公衆にその内容をわかりやすく説明することは、国際的にも大きな課題となっている。特に、地層処分が将来もたらすかもしれない危険性に対して、どのようなシナリオを設定するかについては、専門家の判断が取り込まれている部分が多く、その考え方が伝わりにくい。このため一般公衆の間では、性能評価の専門家が考慮する必要がないと判断した極端なシナリオばかりが、専門家からいわせれば空想ばかりが先行し拡大して解釈されているということになる。専門家は、このようなシナリオについて実際に評価を行えば、かえって事態を曲解させる方向に進ませることを懸念しているのが一般的であり、性能評価内容を正統的に理詰めで説明しようとするが、なかなか埒があかないうらみがある。すなわち、安全性の評価という論理と不安との間に溝が存在している。

そこで、昨年度に引き続き本年度は、このような不安に端を発する極端なシナリオ（以下極限シナリオ）を実際に評価し、このような評価自体がどのような意味があるのか、またそのような極端な評価の結果示されるリスクがどの程度なものなのかを具体的に示すことによって、地層処分の安全性に対する理解を深め、性能評価の専門家の思考とその外部にいる人々との思考のギャップを埋めることを試みる。

よって、我が国の高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に資することを目的とする。

1. はじめに

前年度⁽¹⁾に引き続き、本調査研究が対象とするのは、理論的には予見可能な将来に処分場の形状を破壊し得るほとんど起こり得ない単一事象である。処分場の形状を破壊し得る現象には、処分場を貫通する噴火活動と大規模地震や人間侵入などが含まれる。処分場立地調査の際に周到な評価が行なわれていれば、これらいずれの事象もほとんど起こり得ない。サイト選定で活断層、火山活動、人間侵入に近い場所が除外されるからである。しかし、いかにほとんど起こり得ないとは言え、処分場の近くに新しい断層が生成されたり、マグマが貫入したり、人間が侵入することはあり得る。また、活断層を発見できなかった場合、処分場の立地決定で過誤が起こり得る。

巨大な隕石の衝突も処分場の形状を破壊するが、そういう衝突はほとんど起こり得ない⁽²⁾。将来世代の人間が処分場を破壊する可能性もいろいろなシナリオの中で想定されている⁽³⁾。過去数千年の文化を振り返ってみれば、今後数千年の間に文化、政治、人口に大きな変動が起こり、人々が処分場の記憶を喪失し、それを破壊することは十分に考えられる。

本評価で検討する他の安全性関連事項として、不連続な初期事象に加え、長期的な環境プロセスがあげられる。気候変動は、次の 100 万年間に確実に生ずると考えられる。自然の氷河時代は、進退を繰り返し、その結果、侵食と、海水準の重大な変化を引き起こす。「環太平洋火山帯」での構造的なプレート運動によって、日本の広域において隆起・沈降が生ずる。同様に、風化により、陸部の侵食が続く。このようなプロセスは、緩慢なものであるが、数百万年の間に、光景がかなり大きく変化し、地層処分場の HLW が、長期に亘るゆっくりとした陸地の変化によってついに露出してしまうこともあり得る。

このようなほとんど起こり得ない事象と進展していく長期的環境変化のプロセスが本調査研究の対象であり、発生可能性や発生確率が極めて小さいこととは無関係に、その影響について検討する。

2. 方法論

ほとんど起こり得ない事象と長期的環境プロセスに関連する潜在的リスクを評価するには、このような事象やプロセスの影響の大きさとこのような事象の発生可能性、もしくはこのようなプロセスの発生確率について判断する必要がある。放射線学的影響は、全てのシナリオについて予測され、非放射線学的影響は、影響を明確化できるシナリオについて予測される。発生可能性と確率については現在の統計ないしは地球の地質学的実データから推定する。

2.1 放射線学的影響

高レベル廃棄物地層処分場の形状を破壊する事象で、放射線学的影響の評価には、ソースターム、ソースタームの潜在的摂取体への移動と拡散、および摂取体に対する生物学的影響の推定が含まれる。ソースタームは、危険にさらされる全ての物質（処分場または地上施設の放射性核種のインベントリ）、ダメージを受けるインベントリの割合、ダメージを受けるインベントリのうち地表に放出される割合、大気圏に放出される割合、あるいは飲料水源に放出される割合を検討することによって求められる。大気放出におけるパフ・リリースの場合、これは下記の式で表すことができる⁽¹⁾。

$$S = \text{MAR} \times \text{DR} \times \text{ARF} \times \text{LPF}$$

ここで、 S = パフの場合のソースターム（処分場限界線から空気中への放出）

MAR = 危険にさらされる物質

DR = ダメージを受ける割合

ARF = 空気中に放出される割合

LPF = 漏出経路係数

大気放出における連続的放出の場合、この式は下記のようなになる⁽¹⁾。

$$S = \text{MAR} \times \text{DR} \times \text{ARR} \times \text{LPF}$$

ここで、 S = 連続的放出の場合のソースターム（処分場限界線から空気中への放出率）

MAR = 危険にさらされる物質

DR = ダメージを受ける割合

ARR = 空気中に放出される率

LPF = 漏出経路係数

放射性核種の大気拡散を含む事象から受ける放射線学的影響の評価には、RSACコード⁽⁵⁾を用いる。放射性核種の吸入に起因する放射能被曝については、分析では粒子サイズが吸入可能な範囲（約 10 ミクロン未満）にある空气中浮遊物質を考慮に入れた。放射性核種で汚染された飲料水から受ける影響の算定には、PNC 殿の線量換算係数と線量データ⁽⁴⁾が用いられる。外部被曝線量率の算定には、MicroShield コンピュータプログラム⁽⁶⁾が用いられる。

2.2 非放射線学的影響

火山活動、大地震、天体の衝突、人間侵入に関連するほとんど起こり得ない事象には、放射線学的影響の他に非放射線学的影響もある。このような事象の影響は、類似の事象に関する世界規模の実データ、もしくは現在の統計に基づいて推定する。隆起・侵食を含む長期的環境プロセスの非放射線学的影響は、火山活動や大規模地震活動の影響と関連付けられるため、今回は評価していない。気候変動のプロセスでは、非放射線学的影響に死者が含まれるとは考えられない。暴風雨のような悪天候では死者が発生し得るが、人間はかなりの適応力を有しているため、気候変動と闘うための行動を起こすであろう。このような異なる諸事情により、影響評価は、シナリオ毎の論拠に基づいて行われる。

2.3 発生可能性の評価

ほとんど起こり得ない事象に関する経験は比較的少ないので、そのような事象の発生頻度は地球の地質学的実データの解釈に基づくものである。しかし、人間侵入シナリオについては、掘削・採鉱に関する現在の統計に一部基づいている。ほとんど起こり得ない事象の発生頻度については、大量の情報が作成されている。日本で起こり得る地質学的事象に関する調査も、以前に行なわれている⁽²⁾。

2.4 確率の評価

長期的環境プロセスは、不連続時間的事象ではない。隆起・侵食シナリオ、気候変動シナリオでは、長期的環境プロセスによってもたらされる被曝の可能性を評価するために、確率の推定が行われる。確率の推定には、環境データの過去の傾向を外挿する方法が用いられる。検討対象の期間が地質学的時間スケールに比

べて短く、処分場面積が地球の全表面積に比べて小さいので、このような環境データの外挿方法は適切と考えられる。時間と面積の想定の下で、長期的環境プロセスは、確率的な取り扱いに適合するものと判断される。

2.5 不確実性

ほとんど起こり得ない事象と長期的環境プロセスのリスク評価には、不確実性が存在する。検討対象のシナリオの発生可能性、発生確率及び影響を評価する上で、地球上の地質学的実データ、歴史的並びに現在の統計、及び様々な解析方法を組み合わせて、専門家判断が駆使される。放射線学的影響に関連する不確実性の多くは、放出される放射性物質の量と将来社会の社会経済的並びに技術的状況に関するものである。放射線学的影響では、気象もしくは水理学的条件に左右される放射性物質の移動の推定にも不確実性がある。非放射線学的影響に関する不確実性は、大規模火山活動、大規模地震、隕石衝突及び将来の掘削及び採鉱技術による影響に関する統計分析データが限られていることに起因する。発生可能性の推定に関する不確実性は、ある特定のサイトに対する外挿が可能なほとんど起こり得ない事象の例が比較的少ないことに起因する。確率の推定における不確実性は、長期的環境プロセスの傾向を外挿して将来確率を決定することから生ずる。これらの要因により、リスクの可能性は少なくとも1桁違ってくると判断される。

3. 人間侵入シナリオ

ここでは、背景的情報（3.1 節）、広範囲に亘る人間侵入事象の候補に関する定性的評価（3.2 節）、及び定性的評価の考察をさらに進展させるために選定した事象の発生可能性と影響に関する定量的評価（3.3 節）について述べる。

3.1 背景

高レベル放射性廃棄物（HLW）を地層に処分する理由は、廃棄物を人間並びに人間環境から隔離することである。HLW 処分場開発に関連する多くの準備によって、人間侵入の機会が最小化されている。これらの防護的手段は、原子力産業で実用化されている深層防護思想の一部となっており、以下のものを含む。

- ・ 立地
- ・ 能動的な制度・管理
- ・ 受動的な制度・管理

本評価では、能動的な管理、受動的な管理及び立地のいずれの方法でも、人間侵入を防止し得ないようなシナリオを広範囲に亘り検討する。さらに、候補対象の多くのシナリオから、詳細な評価を行うための 2～3 のシナリオを選定する。

3.2 人間侵入シナリオの候補

図1は、本評価で検討対象とする人間侵入シナリオを概観したものである。

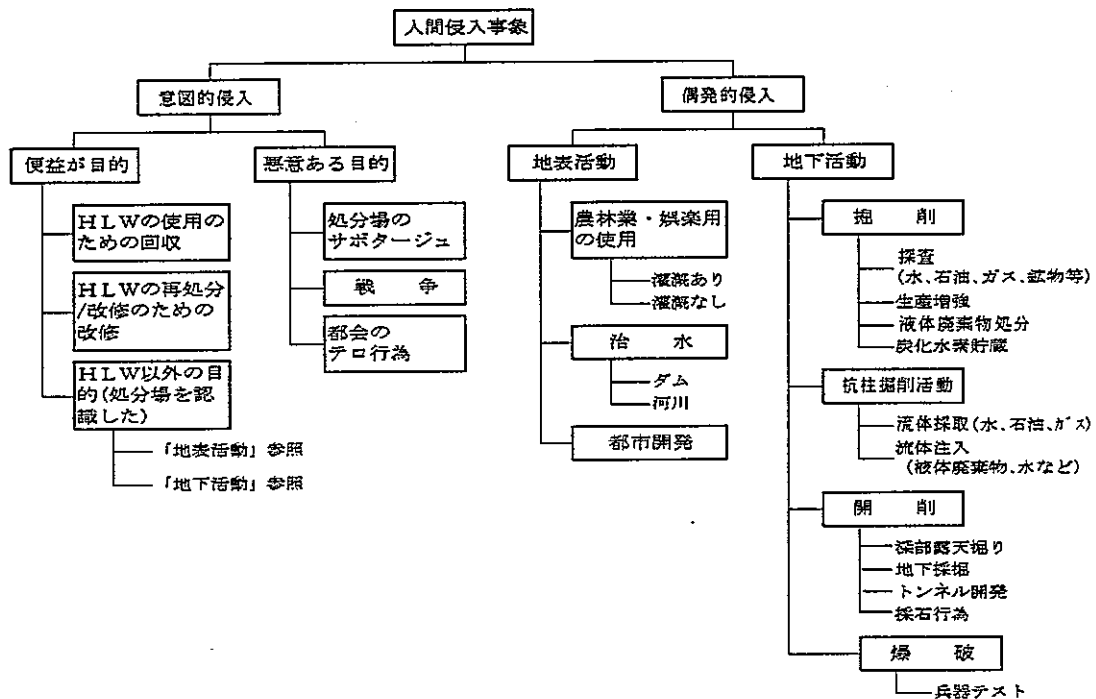


図1 検討対象の候補となる人間侵入事象の概観

これらの多くの主要な事象から、一般公衆が関心を持ち得るような潜在的に破局性の高い2～3の侵入行為を同定するために定性的なスクリーニングプロセスを用いた。表1にスクリーニング結果をまとめた。

表1 人間侵入シナリオの定性的評価のまとめ

シナリオ	発生可能性	影響	発生時期	備考
HLW 含有物質の便益利用のための HLW 回収中に生ずる事故	回収の可能性は小さく、埋設時のものより低い。回収される場合、事故率は、閉鎖前の地上作業と似たものとなる。	核分裂生成物の崩壊のため、埋設時点より多分小さくなる。	処分場閉鎖後の任意の時点	発生可能性はかなり低く、影響は閉鎖前事故と同等もしくはそれ以下である。
HLW をどこか別の場所で再処分/改修するための回収中に生ずる事故	回収の可能性は小さく、埋設時のものより低い。回収される場合、事故率は、閉鎖前の地上作業と似たものとなる。	核分裂生成物の崩壊のため、埋設時点より多分小さくなる。	処分場閉鎖後の任意の時点	発生可能性はかなり低く、影響は閉鎖前事故と同等もしくはそれ以下である。
HLW 処分場の存在を認識していながら、HLW 以外の他の目的（例えば、鉱物の採鉱）のための意図的侵入の最中に生ずる事故	回収の可能性は小さく、埋設時のものより低い。回収される場合、事故率は、閉鎖前の地上作業と似たものとなる。	HLW の存在を知っているため、多分予防措置をとると考えられるので、偶発的侵入より小さくなる。	処分場閉鎖後の任意の時点	本シナリオで発生可能な影響は、侵入者が処分場の存在に気がつかず、予防措置を講じないときに限定される。
処分場へ拒否的注目を向けさせるための処分場でのサボタージュ	侵入に成功する可能性は非常に少ない。侵入するには、かなりの資源（設備及び人材）を投入する必要があるが、サボタージュではそのようなことはまれである。設備や侵入跡及び爆破が検知されると考えられる。	開削による偶発的侵入に匹敵する大気への散乱があり得る。杭柱掘削活動による偶発的侵入に匹敵する飲料水への散乱があり得る。	能動的制度・管理喪失後（処分場閉鎖後 100 年以上経過後と想定し得る）	侵入は検知されるものと考えられ、また影響は、他の事象と同程度である。

シナリオ	発生可能性	影響	発生時期	備考
HLW を散乱する目的で使用する戦争	HLW を散乱するのに必要な大量のエネルギーを直接利用する可能性の方がずっと高い。HLW を散乱するには極度に大きなエネルギーが必要であろう。	致死率増に至るまでに長時間を要するため、あまり魅力的な手段とはならない。	任意の時点	HLW の散乱に必要な投入エネルギーの多大さと、散乱の効果の緩慢さが、魅力を失わせよう。そのような効果は、戦争の目的に合致しない。
HLW を手段に使う都会でのテロ活動	テロ活動は確かに存在するが、HLW を使用することには疑問がある。生物学的、化学的、あるいは他の放射線源を使う可能性の方がずっと高い。	HLW の健康への影響の緩慢さがテロ活動の手段としては望ましくない。生物学的、化学的兵器の方がより実効的である。	能動的制度・管理喪失後(処分場閉鎖後 100 年以上経過後と想定し得る)	生物学的、化学的兵器の方がより効果的でありかつ入手するのも容易であるため、本事象の発生は疑わしい。
処分場上方での農・林業、娯楽目的の使用	処分場の位置や気候にもよるが、本事象は、数千年前に亘って生じ得るものと予想される。	これらの地表活動が処分場に直接的な影響を与えたりは考えられないし、また大規模の、あるいは即時の影響をもたらすものではない。	受動的制度・管理喪失後(処分場閉鎖後 1000 年以上経過後と想定し得る)	他の事象に比べ、影響は小さく、また効果のあらわれ方も遅い。
処分場への水量を増加させるが、処分場を直接貫通しない治水活動	発生可能性は処分場の位置に強く依存し、0～高まで幅広い	水量増加が処分場に影響を与え得るが、処分場への直接的な注入口もしくは処分場からの採取の方がもっと大きな影響がある。	受動的制度・管理喪失後(処分場閉鎖後 1000 年以上経過後と想定し得る)	影響は、杭柱掘削活動事象よりも小さく、また即時的でない。

シナリオ	発生可能性	影響	発生時期	備考
処分場の地上もしくは地表近傍での都市開発	立地と受動的制度・管理によって本事象の発生可能性を最小限にしようとするであろうが、可能性はある。	地表の汚染を被る固体が増加する。多くの人口に対する癌死リスクが若干増加し得る。	受動的制度・管理喪失後(処分場閉鎖後 1000 年以上経過後と想定し得る)	本事象による被曝は、長時間(寿命期間)に亘り、極低レベルで続く。
探鉱もしくは生産のための掘削	立地と受動的制度・管理によって本事象の発生可能性を最小限にしようとするであろうが、可能性はある。廃棄物キャニスター内まで掘削することの発生頻度は、 1×10^{-6} /年未満である。	HLW は、地表に運ばれ得るが、影響は主として掘削作業員に限定される。被曝線量は小さい ($<0.1\text{Sv}$)。	受動的制度・管理喪失後(処分場閉鎖後 1000 年以上経過後と想定し得る)	本事象は、数人の個人に限定された最小の影響をもつ非常に小さな確率事象である。
杭柱掘削活動 (水、石油、ガス等の採取もしくは注入)	$\ll 1 \times 10^{-6}$ /年	汚染された流体(飲料水、熱水、石油、天然ガス等)が使用目的で地表にもたらされ、潜在的に重大な影響が生じ得る。	受動的制度・管理喪失後(処分場閉鎖後 1000 年以上経過後と想定し得る)	本事象によって、汚染水の飲用が発生し得る。3.3 節でさらに検討する。
地下での探鉱、深部露天掘り、採石を含む開削	$\ll 1 \times 10^{-6}$ /年	比較的多くの人口を対象とする大気への放出があり得る。	受動的制度・管理喪失後(処分場閉鎖後 1000 年以上経過後と想定し得る)	本事象によって、回避不可能な大気への放出がもたらされる。3.3 節でさらに検討する。
地下での兵器実験のような爆破	$\ll 1 \times 10^{-6}$ /年	大気中への放出は予想されない。兵器(例えば、核分裂生成物の放出)からの影響の方が HLW の影響よりも大きい。	受動的制度・管理喪失後(処分場閉鎖後 1000 年以上経過後と想定し得る)	爆破の影響への HLW の寄与はかなり低い。

3.3 シナリオ解析

前節では、広範に亘る候補事象について定性的な評価を行い、より詳細な評価を行う事象として、杭柱掘削活動と開削の 2 つを選定した。本節では、これらの事象の発生頻度と影響について定量的評価を行った。

3.3.1 杭柱掘削活動シナリオ

杭柱掘削活動シナリオには、掘削行為と、放射能汚染水を公衆へ供給する井戸の利用、とが含まれる。本シナリオの発生頻度は、 5×10^{-11} /年と計算されたが、将来の掘削率を 1 桁増加させたとしても、 10^{-9} /年未満である。期待寿命 100 年の人々にこの井戸だけから都市供給水として水が供給されるとすると、個人の預託実効線量当量 (CEDE) は 1.5Sv、その晩発性癌死リスクは 7.5×10^{-2} となる。これは、100 年間で 14000 人の人口 (井戸から給水を受けると想定される人口) のうち、1050 人の晩発性癌死の発生に相当し、集団預託線量は 21,000 マン・Sv となる。

3.3.2 採鉱シナリオ

HLW 処分場近隣で生じ得る採鉱及び採石活動には様々なものが存在するが、ここでは以下の理由により偶発的な深部露天掘りを解析対象事象とする。

- ・ 一回の事故で、多くの処分パッケージに影響を及ぼす可能性のある非常に大規模な活動であること
- ・ 直接大気中へ放出し、公衆へもたらす可能性があること

この深部露天掘りシナリオの発生頻度は、 5×10^{-11} /年と計算されたが、採鉱活動規模がたとえ 1 桁増加しても、 10^{-9} /年未満である。

人口 415,000 人が 8 時間に亘って、被曝することによる集団預託線量は、830 マン・Sv あるいは 1 人当たり平均 2 mSv である。被曝と健康への影響とを関係付ける ICRP の換算係数⁽⁶⁾を用いると、癌死者数の増加は 42 人、また、1 人当たりの癌死リスク増は 0.01% となる。

4. 隆起・侵食シナリオ

ここでは、背景的情報(4.1節)、隆起・侵食事象の定性的評価(4.2節)並びに発生可能性の定量的評価と詳細検討(4.3節)について述べる。

4.1 背景

侵食、削剥、沈降、隆起、堆積は、長期間に亘って進展する地質学的プロセスである。これらのプロセスの結果によっては、HLW 処分場の深度にまで影響が及び得るため、これらのプロセスによる放射性物質の潜在的放出を評価・決定する。

仮想的な HLW 処分場の深度へ変化をもたらし得る地形学的原因を図2にまとめた。

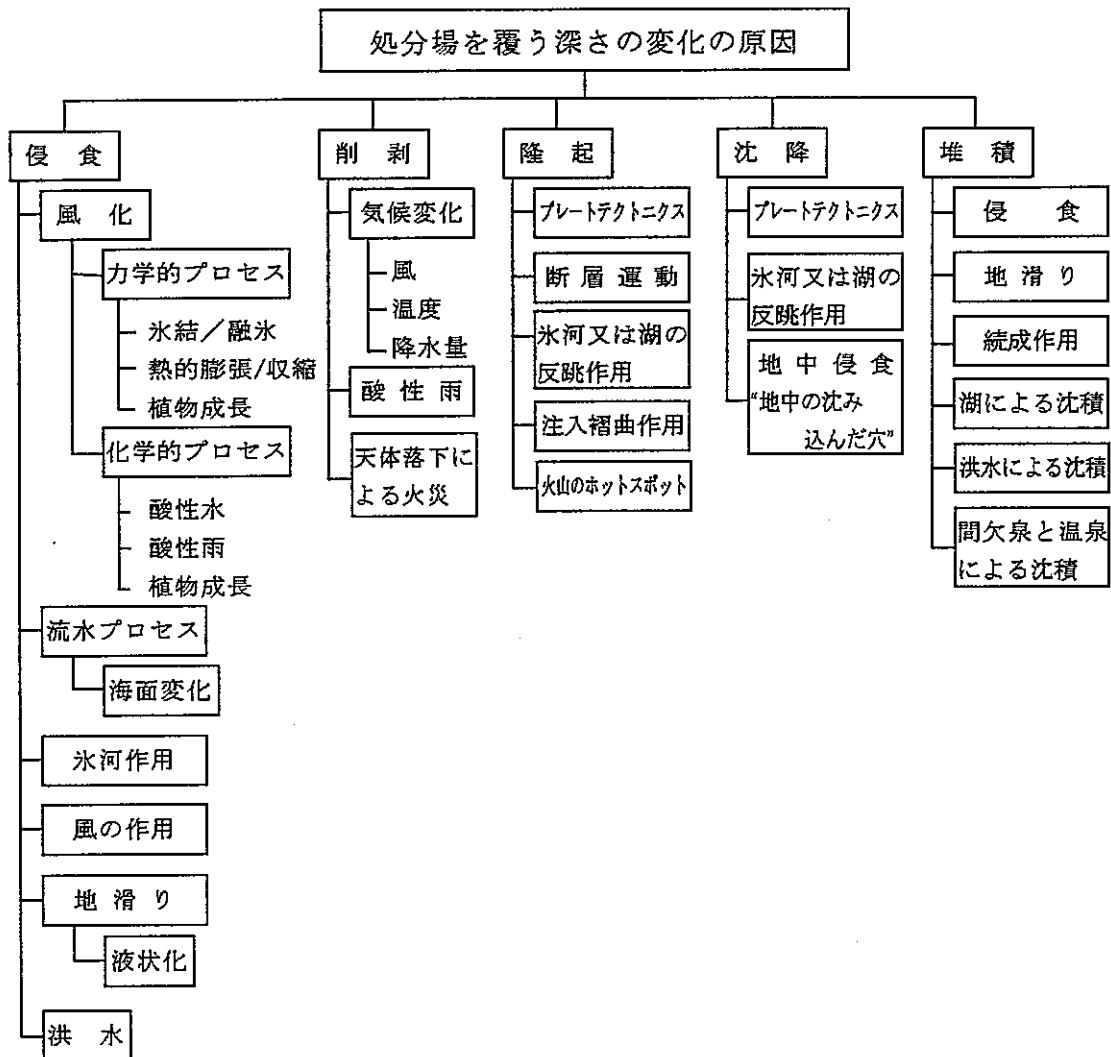


図2 処分場を覆う深さの変化の原因

4.2 隆起・侵食シナリオの候補

処分場性能評価では、処分場が断層の近くや隆起率の高い地域にはないものと仮定し、ここでは、平均隆起率の上限値1 mm/年を解析用の隆起率として用いる。断層運動の隆起率については5 mm/年が用いられている。また、処分場性能評価では、処分場が侵食率の高い地域にはないものと仮定し、ここでは、平均隆起率の半分、0.5 mm/年を解析用の侵食率として用いる。

隆起・侵食が地層処分場に影響を与えるシナリオについて、それらが、処分場性能に与える影響を決定し、処分場から生態圏への放射性物質の放出をもたらす隆起・侵食シナリオを定義するため、定性的な評価を行う。

侵食、削剥、隆起・沈降の定性的評価結果を表2にまとめた。

表2 隆起・侵食シナリオの定性的評価のまとめ

(1)侵食（隆起は伴わない）

シナリオ	定性的発生可能性	定性的影響
流水侵食による部分的剥ぎ取り	これから500万年間に生ずるとは考えにくい。侵食率は、小さな動水勾配の地域で、低い。地下500mにある処分場の露出には約500万年を要する。	<ul style="list-style-type: none"> ● 地下水流量が増加する。 ● 隆起シナリオを伴う侵食の影響以下。
流水侵食による露出	これから1000万年間に生ずるとは考えにくい。侵食率は、小さな動水勾配の地域で、低い。地下1000mにある処分場の露出には、約1000万年を要する。	<ul style="list-style-type: none"> ● 廃棄物キャニスターが生態圏に露出する。 ● 隆起シナリオを伴う侵食の影響以下。 ● 1000万年後の放射能は、元の量のわずか$5 \times 10^{-6}\%$。
海水準変化による動水勾配の増減	地球上のどこかの地域では、氷河周期のために、あり得る。	<ul style="list-style-type: none"> ● 氷河が発達すると海水準は低下し、氷河が後退すると海水準は上昇する。 ● 侵食率に影響。 ● 隆起シナリオに伴う侵食の影響以下。
氷河侵食による部分的剥ぎ取り	これから500万年間に生ずるとは考えにくい。日本では氷河期の氷の存在を示す証拠がほとんどない。寒冷化に向けての重大な気候変化又は地殻運動によって、発生可能性が高まる。	<ul style="list-style-type: none"> ● 地下水流量が増加する。
氷河侵食による露出	これから1000万年間に生ずるとは考えにくい。日本では氷河期の氷の存在を示す証拠がほとんどない。寒冷化に向けての重大な気候変化又は地殻運動によって、発生可能性が高まる。	<ul style="list-style-type: none"> ● 廃棄物キャニスターが生態圏に露出する。

シナリオ	定性的発生可能性	定性的影響
風食による部分的剥ぎ取り	これから500万年間に生ずるとは考えにくい。硬岩の風化は、氷や熱力によるものほどではない。風が物質を効率よく運ぶためにはその前に硬岩をもろくしていなければならない。	<ul style="list-style-type: none"> ● 地下水流量が増加する。 ● 隆起シナリオを伴う侵食の影響以下。
風食による露出	これから1000万年間に生ずるとは考えにくい。硬岩の風化は、氷や熱力によるものほどではない。風が物質を効率よく運ぶためにはその前に硬岩をもろくしていなければならない。	<ul style="list-style-type: none"> ● 廃棄物キャニスターが生態圏に露出する。 ● 隆起シナリオを伴う侵食の影響以下。
地滑り	地滑りは日本では頻繁に生ずるが、隆起を伴わない地滑りはあまりない。	<ul style="list-style-type: none"> ● もし地滑りが処分場の上方で始まるならば、処分場の深度は減少するが、もし地滑りが処分場の上方で終わるならば、処分場の深度は増加する。
洪水	これから500万年間に生ずるとは考えにくい。隆起のために動水勾配が増えることがなければ、侵食率は小さい。	<ul style="list-style-type: none"> ● 低地では、洪水の堆積への寄与は大きい。高地から生ずる洪水は、地表を大きく侵食する力をもつ。 ● 隆起シナリオを伴う侵食の影響以下。

(2)削剥

シナリオ	定性的発生可能性	定性的影響
削剥による部分的剥ぎ取り	発生するとは考えにくい。後に侵食を伴うに違いない。気候変化は植物の生息面積を増減し得る。酸性雨は植物の生息量を低減し、また、天体落下による火災により、その直後には植物の生息量は低減化するが、時間の経過とともに植物の成長を高めることになるかもしれない。	<ul style="list-style-type: none">● 削剥の結果、侵食率が増加する。植物の繁殖密度が低下するにつれて、侵食率が増加する。● 岩での植物の成長は、風化プロセスを助成し得る。● 侵食及び隆起シナリオを伴う侵食の影響以下。
削剥による露出	発生するとは考えにくい。後に侵食を伴うに違いない。気候変化は植物の生息面積を増減し得る。酸性雨は植物の生息量を低減し、また、天体落下による火災により、その直後には植物の生息量は低減化するが、時間の経過とともに植物の成長を高めることになるかもしれない。	<ul style="list-style-type: none">● 削剥の結果、侵食率が増加する。植物の繁殖密度が低下するにつれて、侵食率が増加する。● 岩での植物の成長は、風化プロセスを助成し得る。● 侵食及び隆起シナリオを伴う侵食の影響以下。

(3)隆起

シナリオ	定性的発生可能性	定性的影響
5～10mの隆起の伴う断層運動	これから2000年以内に生じ得るが、性能評価の結果がリスクを受容し得るものでないのならば、処分場を意図的に断層上に立地することはしない。断層運動による変位速度が5mm/年ならば、サイトは1000～2000年後には5～10m隆起し得る。	<ul style="list-style-type: none">● キャニスターに亀裂が生じ、地下水への放出可能性が生ずる。● 影響は、人間侵入の水摂取シナリオに類似。

シナリオ	定性的発生可能性	定 性 的 影 響
地殻変動による 500m の隆起	発生可能性はあるが、平均隆起率が 1 mm/年ならば、50 万年を要する。	<ul style="list-style-type: none"> ● 侵食を伴わなければ、処分場は被覆されたままである。
地殻変動による 1000m の隆起	発生可能性はあるが、平均隆起率が 1 mm/年ならば、100 万年を要する。	<ul style="list-style-type: none"> ● 侵食を伴わなければ、処分場は被覆されたままである。
氷河の反跳減少による隆起	これから 1000 万年間に生ずるとは考えにくい。日本では氷河期の氷の存在を示す証拠がほとんどない。寒冷化に向けての重大な気候変化又は地殻運動によって、発生可能性が高まる。	<ul style="list-style-type: none"> ● 反跳現象により氷河ができる以前の水準まで標高が回復。 ● 氷河の反跳現象により、もし周囲の土地が沈下していたとしたら、動水勾配と侵食率が増加し得る。
湖水の消滅時の反跳現象による隆起	天然のダムの崩壊によって生じ得る事象。	<ul style="list-style-type: none"> ● 反跳現象により、湖ができる以前の水準まで標高が回復。 ● 湖の乾燥化による反跳現象により、もし周囲の土地が沈下していたとしたら、動水勾配と侵食率が増加し得る。 ● 隆起シナリオを伴う侵食の影響以下。
海水準低下による動水勾配の増加	これから 2 万年以内に、地球上のどこかの地域で生じ得る。	<ul style="list-style-type: none"> ● 氷河が発達すると海水準は低下し、氷河が後退すると海水準は上昇する。 ● 侵食率に影響。 ● 隆起シナリオに伴う侵食の影響以下。

(4)沈降

シナリオ	定性的発生可能性	定性的影響
氷河の圧縮による沈降	これから 1000 万年間に生ずるとは考えにくい。日本では氷河期の氷の存在を示す証拠がほとんどない。寒冷化に向けての重大な気候変化又は地殻運動によって、発生可能性が高まる。	<ul style="list-style-type: none">● 沈降が処分場の上方か近隣で生じ得る。● もしキャニスター周囲にある物質の可塑的変形によって応力が吸収されなければ、廃棄物キャニスターに亀裂が生じ得る。
湖の圧縮による沈降	天然のダムをつくり出す地滑りによって生じ得る事象。	<ul style="list-style-type: none">● 沈降が処分場の上方か近隣で生じ得る。● 堆積率が増加し、処分場深度が加算される。
地殻プレート境界での沈降	日本列島では沈降は非常にあり得るが、性能評価では沈降のあるサイトを除外すべきである。日本の沈降地域では 50 万年で 500m 低下し得る。	<ul style="list-style-type: none">● 処分場は、海面下に沈み込み得る。● もし処分場が海面下に沈み込まなければ、動水勾配の増加のために侵食率は増加し得る。

(5)堆積

シナリオ	定性的発生可能性	定性的影響
低地での洪水	非常によく起き得る事象。	<ul style="list-style-type: none">● 堆積は処分場深度を増加させ、廃棄物を生態圏からさらに隔離する。
海水準の上昇による動水勾配の低下	地球上のどこかの地域では、氷河の影響で生じ得る。	<ul style="list-style-type: none">● 氷河が発達すると海水準は低下し、氷河が後退すると海水準は上昇する。● 侵食率の低下。● 隆起シナリオに伴う侵食の影響以下。

シナリオ	定性的発生可能性	定性的影響
地滑りによる処分場の上への物質の堆積	発生可能性はあるが、もし、性能評価で地滑りの影響を受け易い地域を対象としなければ、発生可能性が低減される。	<ul style="list-style-type: none"> 堆積は処分場深度を増加させ、廃棄物を生態圏からさらに隔離する。

(6)隆起及び侵食

シナリオ	定性的発生可能性	定性的影響
侵食を伴う 500m の断層隆起による部分的剥ぎ取り	発生可能である。断層運動による隆起率が 5 mm/年の場合、隆起に 10 万年を要する。引き続き侵食には約 100 万年かかる(侵食率 0.5 mm/年)。	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流量が増加する。 人間侵入の水摂取シナリオ(3章)の影響以下。
侵食を伴う 1000m の断層隆起による露出	発生可能である。断層運動による隆起率が 5 mm/年の場合、隆起に 20 万年を要する。引き続き侵食には約 200 万年かかる(侵食率 0.5 mm/年)。	<ul style="list-style-type: none"> 処分場が地表に出て、HLW キャニスターが露出する。 水摂取による被曝線量は、3章の水摂取シナリオの線量と類似したもの。

4.3 シナリオ解析

前節では、広範に亘る候補シナリオについて定性的な評価を行い、より詳細な評価を行うシナリオとして、侵食を伴う 1000m の断層隆起による処分場の露出、を選定した。本節では、シナリオの発生可能性と影響の定量的評価を行った。

隆起率を 5 mm/年とすると、1000m 隆起するのに 20 万年を要する。侵食率を 0.5 mm/年とすると、1000m の地下を侵食するのに 200 万年を要する。陸地が隆起している間に侵食が生ずるものと想定すると、処分場の露出は約 200 万年後に発生する。

20 万年以内に処分場直下で隆起が生ずる可能性は、前年度⁽¹⁾の第 3、4 章の解析データを用いると、 8×10^{-5} ($4 \times 10^{-10}/\text{年} \times 2 \times 10^5 \text{年}$) となる。

放射性キャニスターが生態圏に露出する影響を評価するには、3つの被曝経路の放射線量が評価対象となる。露出したサイトから流出した降水を人々が飲料水として摂取するシナリオについて、食物摂取線量が計算された。処分場の 10,000 m²の土地で建設が行われるシナリオについて、吸入線量が計算された。また、処分場の地域に人々が居住するとの想定のもとに外部被曝線量が計算された。これらの評価結果を表 3 に示す。

表 3 HLW 処分場の露出の放射線学的影響

被曝経路	個人預託線量 [Sv]	個人癌死確率* [-]	被曝人口 [人]	集団線量 [マン・Sv]	被曝人口当り癌死者数* [人]
食物摂取	5.6×10^{-2}	2.8×10^{-3}	1.4×10^6	7.8×10^4	3.9×10^3
吸入	5.9×10^{-6}	3.0×10^{-7}	414,672	2.46	0.1
外部	8.6×10^{-21}	4.3×10^{-22}	1,760	1.5×10^{-17}	7.5×10^{-19}

* ICRP の健康影響への換算係数である 5×10^{-2} 死/Sv を適用⁽⁶⁾。

5. 気候変動シナリオ

ここでは、背景的情報(5.1節)、広範囲に亘る気候変動事象の候補に関する定性的評価(5.2節)、及び定性的評価の考察をさらに進展させるために選定した事象の発生可能性と影響に関する定量的評価(5.3節)について述べる。

5.1 背景

気候変動には多くの潜在的な原因が存在する。気候に影響を与える主要な現象のいくつかを図3に示す。これらの変化は、自然的又は人間活動の帰結と考えられる。氷河は日本に直接影響しなかったとしても、実質的には海水準が低下し、従って、陸地面積がかなり増加した。2万年前の海水準は現在よりも80 m～140 m低かった⁽⁴⁾⁽⁷⁾。

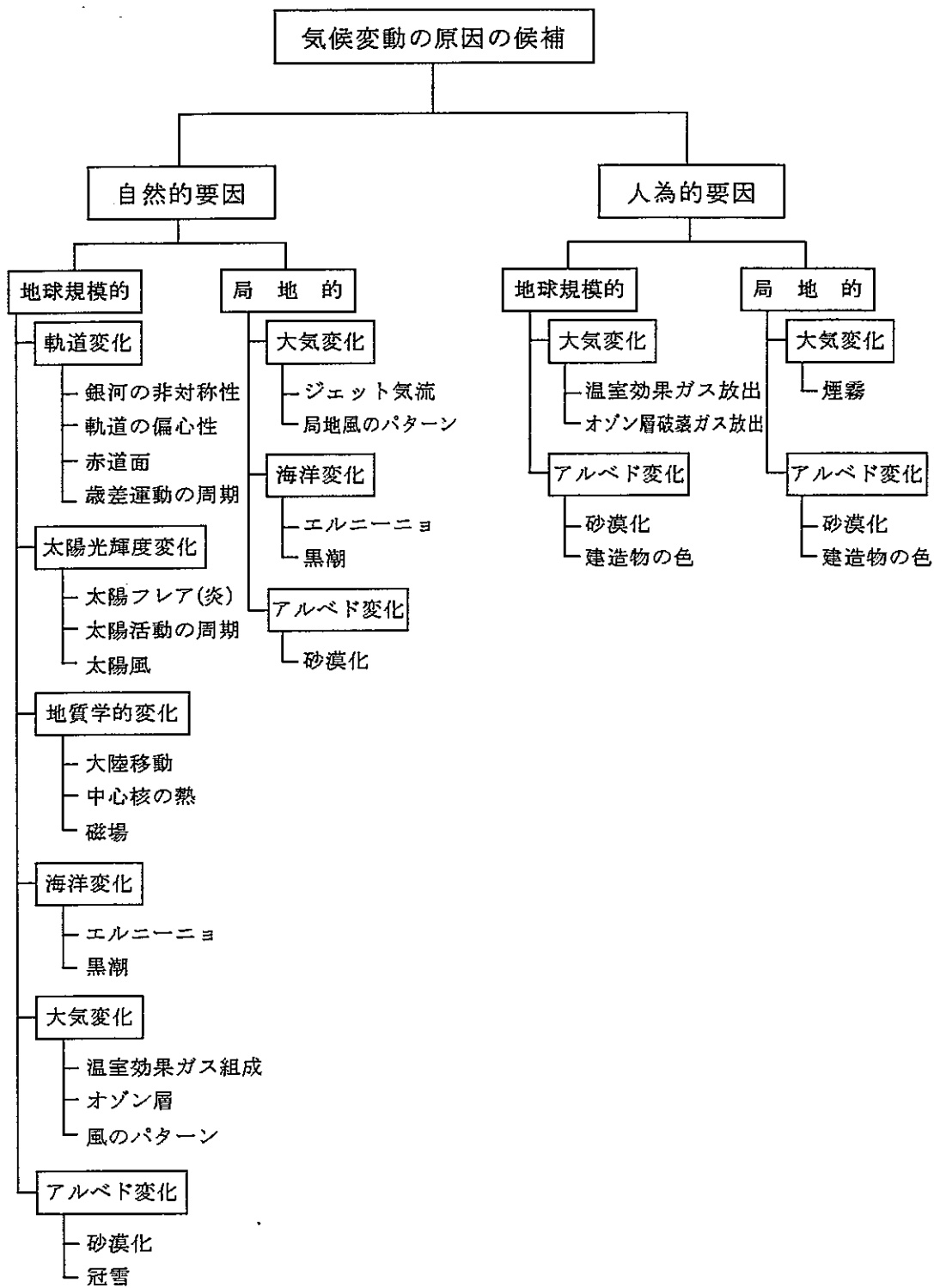


図3 気候変動の原因の候補

5.2 候補となる気候変動シナリオ

湿度、風、大気圧は、地下 1000m の HLW に影響を与えない地表の現象である。そのような状況は詳細な検討対象から除かれる。しかし、温度と降水量は、海水準変化、水の浸入、氷河作用により、処分場の性能に影響を与える可能性がある。

図 4 に示すように、温度と降水量の変化によって、海水準が上昇／低下し、処分場への水の侵入が増減する。

表 4 に、気候変動の候補要因が温度と降水量に与える潜在的影響をまとめた。

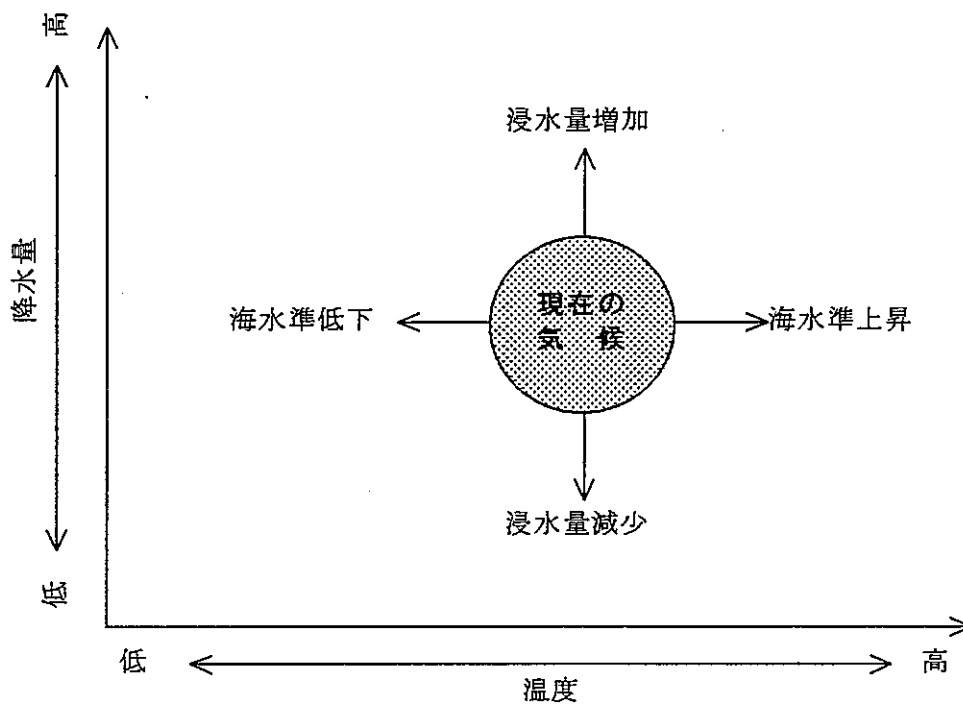


図 4 気候変動の影響

表4 気候変動シナリオの定性的評価のまとめ

シナリオ	時 期	影 響
軌道変化	<ul style="list-style-type: none"> ● 銀河の非対称性 = 3 億年周期 ● 軌道の遍心性 = 93,400 年周期 ● 赤道平面の移動 = 41,000 年周期 ● 歳差運動 = 25,920 年周期 	<p>一般に、ここにあげた3つの現象の結果として、次の10万年間に亘り、寒冷化と地下水量の増加が徐々に進行すると予想される。温度変化は、-5℃と考えられる。</p>
日射量変化	<ul style="list-style-type: none"> ● 太陽フレア = 11 年周期 ● 太陽活動 = 11 年周期(潜在的には、長期的変動性もある) ● 太陽風変動 = 11 年周期 	<p>11年周期の変動は、気候に対して、微小で、短期的な影響しか与えない。日射量の長期的変動では、±5℃の変化を生じ得る。各サイクルでの太陽活動レベルの変化は、処分場寿命期間中の温度と降水量の増減をもたらす。</p>
地質学的変化	<ul style="list-style-type: none"> ● 大陸移動 = 数100万年オーダー 	<p>次の1万年間の温度又は降水量には影響がない。数100万年間に亘る影響は劇的なものとなり得る。</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ● 地球の中心核の加熱 = 安定的 	<p>処分場寿命期間中の温度又は降水量への影響はない。</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ● 磁場 <ul style="list-style-type: none"> — 極の反転 = 1 億年間に170回 — 永続的変動 = 960年周期 — 年間的変動 = 1年 	<p>電離層に変化が生ずるが、影響は温度又は降水量に限られる。</p>

シナリオ	時期	影響
海洋変化	<ul style="list-style-type: none"> • ENSO = 3年～7年周期 	<p>温度上昇は1℃～6℃、また、局地的な降水量変化は、±30%である。これらの変化は短期的なもの(1年～1.5年)であり、長期的気候には影響を与えない。</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • 黒潮 	<p>日本の気候は海流に強く依存し、海流変化によって局地的な温度や降水量が増減し得る。この海流変化からは地球規模的影響は予想されず、従って、海水準への影響はないと考えられる。</p>
大気変化	<ul style="list-style-type: none"> • 温室効果ガス組成の変化 <ul style="list-style-type: none"> － 自然的要因 = 継続的 － 人為的要因 = 数世紀オーダー 	<p>自然現象による変化は、温度と降水量の増減をもたらす。人間活動によって放出される温室効果ガスの増加は、西暦2100年までに、大気温度を1℃～3.5℃上昇させると予測される。</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • オゾン枯渇化 <ul style="list-style-type: none"> － 自然的要因 = 継続的 － 人為的要因 = 数世紀オーダー 	<p>地表へのUVB照射量は増加し得るが、これは、気候もしくはHLW処分場には影響を与えない。</p>
	<ul style="list-style-type: none"> • 煙霧 	<p>アルベドと温度に局地的な影響を与えるが、局地的な煙霧から地球規模的影響は生じない。</p>
アルベド変化	<ul style="list-style-type: none"> • 砂漠化 • 人間の建造物による反射性 • 冠雪 	<p>気候変動として、温度と降水量の増減が含まれる。</p>

5.3 シナリオ解析

前節（5.2 節）では、広範囲に亘る候補事象について定性的評価を行い、さらに詳細な評価を行うシナリオとして、海水準上昇、海水準低下、浸水量増加、浸水量減少の4つを選定した。ここでは、4つのシナリオそれぞれの影響を検討した。

5.3.1 海水準低下シナリオ

長期的な地球規模の寒冷化の結果の一つに海水準低下がある。次の1万年以内に温度が3℃低下する可能性—これは、かなりの海水準低下を引き起こすために必要なおよその変化であるが—は、1%よりずっと小さい⁽⁹⁾。10万年以内では、3℃の温度低下は予期し得る。海水準の低下は、海水から処分場をさらに遠避けることになる。海水準低下によって処分場にもたらされる直接的な影響はないと考えられる。

5.3.2 海水準上昇シナリオ

長期的な地球規模の温暖化の結果の一つに海水準上昇がある。今後300年間で温度が3℃上昇する確率は少なくとも30%ある⁽⁹⁾。しかし、この大きさの温度上昇では、海水準上昇は10m未満であり、HLW処分場への影響はないだろう。上昇した海水が浸入する恐れのある高さにHLW処分場を立地するというのはあまりもってもらしくないが、一般公衆の関心を考慮して、とにかく本シナリオの潜在的影響を検討した。

HLW処分場への海水浸入の複合的な影響の結果は以下の通りである。

- ・ 処分場システムの性能に生じ得るいかなる変化の影響も、オーバーパックがこわれる1000年後もしくはそれ以上の期間の経過後に発生し得る。
- ・ もし海水が浸入していれば、HLW近傍から生ずる水を消費することは考えにくい。従って、HLWの影響は、海水浸入とともに、低下するだろう。
- ・ 海水浸入後にHLW処分場近傍からの水が消費されるという不慮の状況では、非常にわずかの線量低下（5%）が最初の1000万年間に予測され、線量が2倍になるのは、処分後1000万年～1億年経過してからである。海水浸入後にHLWパッケージから10m下流にある線源から全量の水を消費した人の被曝線量は、処分してから100万年後に約 3×10^{-8} mSv/年、1000万

年後に 3×10^{-5} mSv/年、4000 万年後に 8×10^{-3} mSv/年である⁽⁴⁾。

5.3.3 浸水量増加シナリオ

降水量増加の一つの結果として、HLW 処分場への浸水量増加の可能性はある。ここでは、浸水量をかなり増加させるには降水量が少なくとも 50% 増加（その結果、浸水量は 2 桁増加）するものと想定する。米国のユッカマウンテン処分場候補地において降水量が 1 万年内で 50% 増加する確率は 20% である⁽⁹⁾。日本の現在の気候はもっと湿潤であるから、この確率は保守的な推定値と考えられる。

浸水量増加の複合的な影響の結果は以下の通りである。

- ・ 処分場システムの性能に生じ得るいかなる変化の影響も、オーバーパックがこわれる 1000 年後もしくはそれ以上の期間の経過後に発生し得る。
- ・ HLW 近傍からの水を消費する個人の最大被曝線量は、存在する水量と反比例の関係にある。従って、浸入水増加に対応する最大被曝線量は低下する。
- ・ 広範囲の水の流速に対して、放射性核種の全放出量は固定されているので、集団線量は潜在的に不変となり得る。しかし、集団線量を同じにするには、増加した水量に呼応してもっと多くの人口が同じように増加した水全部を使用しなければならない。もし増加した全水量が同じように使用されなければ、集団線量も低下するだろう。

5.3.4 浸水量減少シナリオ

降水量減少の一つの結果として、HLW 処分場への浸水量減少の可能性はある。米国のユッカマウンテン処分場候補地において降水量が今後 1 万年間で 25% 減少する確率は 5% 未満である⁽⁹⁾。日本では、現在の気候が湿潤なため、降水量が 25% 減少する確率は、少なくとも 5% と考えられる。

浸水量減少の複合的影響の結果は以下の通りである。

- ・ 処分場システムの性能に生じ得るいかなる変化の影響も、オーバーパックがこわれる 1000 年後もしくはそれ以上の期間の経過後に発生し得る。浸水量の極端な減少は、オーバーパックのこわれる時期を遅延化し得る。
- ・ HLW 近傍からの水を消費する個人の最大被曝線量は、存在する水量と反比例の関係にある。従って、浸水量の減少に対応する最大被曝線量は増加する。

- ・ 放射性核種の全放出量は同じであるため、集団線量は不変となり得る。

5.4 気候変動の複合的影響の結果

図5は、将来世代の人々が放射性物質で汚染された水を飲んだ場合に、これらの各シナリオに対して生じ得る影響の範囲を（文献(4)に基づいて）概観したものである。

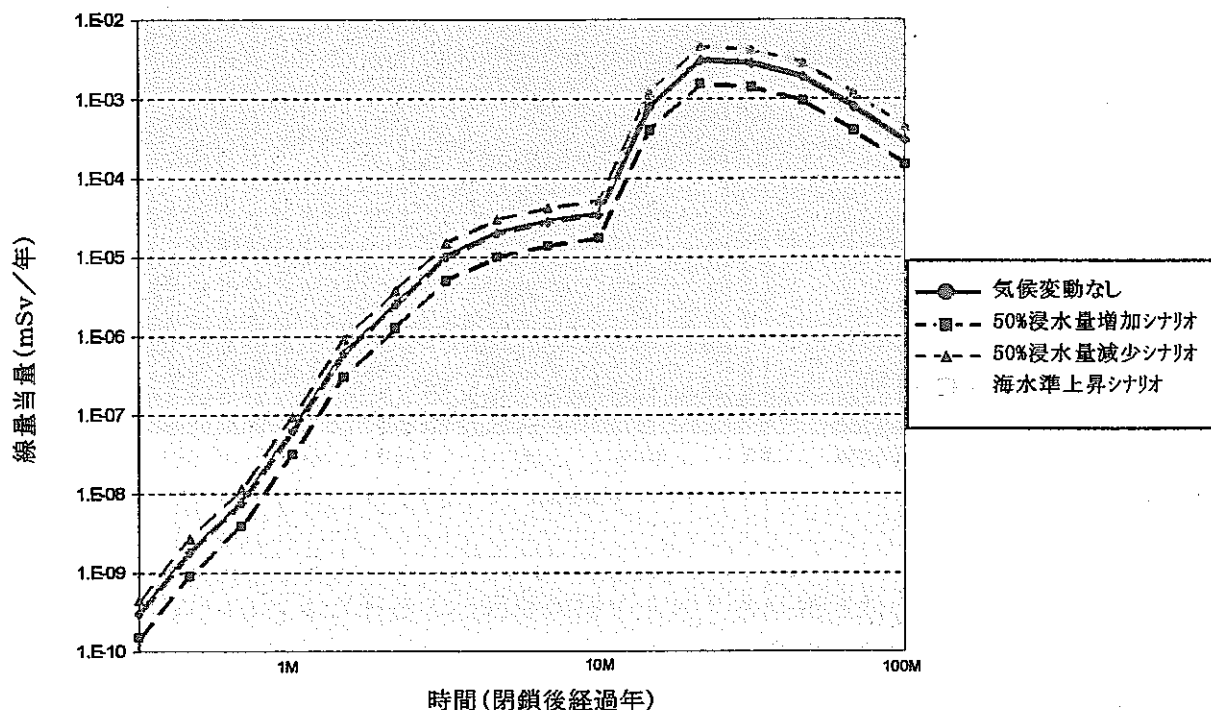


図5 気候変動シナリオによる線量の経時変化

このグラフの結果より、気候変動の複合的な影響は、線量の比較的小さな増減しか与えないことがわかる。

6. 評価結果の解釈

本調査研究で検討した事故の場合、放射能に起因する癌で死亡する追加のリスクは、放射能と無関係な癌死確率 0.2 に比べれば極めて小さい（図 6 参照）。

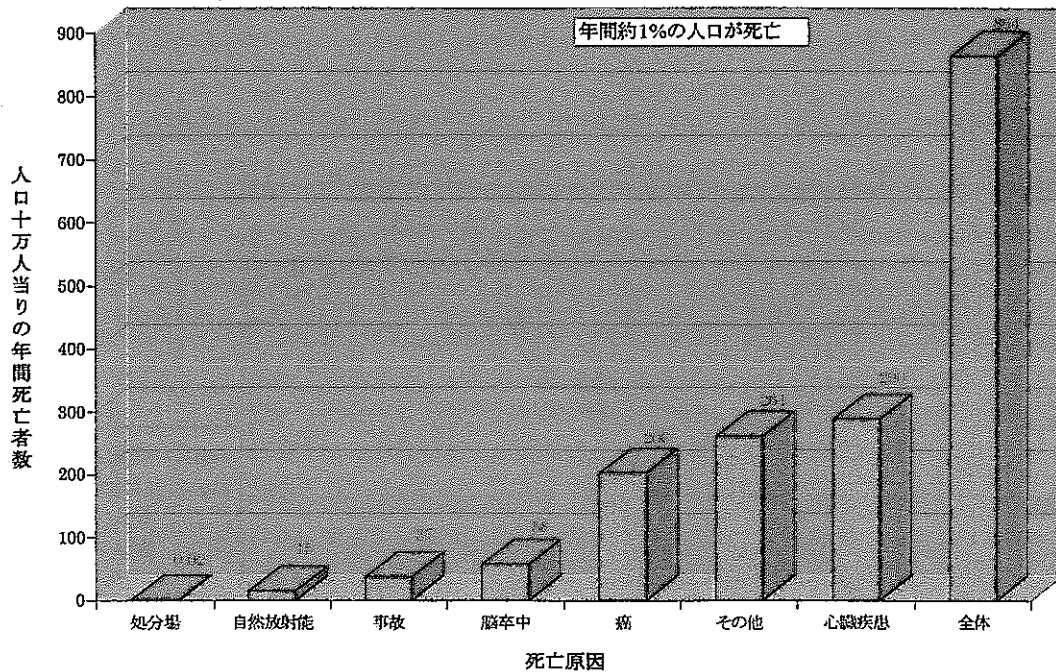


図 6 処分場の放射線学的リスクと他の原因による死亡リスクとの比較

6.1 ほとんど起こり得ない事象及び長期的環境プロセスによるリスク

前年度の分析結果⁽¹⁾及び第 3、4、5 章で紹介した HLW 地層処分場に対する人間侵入、隆起・侵食、気候変動の影響に関する分析結果に基づき、日本におけるほとんど起こり得ない事象又は長期的環境プロセスの各シナリオによる 10 万人当りの期待死亡者数をその他の事故で報告された事故死の数と比較した（表 5 参照）。

表5 日本におけるほとんど起こり得ない事象、長期的環境プロセス及び他の事故による期待死亡率

事象又はプロセス	非放射線学的影響による10万人当りの期待死亡率	放射線学的影響による10万人当りの期待死亡率	日本で事故により死亡する可能性の最も高い回数
隆起・侵食－食物摂取	N/A	2.2E-04	1.2E+05
活断層	1.0E-04	3.6E-06	2.6E+05
隆起・侵食－吸入	N/A	1.9E-06	1.4E+07
人間侵入－杭柱掘削活動	6.9E-10	3.8E-07	7.1E+07
天体衝突	7.5E-09	8.9E-12	3.6E+09
人間侵入－採鉱	1.3E-09	5.1E-10	1.5E+10
火山噴火	4.1E-10	1.8E-11	6.3E+10
気候変動－浸水量減少	N/A	6.3E-11	4.3E+11
気候変動－海水準上昇	N/A	6.0E-11	4.5E+11
気候変動－浸水量増加	N/A	2.5E-14	1.1E+15
隆起・侵食－外部被曝	N/A	3.4E-23	7.9E+23
気候変動－海水準低下	N/A	死者は発生し得ない	死者は発生し得ない
その他事故	27	ほぼ0	－

表の最後の欄は、日本人が、本調査研究で検討したほとんど起こり得ない事象又は長期的環境プロセスで死亡する率よりも「普通の」事故で死亡する率がかなり多いことを示している。

本分析は保守的なものとする（もしくはリスクを過大評価する）ことを意図したものであるが、ほとんど起こり得ない事象の発生可能性又は長期的環境プロセスの発生確率とその影響の双方について大きな不確実性があることは確かである。しかし、結果の規模を2～3桁過小評価していたとしても、本調査研究で検討した平常状態の処分場、ほとんど起こり得ない事象及び長期的環境プロセスによるリスクは、日本における日常の事故によるリスクに比べれば無視できるものと言える。

6.2 評価結果のスライド化

以上の極限安全シナリオの評価結果（事故シナリオ、シナリオ発生可能性及び影響、リスク比較）を一般公衆にも理解しやすい形態で表示する工夫を行うため、コンピュータ・グラフィクス・プレゼンテーション・プログラム Microsoft PowerPoint を用いてスライド資料を作成した。

リスク等の可視化方法の妥当性を検討するため、本年度は、前年度に解析・評価されている火山活動シナリオを一例に作成した（本編の付録 E 参照）。作成項目は以下の通りである。

- ① 日本のエネルギー源
- ② 地層処分の概念
- ③ 地層処分の安全性
- ④ 稀頻度事象の評価方法
- ⑤ 発生可能性、影響及びリスク
- ⑥ 火山活動シナリオの例
- ⑦ リスク比較
- ⑧ 原子力発電の便益
- ⑨ 一般公衆への反応

あ と が き

我が国における高レベル放射性廃棄物（HLW）処分における極限安全シナリオとして人間侵入、隆起・侵食、気候変動を発端事象とする事故シナリオ（直接放出シナリオ）を検討・評価した。

その結果、これらの直接放出シナリオによるリスクは、日本における日常の事故によるリスクに比べれば無視し得るレベルにあることが提示された。

また、リスク解析結果をよりリアルに表示するため、前年度に検討・評価した火山活動シナリオを一例とするスライド形式の資料作成を提示した。

今後の課題としては、

- ① リスク解析の詳細化（詳細モデル、感度分析、他のリスクの評価と比較など）への展開
- ② 一般公衆の理解向上化方法の検討（他の直接放出シナリオのスライド表示、動的表現への展開など）

が指摘される。

参 考 文 献

- (1) ㈱三菱総合研究所：「地層処分の極限安全性に関する研究」PNC 研究委託内容報告書 PNC ZJ1222 97-005 (1997).
- (2) ㈱三菱総合研究所：「我が国における地層処分性能評価シナリオ作成に関する研究(Ⅲ)」PNC 委託研究成果報告書、PNC ZJ1222 91-002 (1991) .
- (3) ㈱三菱総合研究所：「我が国における地層処分性能評価シナリオ作成に関する研究(Ⅳ)－人的行為シナリオの確率論的評価－」PNC ZJ1222 92-001 (1992) .
- (4) PNC: 「Research and Development of Geological Disposal of High Level Radioactive Waste, First Progress Report」PNC TN1410 93-059 September (1992) .
- (5) D. Wenzel: 「The Radiological Safety Analysis Computer Program」WINCO-1123 February (1994) .
- (6) ICRP : 「1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection」 Publication 60, Annals of the ICRP, Volume 21, No.1-3, Pergamon Press, Oxford, England(1991).
- (7) SKB: 「Template for Safety Reports with Descriptive Example」Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden, SKB Technical Report No. 96-05, December (1995).
- (8) C. A. Negin and G. Worku : 「MicroShield Version 4 User's Manual」Grove Engineering, Inc., Grove 92-2, Rockville, MD, May 1(1992).
- (9) CNWRA: 「Expert Elicitation of Future Climate in the Yucca Mountain Vicinity」CNWRA 93-016, Center of Nuclear Waste Regulatory Analyses, August(1993).

Research Study for Extremely Unlikely Scenario
of High Level Waste Disposal : Part(II)

(Summary)

(REPORT ON RESULT OF PNC-COMMISSIONED RESEARCH)

February, 1998

Mitsubishi Research Institute, Inc.

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Please contact about this paper as follows below:

Technical Evaluation and Patent Office, Technology Management

Division, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

9-13, 1-chome, Akasaka , Minato-ku, Tokyo 107-8445, Japan

Research Study for Extremely Unlikely Scenario of High level Waste Disposal : Part(II)

Hiroo Ohkubo*

Abstract

In this research, each event and process relevant to the key works(or scenario initiator) such as human intrusion, uplift/erosion and climatic change have been identified and the catastrophic scenario, which inspires ordinary people to have tremendous concern, has been analyzed.

Based upon the characteristic events and processes of each scenario considered in the above and through the research of existing model of such risk, quantitative concept (release amount magnitude, release mode, release form, frequency of release, probability etc.) and impact on repository system, facility and environment have been analyzed, defended and defined. Model which can assess and analyze such impact has been built. Using these models, risks directly or indirectly caused by HLW repository have been calculated.

The risk calculated by the model developed in the above has been visualized and presented by comparing with other risks.

This report is the result of research conducted by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

Contract No.:090D0163

Department, section, and the name of staff in charge:

Hiroyuki Umeki, Isolation System Research Program, Radioactive Waste Management Project, Environmental Technology Development Division

* Energy and Natural Resources Dept., Research Center for Environment and Development.

地層処分の極限安全性 に関する研究（Ⅱ）

大久保博生*

要 旨

本研究では、まず、人間侵入、隆起・侵食、気候変動といったキーワード（あるいは発端事象）に関連する各事象やプロセスを定義し、一般公衆に恐怖感を与えるようなカタストロフィックなシナリオを検討した。

次に、このようなシナリオのカタストロフィックな事象やプロセスの特徴をもとに、既往のモデル化概念の事例調査等を通じ、定量化概念（放出量、規模、放出モード（複合発生性）、放出形態、放出頻度、確率など）と処分場システム（周囲の環境状態も含む）の検討を行い、処分場並びにその周辺に与えるインパクトを評価・解析し得るモデルを実際に作成し、地層処分がもたらすリスクを算出し、そのようなシナリオが生じた場合に同時に発生する可能性がある地層処分以外のリスクとの対比が可能となることを考えた。

最後に、ここで作成したモデルを用いて算出したリスクを可視化して他のリスクと比較できるような検討を行った。

本報告書は、株式会社三菱総合研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究内容結果である。

契約番号：090D0163

事業団担当部課及び担当者：環境技術開発推進本部 処分研究グループ

梅木 博之 殿

*地球環境研究センター エネルギー・資源研究部

TABLE OF CONTENTS

Foreword	1
1. Introduction	3
2. Methodology	4
2.1 Radiological Consequences	4
2.2 Non-Radiological Consequences	5
2.3 Assessment of Likelihoods	5
2.4 Assessment of Probabilities	6
2.5 Uncertainties	6
3. Human Intrusion Scenario	7
3.1 Background	7
3.2 Candidate Human Intrusion Scenarios	7
3.3 Scenarios Analyzed	12
3.3.1 Post-Drilling Scenario	12
3.3.2 Mining Scenario	12
4. Uplift and Erosion Scenario	13
4.1 Background	13
4.2 Candidate Uplift and Erosion Scenarios	14
4.3 Scenarios Analyzed	21
5. Climate Change Scenario	22
5.1 Background	22
5.2 Candidate Climate Change Scenarios	24
5.3 Scenarios Analyzed	27
5.3.1 Lower Sea Level Scenario	27
5.3.2 Higher Sea Level Scenario	27

5.3.3	Increased Water Ingress Scenario	28
5.3.4	Decreased Water Ingress Scenario	28
5.4	Net Effects of Climate Change.....	29
6.	Interpretation of Results	30
6.1	Risk from Extremely Unlikely Events and Long-Term Environmental Processes	30
6.2	Creating Slide Presentation	32
	Afterword	33
	References	35

CONTENTS OF TABLES

Table 1.	Summary of Qualitative Evaluation of Human Intrusion Scenarios	9
Table 2.	Summary of Qualitative Evaluation of Uplift and Erosion Scenarios	15
Table 3.	Radiological Consequences from Uncovery of HLW Repository	21
Table 4.	Summary of Qualitative Evaluation of Climate Change Scenarios	25
Table 5.	Expected Death Rates from Extremely Unlikely Events, Long-Term Environmental Processes and from Other Accidents in Japan.....	31

CONTENTS OF FIGURES

Figure 1. Overview of Candidate Human Intrusion Events Considered	8
Figure 2. Candidate Causes for Changes in Depth of Repository Cover.....	13
Figure 3. Candidate Causes of Climate Change	23
Figure 4. Effects of Climate Change	24
Figure 5. Doses over Time from Climate Change Scenarios	29
Figure 6. Comparison of the Repository Radiological Risk to the Risk of Death from Other Causes	30

Foreword

The safety of geological disposal of high level radioactive waste is judged by prediction of future behavior of disposal system which is simulated by performance assessment (PA) calculations and analysis. However, the structure of PA is so complicated with scenario, impact and data analysis that it is very hard to explain the contents of PA results to the public. Generally, potential risk to the public caused by geological disposal is illustrated by selected scenario analysis. People, including experts in non-nuclear field tend to imagine an extremely unlikely scenarios which experts in the field of high level waste PA exclude from their analysis. If PA experts for HLW disposal actually evaluate such very extreme case, there is a possibility that the results of the analysis may mislead the public. This might cause the public unnecessary concern. But as research work discussed since last year, making an actual analysis of extreme scenario case would help us understand the meaning of such scenario analysis itself and gain an understanding of the impact of the risk. Comparing the risk of such extreme cases with other risk caused by non-nuclear activities has the potential to close the gap between experts and public.

Through these efforts, this research aims to contribute to the safety assessment of Japan's HLW disposal.

1. Introduction

Of interest to this study since last year⁽¹⁾ is the extremely unlikely single event that could theoretically destroy a repository configuration in the foreseeable future. Possible phenomena that could destroy a repository configuration include either a volcano that erupts through the repository, great seismic events, or human intrusion. Either of these would be extremely unlikely given the thorough evaluations conducted during repository siting. Site selection excludes those places close to active faults, volcanic activity or human intrusive action. While extremely unlikely, it is possible that new faults could develop or that magma or human intrusion could occur at a repository. Likewise, errors in the siting of a repository could occur if active faults are not detected.

A meteorite impact of a very large mass could also disrupt a repository configuration but such meteorite strikes are extremely unlikely⁽²⁾. Repository destruction could also be postulated by intrusion of future human generations in a variety of scenarios⁽³⁾. If we reflect back on cultures of several thousand years ago, one can reasonable expect major changes in cultures, governments and populations in the next several thousand years that would allow people to lose knowledge of the repository and then disturb the site.

Other safety concerns considered in these assessments involve long-term environmental processes in addition to discrete initiating events. Climate change is considered to be a certainty over the next million years. Natural ice ages advance and retreat causing erosion and significant changes to sea levels. Tectonic plate motion in the "ring of fire" cause uplift and subsidence in regions of Japan. Likewise, erosion of land masses continues through weathering. Such processes are slow, but over the course of millions of years, the landscape can change dramatically and HLW in a geologic repository could eventually be exhumed over great periods of time by the slowly changing earth.

These extremely unlikely events and ongoing long-term environmental changes and processes are the subject of this research in which the consequences are evaluated regardless of the low likelihood or probability of occurrence.

2. Methodology

Assessment of the potential risks associated with extremely unlikely events and long-term environmental processes requires determination of the consequences of both as well as determination of the likelihood of such events or the probability of such processes. Radiological consequences are predicted for all of the scenarios and non-radiological consequences are predicted for those scenarios where the consequence can be identified. Likelihoods and probabilities are estimated from either current statistics or the earth's geological record.

2.1 Radiological Consequences

Given an event that disrupts the configuration of a geologic high level waste repository, assessment of the radiological consequences involves estimation of the source term, the transport and dispersion of the source term to potential receptors, and the biological impact on the receptors. The source term is determined by considering the total material at risk (repository or surface facility radionuclide inventory), the fraction of inventory damaged, and the fraction of the damaged inventory that is exposed to the earth's surface, released to the atmosphere, or released to a drinking water source. For a puff release to the atmosphere⁽¹⁾, this can be written in equation form as:

$$S = \text{MAR} \times \text{DR} \times \text{ARF} \times \text{LPF}$$

where :

S = Source term for puff release, airborne release from repository boundaries

MAR= Material-at-risk,

DR = Damage ratio,

ARF= Airborne release fraction, and

LPF= Leak path factor.

For a continuous release to the atmosphere⁽¹⁾, the equation becomes:

$$S = \text{MAR} \times \text{DR} \times \text{ARR} \times \text{LPF}$$

where:

S = Source term for continuous release, airborne release rate from repository boundaries

MAR= Material-at-risk,

DR = Damage ratio,

ARR= Airborne release rate, and

LPF= Leak path factor.

The RSAC computer code⁽⁵⁾ is used for assessment of radiological impacts from events involving airborne dispersion of radionuclides. For radiological exposures resulting from inhalation of radionuclides, the fraction of the airborne material that has particle sizes in the respirable range (less than about 10 microns) is considered in the analysis. Dose conversion factors and dose data from PNC⁽⁴⁾ are used to determine the consequences from drinking water contaminated with radionuclides. The MicroShield computer program⁽⁶⁾ is used to determine external dose rates.

2.2 Non-Radiological Consequences

In addition to radiological consequences, extremely unlikely events related to volcanism, great seismic events, cosmic impacts, and human intrusion also have non-radiological consequences. Estimates of the consequences of such events are based on world-wide records of similar experiences or current statistics. Non-radiological consequences for long-term environmental processes involving erosion and uplift are related to the consequences for volcanism and great seismic events and are therefore not evaluated again. For the climate change process, non-radiological consequences are not expected to include fatalities. Weather such as windstorms or rainstorms can cause fatalities but humans are quite adaptable and would take action to contend with climate changes. Because of these differences, consequence assessments are performed on a scenario-specific basis.

2.3 Assessment of Likelihoods

Because we have comparatively few experiences with extremely unlikely events, the frequency of occurrence of such events is based on interpretation of the earth's geological record. However, for the human intrusion events likelihoods are based in part on current statistics for drilling and mining. A large amount of information has been developed

relating to the frequency of occurrence of extremely unlikely events. Studies of potential geological events in Japan have been previously considered ⁽²⁾.

2.4 Assessment of Probabilities

Long-term environmental processes are not discrete events in time. Probability estimates are used to assess the chances that a long-term environmental process causes exposure of receptors in scenarios defined for erosion, uplift, and climate change. Extrapolation of past trends in environmental data is used to estimate the probabilities. Using these trends in environmental data is considered appropriate since the time periods under consideration are short compared to geological time and the area of the repository is small compared to the overall surface area of the earth. Under the time and area assumptions, the long-term environmental processes are judged to be suitable for probabilistic treatment.

2.5 Uncertainties

Uncertainties exist in the assessment of risks from extremely unlikely events and long-term environmental processes. Engineering judgment is used in combination with the earth's geological record, historical and current statistics, and a variety of analysis methods to evaluate likelihoods, probabilities, and consequences in the scenarios under study. Much of the uncertainty associated with radiological consequences relates to the amount of radioactive material released and to the socioeconomic and technological status of future societies. Additional uncertainty in radiological consequences results from radioactive material transport assumptions that depend on meteorological or hydrological conditions. Uncertainties in non-radiological consequences result from limited data for statistical analysis of effects from large volcanoes, great seismic events, cosmic impacts, future drilling technologies, and future mining technologies. Uncertainties in the likelihood estimates exist because we have comparatively few examples of extremely unlikely events from which to extrapolate to a given site. Uncertainties in the probability estimates result from determining future probabilities based on extrapolated trends in long-term environmental processes. These factors are judged to cause uncertainties of at least one order of magnitude in risk.

3. Human Intrusion Scenario

This section provides background information (Section 3.1), a qualitative assessment of a broad range of candidate human intrusion events (Section 3.2), and a quantitative assessment of the likelihood and consequences of the events selected for further consideration in the qualitative assessment (Section 3.3).

3.1 Background

The reason for disposing of high-level radioactive waste (HLW) in a geologic repository is to isolate the waste from people and their environment. A number of provisions associated with development of a HLW repository minimize the chances of human intrusion. These preventive measures are part of the defense in depth philosophy utilized in the nuclear industry and include the following:

- Siting
- Active institutional controls
- Passive institutional controls

This evaluation considers a broad range of scenarios there neither the active controls, passive controls, nor siting prevent human intrusion. From the many candidate scenarios, a few scenarios are selected for more detailed evaluation.

3.2 Candidate Human Intrusion Scenarios

Figure 1 provides an overview of the human intrusion scenarios considered in this evaluation.

From this large number of potential events, a qualitative screening process was used to identify a few of the potentially more catastrophic intrusion events for which the general public may have concerns. Table 1 provides a summary of the screening results.

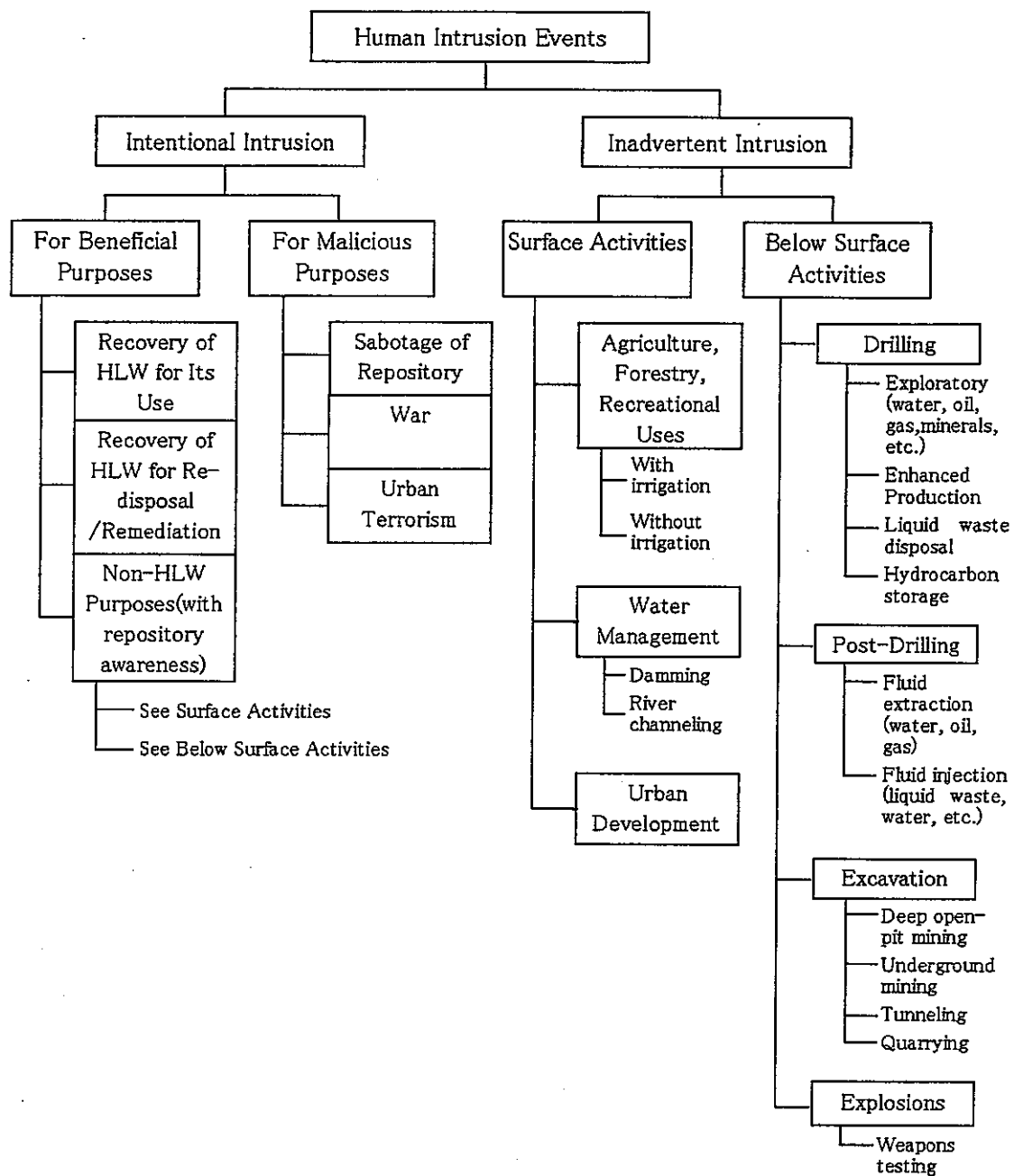


Figure 1. Overview of Candidate Human Intrusion Events Considered

Table 1. Summary of Qualitative Evaluation of Human Intrusion Scenarios

Scenario	Likelihood	Consequence	Time of Occurrence	Remarks
Accident during recovery of HLW for beneficial use of Materials	Lower than during emplacement since the likelihood of recovery is small and, if recovered, the accident rates will be similar to pre-closure surface operations.	Probably less than at time of placement due to decay of fission products.	Anytime after repository closure.	Likelihood is much lower and consequences are similar to (or less than) pre-closure accidents.
Accident during recovery of HLW for re-disposal / remediation elsewhere.	Lower than during emplacement since the likelihood of recovery is small and, if recovered, the accident rates will be similar to pre-closure surface operations.	Probably less than at time of placement due to decay of fission products.	Anytime after repository closure.	Likelihood is much lower and consequences are similar to (or less than) pre-closure accidents.
Accident during intentional intrusion for other non-HLW purposes (e.g., mining of minerals) with cognizance of the HLW repository.	Lower than during emplacement since the likelihood of recovery is small and, if recovered, the accident rates will be similar to pre-closure surface operations.	Less than for inadvertent intrusions since precautions are presumably taken since presence of HLW is known.	Anytime after repository closure.	The likely consequences of this scenario are bounded by the scenario where the intruder is unaware of the repository presence and does not take precautions.
Sabotage of repository to focus negative attention on it	Successful intrusion is very unlikely. Intrusion requires a large supply of resources (equipment & personnel), which is rare for sabotage. Detection of equipment, tailings, and explosions is expected.	Airborne dispersal would be comparable to inadvertent intrusion by excavation. Drinking water dispersal would be comparable to post-drilling inadvertent events.	After loss of active institutional controls (assumed to be at least 100 years after repository closure).	Intrusion is expected to be detected and the consequences are similar to other events.

Scenario	Likelihood	Consequence	Time of Occurrence	Remarks
War which uses the HLW as a target for dispersal	Direct uses of the massive energy required to disperse the HLW are far more likely. Extreme amounts of energy would be required to disperse the HLW.	The long times required for the fatality rates to increase make this an unattractive target.	Anytime.	This is not an attractive target due to the extreme energy required to disperse the HLW and the gradual effects of the dispersal. Effects are inconsistent with the intent of war.
Urban terrorism which uses the HLW as the means	Terrorism is certain, but use of disposed HLW is implausible. Use of biological, chemical, or other radiological sources is far more likely.	The gradual health effects of HLW make it an undesirable means of terrorism. Biological and chemical agents are more effective.	After loss of active institutional controls (assumed to be at least 100 years after repository closure).	This is implausible because biological and chemical agents are more effective and much easier to acquire.
Agriculture, forestry, and recreational uses over the repository	Depending upon location and climate, this may be anticipated over thousands of years.	These surface activities would not directly interact with the repository and will not result in large scale or prompt impacts.	After loss of passive institutional controls (assumed to be at least 1,000 years after repository closure).	The consequences are far smaller and less immediate than for other events.
Water management activities which may increase water flow into the repository but do not directly penetrate it	Likelihood is highly location dependent and ranges from zero to high.	While increased water supply could affect the repository, direct injection into the repository or extraction from it would be far more impacting.	After loss of passive institutional controls (assumed to be at least 1,000 years after repository closure).	The consequences are far smaller and less immediate than for post-drilling events.

Scenario	Likelihood	Consequence	Time of Occurrence	Remarks
Urban development over repository which is a surface or near-surface activity	Siting and passive institutional controls attempt to minimize this event, but it is possible.	Increased receptors to any surface contamination. Impact would be a slight increase in cancer risk to a large number of people.	After loss of passive institutional controls (assumed to be at least 1,000 years after repository closure).	This is a very low level exposure over a long time period (lifetime).
Drilling for exploratory or production reasons	Siting and passive institutional controls attempt to minimize this event, but it is possible. Frequency of drilling into a waste canister is less than $1 \times 10^{-6}/\text{yr}$	HLW could be brought to the surface and consequences are primarily limited to the drill crew. Doses are small ($<0.1 \text{ Sv}$).	After loss of passive institutional controls (assumed to be at least 1,000 years after repository closure).	This is a very low probability event with minimal impacts that would be limited to few individuals.
Post-drilling activities (extraction or injection of water, oil, gas, etc.)	Much less than $1 \times 10^{-6}/\text{yr}$.	Contaminated fluids (drinking water, geothermal water, oil, natural gas, etc.) could be brought to the surface for use with potentially significant impacts.	After loss of passive institutional controls (assumed to be at least 1,000 years after repository closure).	The event could result in the drinking of contaminated water and is considered further in Section 3.3.
Excavation including underground mining, deep open-pit mining, and quarrying	Much less than $1 \times 10^{-6}/\text{yr}$	Airborne releases to a relatively large population is possible.	After loss of passive institutional controls (assumed to be at least 1,000 years after repository closure).	This event could result in unmitigated airborne release and is considered further in Section 3.3.
Explosions such as underground testing of weapons	Much less than $1 \times 10^{-6}/\text{yr}$	Airborne releases are not expected. Impacts from the weapon (e.g., release of fission products) would exceed those from the HLW.	After loss of passive institutional controls (assumed to be at least 1,000 years after repository closure).	Consequences of blow-outs are largely independent of HLW.

3.3 Scenarios Analyzed

The preceding section provided a qualitative assessment of a broad range of candidate events and identified two events, the post-drilling activities and excavation, for more detailed evaluation. This section provides a quantitative assessment of the frequency and consequences of these events.

3.3.1 Post-Drilling Scenario

The post-drilling scenario involves drilling and utilizing a well which supplies radioactively contaminated water to the public.

The frequency of this scenario has been calculated as 5×10^{-11} /yr, but it is less than 10^{-9} /yr, even after allowing for an order of magnitude increase in future drilling rates. Use of this well solely as a municipal water supply for people with a 100-year human life expectancy results in an individual committed effective dose equivalent (CEDE) of 1.5 Sv or an increased risk of latent cancer fatality of 7.5×10^{-2} . The committed population dose would be 21,000 person-Sv with 1050 latent cancers in a population of 14,000 (the number of people who might be supplied by a well) over a 100 year time period.

3.3.2 Mining Scenario

While there are a variety of mining and quarrying activities that could occur in proximity to a HLW repository, inadvertent deep open-pit mining is the event analyzed here since:

- it is a very large scale activity with the potential of impacting multiple disposal packages in one incident and
- it has the potential to result in a direct airborne release to the public.

The frequency for this deep open-pit mining scenario has been calculated as 5×10^{-11} /yr, but it is less than 10^{-9} /yr even if an order of magnitude increase in mining activity is included.

The committed dose from an eight -hour exposure to a population of 415,000 people is 830 person-Sv or an average of 2 mSv per person. Applying the ICRP conversion factor for exposure-related health effects⁽⁶⁾ indicates that there would be an increase of 42 fatal cancers in the population and an increased risk of fatal cancer of 0.01% per person.

4. Uplift and Erosion Scenario

This section provides background information (Section 4.1), a qualitative assessment of uplift and erosion events (Section 4.2), and a quantitative assessment of the likelihood and consequences of the events selected for further consideration (Section 4.3).

4.1 Background

Erosion, denudation, subsidence, uplift, and sedimentation are geologic processes that extend over long periods of time. These processes could result in changes in the depth of a HLW repository and are evaluated to determine potential releases of radioactive material. The geomorphological causes for changes in the depth of the hypothetical high level waste repository are summarized in Figure 2.

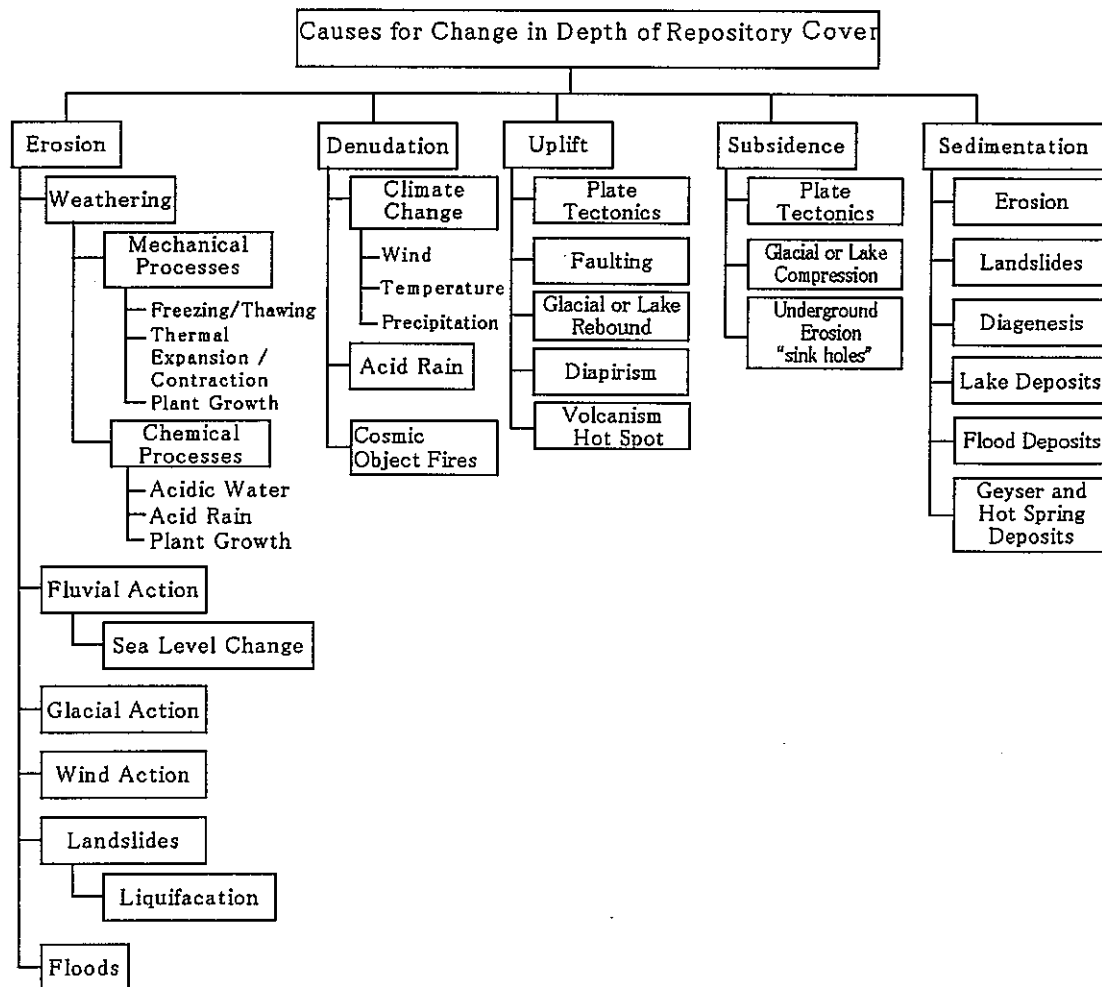


Figure 2. Candidate Causes for Changes in Depth of Repository Cover

4.2 Candidate Uplift and Erosion Scenarios

Assuming that repository performance assessments would dismiss locations near faults and locations with very high uplift rates, this report uses the upper bound of the average uplift rate, 1 mm/yr, for an analysis uplift rate. A rate of 5 mm/yr is used for the faulting uplift rate. Assuming that repository performance assessments would dismiss locations with very high erosion rates, this report uses the midpoint of the average uplift rate, 0.5 mm/yr, for an analysis erosion rate.

Scenarios in which uplift and erosion affect the geological repository are qualitatively evaluated to determine their effects on repository performance and to define erosion and uplift scenarios that may result in a release of radioactive material from the repository to the biosphere.

The qualitative evaluations of scenarios that reflect erosion, denudation, uplift and subsidence are summarized in Table 2.

Table 2. Summary of Qualitative Evaluation of Uplift and Erosion Scenarios

(1) Erosion without Uplift

Scenario	Qualitative Likelihood	Qualitative Consequence
Partial uncover by stream erosion	Incredible for the next 5 million years. Erosion rates are low in areas with small hydraulic gradient. To remove 500 m of repository cover would require about 5 million years.	Increased ground water flow. Bounded by erosion with uplift scenarios.
Uncover by stream erosion	Incredible for the next 10 million years. Erosion rates are low in areas with small hydraulic gradient. To remove 1,000 m of repository cover would require about 10 million years.	Waste canisters exposed to biosphere. Bounded by erosion with uplift scenarios. At 10 million years, radioactivity is only 0.000005% of the original amount.
Sea level changes increase of decrease hydraulic gradient	Likely due to glacial cycles on other parts of the earth's surface.	When glaciers advance, sea levels fall and when glaciers retreat, sea levels rise. Affects erosion rates. Bounded by erosion with uplift scenarios.
Partial uncover by glacial erosion	Incredible for the next 5 million years. Very little historical evidence of glacial ice in Japan. Significant climate change or tectonic movement to a colder climate would increase likelihood.	Increased groundwater flow.
Uncover by glacial erosion	Incredible for the next 10 million years. Very little historical evidence of glacial ice in Japan. Significant climate change or tectonic movement to a colder climate would increase likelihood.	Waste canisters exposed to biosphere.

Scenario	Qualitative Likelihood	Qualitative Consequence
Partial uncover by wind erosion	Incredible for the next 5 million years. Wind weathers hard rock less than ice or thermal forces. Hard rock must be weathered before wind can efficiently move the material.	Increased groundwater flow. Bounded by erosion with uplift scenarios.
Uncover by wind erosion	Incredible for the next 10 million years. Wind weathers hard rock less than ice or thermal forces. Hard rock must be weathered before wind can efficiently move the material.	Waste canisters exposed to biosphere. Bounded by erosion with uplift scenarios.
Landslides	Landslides occur frequently in Japan but without uplift landslides are unlikely.	If the landslide originates above the repository, repository depth would decrease but if the landslide terminates above the repository, repository depth would increase.
Floods	incredible for the next 5 million years. Without hydraulic gradient caused by uplift, erosion rates would be small.	In lowland areas, floods would contribute to sedimentation. Floods from elevated region have greater capacity for eroding earth's surface. Bounded by erosion with uplift scenarios.

(2) Denudation

Scenario	Qualitative Likelihood	Qualitative Consequence
Partial uncover by denudation	Incredible. Must be followed by erosion. Climate change can either increase or decrease amount of vegetative cover. Acid rain reduces the amount of vegetation while fires from cosmic objects tend to reduce the amount of vegetation immediately after the event but may cause enhanced vegetative growth as time progresses.	The effect of denudation is to increase erosion rates. As vegetative cover density decreases, erosion rates increase. Plant growth in rock can aid weathering process. Bounded by the consequences from erosion and erosion with uplift scenarios.
Uncover by denudation	Incredible. Must be followed by erosion. Climate change can either increase or decrease amount of vegetative cover. Acid rain reduces the amount of vegetation while fires from cosmic objects tend to reduce the amount of vegetation immediately after the event but may cause enhanced vegetative growth as time progresses.	The effect of denudation is to increase erosion rates. As vegetative cover density decreases, erosion rates increase. Plant growth in rock can aid weathering process. Bounded by the consequences from erosion and erosion with uplift scenarios.

(3) Uplift

Scenario	Qualitative Likelihood	Qualitative Consequence
Faulting with 5-10 m uplift	Possible in the next 2,000 years but the repository would not be intentionally sited on a fault unless the performance assessment finds the risk acceptable. With a faulting displacement rate of 5 mm/yr, a site could be uplifted 5 to 10 m in 1,000 to 2,000 years.	Fracture of canisters with potential release to groundwater. Consequences similar to human intrusion drinking water scenario.

Scenario	Qualitative Likelihood	Qualitative Consequence
500 m tectonic uplift	Likely but uplift would require about 500,000 years with the average uplift rate of 1 mm/yr.	Without erosion, repository would remain covered.
1,000 m tectonic uplift	Likely but uplift would require about 1,000,000 years with the average uplift rate of 1 mm/yr.	Without erosion, repository would remain covered.
Uplift from glacial rebound	Incredible for the next 10 million years. Very little historical evidence of glacial ice in Japan. Significant climate change or tectonic movement to a colder climate would increase likelihood.	Rebound returns elevation to pre-glacial level. Glacial rebound could increase hydraulic gradient and erosion rates if surrounding land has subsided.
Uplift from rebound when lake water disappears	Possible that event could arise from failure of natural dam.	Rebound returns elevation to pre-lake level. Rebound from lake drying could increase hydraulic gradient and erosion rates if surrounding land has subsided. Bounded by erosion with uplift scenarios.
Falling sea level increases hydraulic gradient	Likely within the next 20,000 years due to glaciers on other parts of the earth's surface.	When glaciers advance, sea levels fall and when glaciers retreat, sea levels rise. Affects erosion rates. Bounded by erosion with uplift scenarios.

(4) Subsidence

Scenario	Qualitative Likelihood	Qualitative Consequence
Subsidence from glacial compaction	Incredible for the next 10 million years. Very little historical evidence of glacial ice in Japan. Significant climate change or tectonic movement to a colder climate would increase likelihood.	Subsidence could occur either above or adjacent to repository. Waste canisters could fracture if stress is not transferred by plastic deformation of material surrounding canisters.
Subsidence from lake compaction	Possible that event could arise from landslide creating natural dam.	Subsidence could occur either above or adjacent to repository. Sedimentation rate would increase and add to the depth of the repository.
Subsidence at tectonic plate interface	Subsidence is very likely in the Japan archipelago but performance assessments should eliminate subsiding sites. Subsiding areas of Japan could be lower by 500 m in 500,000 year.	Repository could be submerged beneath the sea. If repository is not submerged, the rate of erosion could increase because of an increased hydraulic gradient.

(5) Sedimentation

Scenario	Qualitative Likelihood	Qualitative Consequence
Flood in lowland area	Event is quite likely to occur.	Sedimentation increases depth of repository and further isolates the waste canisters from the biosphere.
Rising sea level decreases hydraulic gradient	Likely due to glaciers on other parts of the earth's surface.	When glaciers advance, sea levels fall and when glaciers retreat, sea levels rise. Reduces erosion rates. Bounded by erosion with uplift scenarios.

Scenario	Qualitative Likelihood	Qualitative Consequence
Landslide deposits material on repository	Possible if performance assessments do not identify areas susceptible to landslides and hence reduce the likelihood.	Sedimentation increases depth of repository and further isolates the waste canisters from the biosphere.

(6) Uplift and Erosion

Scenario	Qualitative Likelihood	Qualitative Consequence
500 m fault uplift with erosion leading to partial uncovering	Likely. Uplift would require about 100,000 years at a faulting uplift rate of 5 mm/yr and subsequent erosion would require about 1 million years (0.5 mm/yr).	Increased ground water flow. Bounded by human intrusion drinking water scenario (Chapter 3).
1,000 m fault uplift with erosion leading to uncovering	Likely. Uplift would require about 200,000 years at a faulting uplift rate of 5 mm/yr and subsequent erosion would require about 2 million years (0.5 mm/yr).	Repository uncovered and high level waste canisters exposed. Drinking water doses should be similar to doses from drinking water scenario in Chapter 3.

4.3 Scenarios Analyzed

The preceding section provided a qualitative assessment of a range of candidate scenarios and identified the 1,000 m faulting uplift with erosion leading to uncovering of the repository scenario for more detailed evaluation. This section provides a quantitative assessment of the frequency and consequences of the scenario.

With an uplift rate of 5 mm/yr, an uplift of 1,000 m requires 200,000 years. With an erosion rate of 0.5 mm/yr, erosion of the 1,000 m of cover material requires 2 million years. Assuming that erosion occurs while the land is uplifting, uncovering of the repository would occur in about 2 million years. Using the previously analyzed data in Chapters 3 and 4 of Ref.(1), the probability of an uplift occurring beneath the repository within a 200,000 year time span is 8×10^{-5} (4×10^{-10} /yr \times 2×10^5 yrs).

To evaluate the consequences from the radioactive canisters being exposed to the biosphere, radiation doses for three exposure pathways are evaluated. An ingestion dose is calculated for a scenario in which people collect the precipitation runoff from the exposed site for drinking water. An inhalation dose is calculated for a scenario in which construction occurs on a 10,000 m² area of the repository and an external dose is calculated assuming that people are living on the area of the repository. The results of these evaluations are shown in Table 3.

Table 3. Radiological Consequences from Uncovering of HLW Repository

Pathway	Committed Dose to Individual (Sv)	Probability of Fatal Cancer for Individual*	Exposed Population	Population Does (Person-Sv)	Number of Fatal Cancers in Population*
Ingestion	5.6×10^{-2}	2.8×10^{-3}	1.4×10^6	7.8×10^4	3.9×10^3
Inhalation	5.9×10^{-6}	3.0×10^{-7}	414,672	2.46	0.1
External	8.6×10^{-21}	4.3×10^{-22}	1,760	1.5×10^{-17}	7.5×10^{-19}

*ICRP health effects conversion factor of 5×10^{-2} fatalities per Sv⁽⁶⁾

5. Climate Change Scenario

This section provides background information (Section 5.1), a qualitative assessment of a range of candidate climate change events (Section 5.2), and a quantitative assessment of the likelihood and consequences of the events selected for further consideration in the qualitative assessment (Section 5.3).

5.1 Background

There are many potential cause for climate change. Figure 3 provides an overview of some of the key phenomena that affect climate. These changes may be the result of natural causes or human activity. Even though glaciers did not directly affect Japan, they did substantially lower sea levels and thereby significantly increased its land area. It is estimated that the sea level 20,000 years ago was 80 to 140 m lower than current levels⁽⁴⁾⁽⁷⁾.

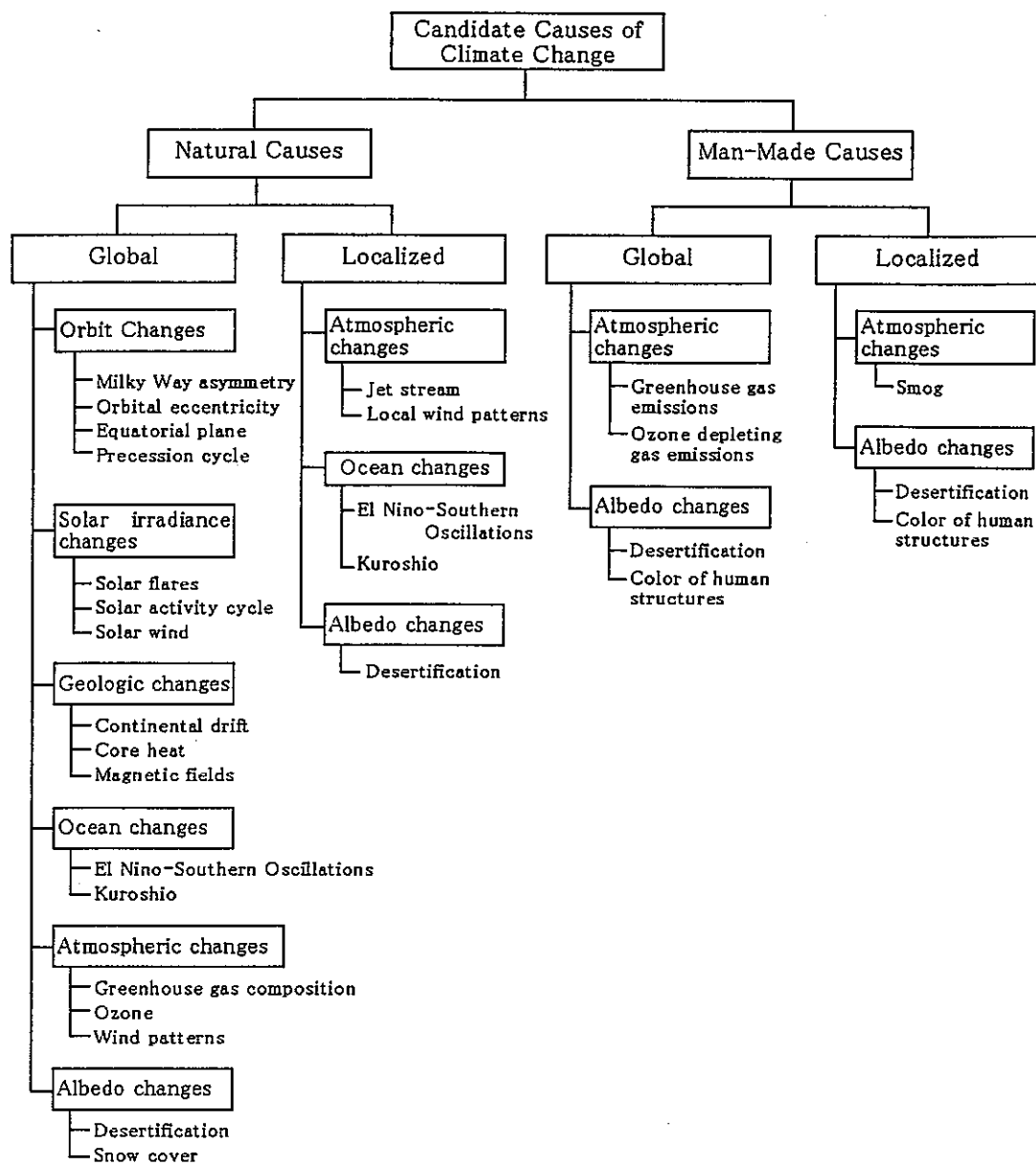


Figure 3. Candidate Causes of Climate Change

5.2 Candidate Climate Change Scenarios

Humidity, wind, and atmospheric pressure are surface phenomena that will not affect HLW 1,000 m below the surface. These conditions are dismissed from further consideration. However, temperature and precipitation have the potential of affecting the repository performance through sea level changes, water ingress, and glaciation.

As shown in Figure 4, the changes in temperature and precipitation result in raising and lowering of sea levels, and increases and decreases in water ingress into the repository. Table 4 identifies the potential effects of candidate causes of climate change on temperature and precipitation.

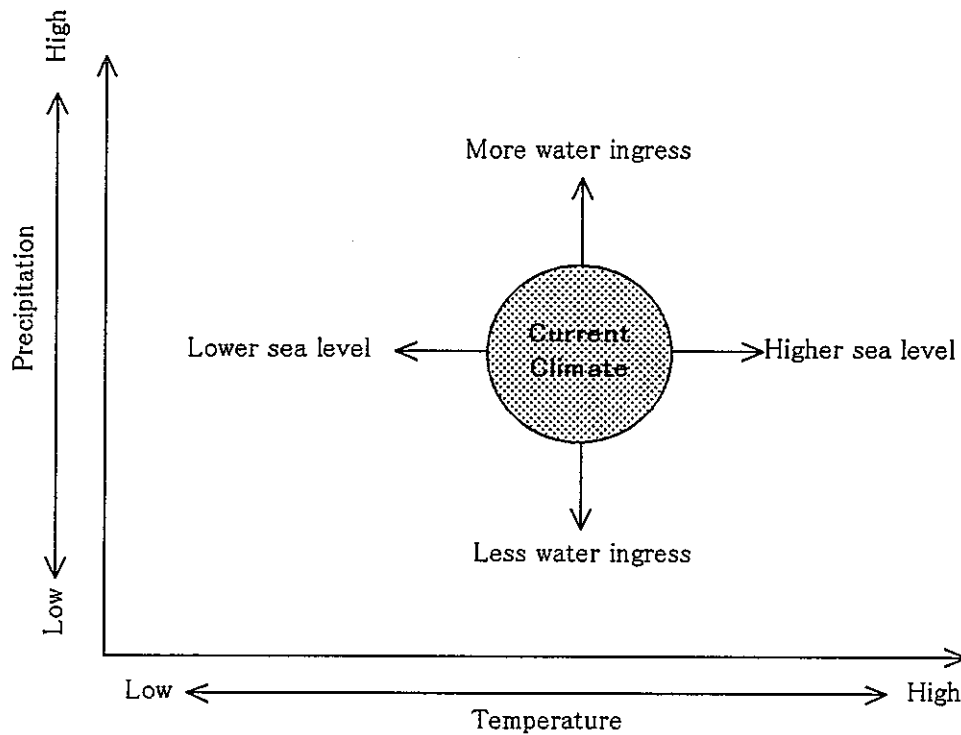


Figure 4. Effects of Climate Change

Table 4. Summary of Qualitative Evaluation of Climate Change Scenarios

Scenario	Timing	Effects
Orbital changes	<ul style="list-style-type: none"> • Milky Way symmetry = 300 million year cycle • Orbital eccentricity = 93,400 year cycle • Equatorial plane shift = 41,000 year cycle • Precession cycle = 25,920 year cycle 	A general, gradual cooling of the atmosphere and an increase in ground water is expected over the next 100,000 years as a result of these phenomena. Temperature changes may be -5°C .
Solar irradiance changes	<ul style="list-style-type: none"> • Solar flare cycle = 11 year cycles • Solar activity cycle = 11 year cycle (potentially, with long term variation of this cycle) • Solar wind fluctuations = 11 year cycles 	The 11-year cycles have only minor, short-term effects on climate. Longer term variations in irradiance may produce changes of $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Changes in the level of solar activity in each cycle will result in increases and decreases in temperature and precipitation over the repository lifetime.
Geologic changes	<ul style="list-style-type: none"> • Continental drift = millions of years 	No effect on temperature or precipitation in the next 10,000 years. Effects over many millions of years can be dramatic.
	<ul style="list-style-type: none"> • Earth's core heating = steady 	No effect on temperature or precipitation in the repository lifetime.
	<ul style="list-style-type: none"> • Magnetic fields <ul style="list-style-type: none"> • Polar reversals = 170 in 100 million yrs • Secular variations = 960 year cycles • Annual variations = 1 year 	Changes in ionosphere occur, but there is limited effect on temperature or precipitation.

Scenario	Timing	Effects
Ocean changes	<ul style="list-style-type: none"> • ENSO = 3-7 year cycles 	Temperature increases of 1° to 6°C and local precipitation changes of ±30%. These changes are short term (1 to 1½ years) and do not affect long term climate.
	<ul style="list-style-type: none"> • Kuroshio Current 	Japan's climate is highly dependent upon ocean currents and changes could increase or decrease local temperatures and precipitation. Global effects are not expected from changes in this current, so sea levels would not be impacted.
Atmospheric changes	<ul style="list-style-type: none"> • Greenhouse gas composition changes Natural = ongoing Human activity = centuries 	Natural changes will result in increases and decreases in temperature and precipitation. Increased greenhouse gas emissions from human activity is predicted to increase atmospheric temperatures 1° to 3.5°C by 2100.
	<ul style="list-style-type: none"> • Ozone depletion Natural = ongoing Human activity = centuries 	UVB radiation at the earth's surface may increase, but this will not affect climate or a HLW repository.
	<ul style="list-style-type: none"> • Smog 	Localized affect on albedo and temperatures locally. No global effect from localized smog.
Albedo changes	<ul style="list-style-type: none"> • Desertification • Reflectivity of human structures • Snow cover 	Climate changes include increases and decreases in temperature and precipitation.

5.3 Scenarios Analyzed

The preceding section (Section 5.2) provided a qualitative assessment of a broad range of candidate events and identified four scenarios for further evaluation: higher sea level, lower sea level, increased water ingress, and decreased water ingress. This section discusses the effects of each of the four scenarios.

5.3.1 Lower Sea Level Scenario

One result of long-term global cooling is lower sea levels. The likelihood of a temperature decrease of 3°C, roughly the change required to produce a significant decrease in sea level, within the next 10,000 years is much less than 1%⁽⁹⁾. Within the 100,000 year time frame, a 3°C decrease in temperature is anticipated. A lower sea level will further isolate the repository from the sea water. There is expected to be no direct effect on the repository from lowering sea levels.

5.3.2 Higher Sea Level Scenario

One result of long-term global warming is higher sea levels. A 3°C temperature increase in the next 300 years has at least a 30% probability⁽⁹⁾ of occurring. However a temperature increase of this magnitude will result in a sea level change of less than 10m, which will not impact a HLW repository. It is implausible that a HLW repository would be sited such that higher sea levels could threaten to intrude, however, because of public interest, the potential consequences of such a scenario are considered anyway.

The net effects of sea water intrusion into a HLW repository are as follows:

- The effects of any changes in the performance of the repository system would occur after overpack failure, which is not expected for 1,000 or more of years.
- Consumption of water from the vicinity of HLW is implausible if sea water has intruded. Therefore, the effects of the HLW would decrease with sea water intrusion.
- In the unforeseeable situation that water is consumed from the vicinity of a HLW repository after sea water intrusion, a very slight decrease (5%) in doses is expected over the first 10 million years and a doubling of doses may result in the 10- 100 million year time frame after emplacement. The doses to someone consuming all of

their water from a source 10 m downstream from a HLW package after sea water intrusion are about 3×10^{-8} mSv/yr at 1 million years, 3×10^{-5} mSv/yr at 10 million years, and 8×10^{-3} mSv/yr at 40 million years after emplacement⁽⁴⁾ .

5.3.3 Increased Water Ingress Scenario

One result of increased precipitation is a likely increase in the water ingress into a HLW repository. It is assumed here that at least a 50% increase in precipitation is required to produce a significant increase in water ingress (the consequences are provided for a factor of 100 increase in water ingress). For the proposed Yucca Mountain repository in the USA, a 50% increase in precipitation has a 20% probability in the 10,000 time frame⁽⁹⁾. Due to the much wetter current climate of Japan, this probability is considered to be a conservative estimate.

The net effects of increased water ingress are as follows:

- The effects of any changes in the performance of the repository system would occur after overpack failure, which is not expected for 1,000 or more years.
- The dose to the maximally exposed individual consuming water from the vicinity of HLW will be inversely related to the volume of water present. Therefore, an increase in water ingress will result in a corresponding decrease in the maximum doses.
- The total radionuclide release is fixed for a wide range of water velocities, so population doses could potentially be unchanged. However, all of the increased water must be used in the same manner by a correspondingly larger number of people for the population dose to be the same. If all of the increased water is not used in the same manner, the population dose will also decrease.

5.3.4 Decreased Water Ingress Scenario

One result of decreased precipitation is a likely decrease in the water ingress into a HLW repository. For the proposed Yucca Mountain repository in the USA, the probability of a 25% decrease in precipitation throughout the next 10,000 years is less than 5%⁽⁹⁾. The probability of a 25% decrease in precipitation for Japan is considered to be at least 5% since its climate is currently wet.

The net effects of 25% decreased water ingress are as follows:

- The effects of any changes in the performance of the repository system would occur after overpack failure, which is not expected for 1,000 or more of years. Extreme decreases in water ingress could delay the time of overpack failure.
- The dose to the maximally exposed individual consuming water from the vicinity of HLW will be inversely related to the volume of water present. Therefore, A decrease in water ingress will result in a corresponding increase in the maximum doses.
- The total radionuclide release is the same, so population doses would be unchanged.

5.4 Net Effects of Climate Change

Figure 5 provides an overview of the range of impacts (based upon Ref. (4)) that may result for each of these scenarios if future generations of people were to drink the water contaminated with radioactive material.

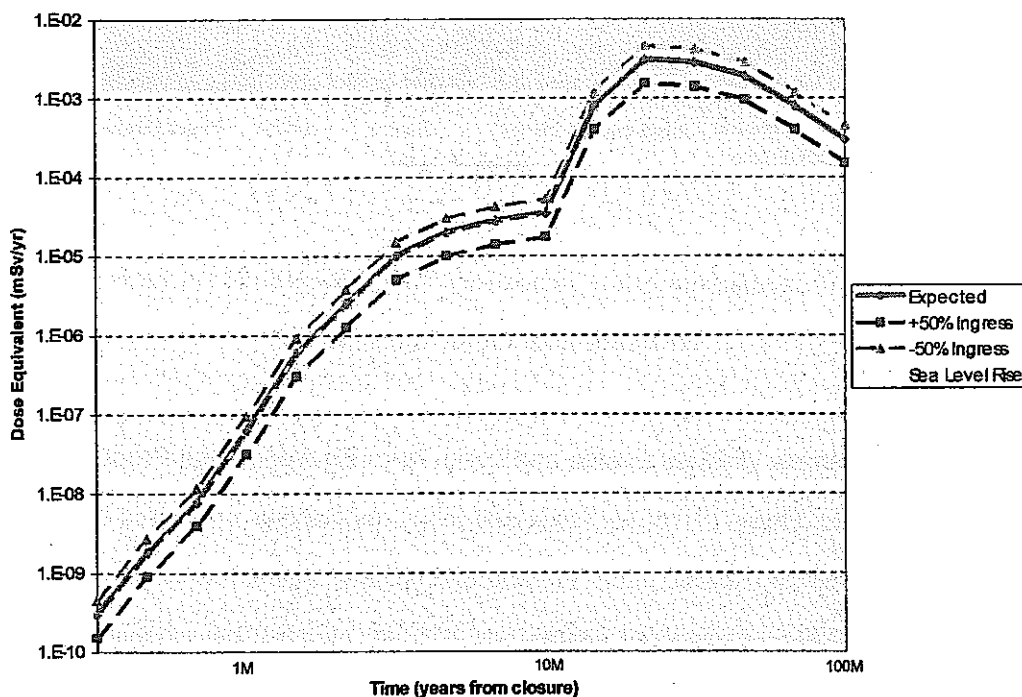


Figure 5. Doses over Time from Climate Change Scenarios

This graph shows that the net effects of climate change are relatively minor increases or decreases in dose.

6. Interpretation of Results

For the accidents studied in this report, the *incremental* risk of an individual dying of a radiation-induced fatal cancer is very small compared to the background probability of 0.2.

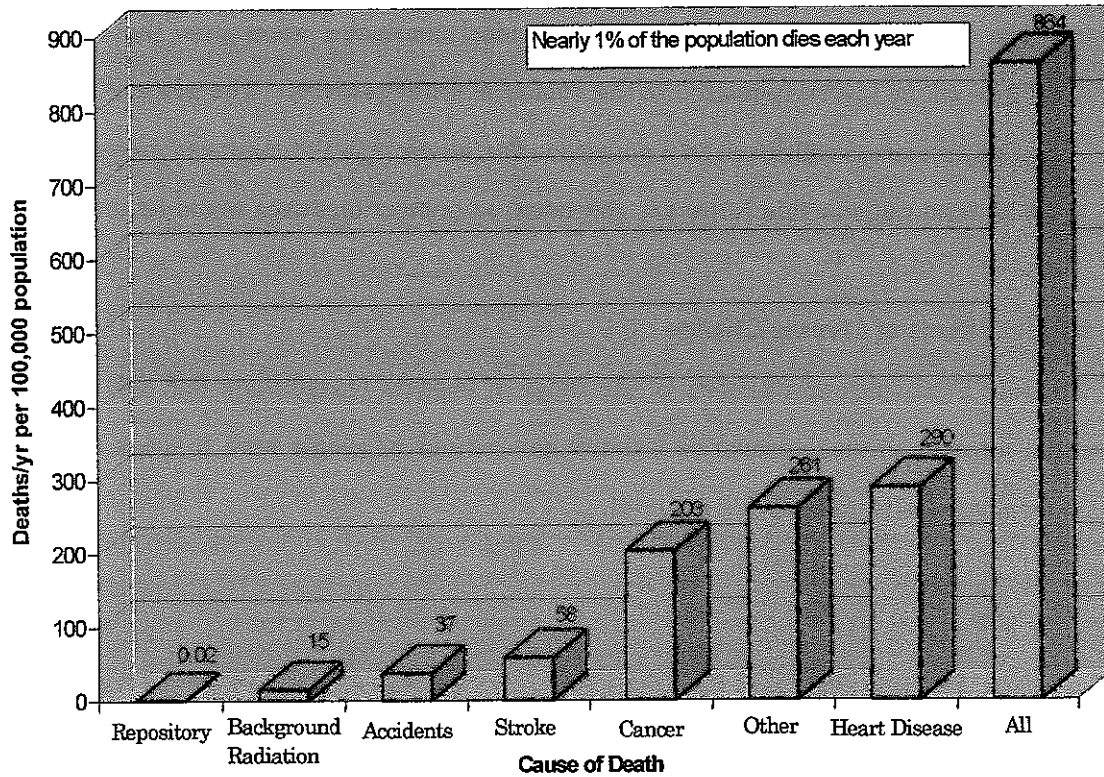


Figure 6. Comparison of the Repository Radiological Risk to the Risk of Death from Other Causes

6.1 Risk from Extremely Unlikely Events and Long-Term Environmental Processes

Using results from Phase 1⁽¹⁾ of this study and from the analyses presented in Chapters 3, 4, and 5 for human intrusion, uplift/erosion and climatic change at a HLW geological repository, the number of expected deaths per 100,000 people from extremely unlikely events and long-term environmental processes was compared to the nominal accidental death rate reported for other accidents in Japan (as shown in Table 5).

Table 5. Expected Death Rates from Extremely Unlikely Events, Long-Term Environmental Processes and from Other Accidents in Japan

Type of Event or Process	Expected deaths per 100,000 people from Non-Radiological Impacts	Expected deaths per 100,000 people from Radiological Impacts	Terms more likely to die from accidents in Japan
Erosion and Uplift- Ingestion	N/A	2.2E-04	1.2E+05
Active Fault Movement	1.0E-04	3.6E-06	2.6E+05
Erosion and Uplift- Inhalation	N/A	1.9E-06	1.4E+07
Human Intrusion-Drilling	6.9E-10	3.8E-07	7.1E+07
Cosmic Impact	7.5E-09	8.9E-12	3.6E+09
Human Intrusion-Mining	1.3E-09	5.1E-10	1.5E+10
Volcanic Eruption	4.1E-10	1.8E-11	6.3E+10
Climate Change- Decreased Water Ingress	N/A	6.3E-11	4.3E+11
Climate Change-Higher Sea Level	N/A	6.0E-11	4.5E+11
Climate Change-Increased Water Ingress	N/A	2.5E-14	1.1E+15
Erosion and Uplift- External	N/A	3.4E-23	7.9E+23
Climate Change-Lower Sea Level	N/A	No Deaths Expected	No Deaths Expected
Other Accidents in Japan	27	near 0	-

The last column in the table indicates that a Japanese individual is much more likely to die from "normal" accidents than from the extremely unlikely events or long-term environmental processes considered in this report.

Even though these analyses are intended to be conservative (or overstate the risks), it is acknowledged that there are large uncertainties in both the estimates of likelihood and consequences for extremely unlikely events. However, even if the results are underestimated by two or three orders of magnitude, the risks from undisturbed repository impacts, extremely unlikely events, and long-term environmental processes considered herein are negligible compared to the everyday risks from accidents in Japan.

6.2 Creating Slide Presentation

On extremely unlikely scenario discussed since last year, using the computer graphics presentation program Microsoft PowerPoint, a series of slides were created to show the assessment results (such as accident scenarios, the scenario likelihood and consequences, and the risk of the scenario compared to other risks) for the public understanding. As an illustrated example, volcanism scenario was selected to discuss on the propriety of visualization of risks (see Appendix E in this main report). The items included in slides are :

- ① energy supply in Japan
- ② concept of geological disposal
- ③ safety of geological disposal
- ④ approach to evaluating extremely unlikely events
- ⑤ likelihood, consequence and risk
- ⑥ example of volcanism scenario
- ⑦ comparison of risk
- ⑧ benefit of nuclear generation
- ⑨ response to the general public

Afterword

We studied the accident scenarios (direct release scenarios) initiated by human intrusion, uplift/erosion and climatic change on high-level radioactive waste (HLW) disposal site in Japan.

Risk analysis conducted here suggests that the risks caused by these direct release scenarios are negligible compared to the everyday risks from accidents in Japan.

And, as an example of presenting a result of risk analysis more realistically, a series of slides were produced for the previously discussed volcanism scenario.

The next subjects to be studied will be:

- ① detailed risk analysis (using more sophisticated models, making sensitivity analysis and comparing with other risks)
- ② discussion on how to improve the public understanding (through communication tools such as slides produced for the remaining direct release scenarios, and then an extension to a dynamic presentation).

References

- (1) MRI: 「Research Study For Extremely Unlikely Scenario of High Level Waste Disposal」 Report on Result of PNC-Commissioned Research, PNC ZJ1222 97-005(1997).
- (2) MRI: 「A Study on Scenario Development for Waste Disposal Performance Assessment(Ⅲ)」 Report on Result of PNC-Commissioned Research, PNC ZJ1222 91-002(1991).
- (3) MRI: 「A Study on the Scenario Development for Waste Disposal Performance Assessment in Japan(Ⅳ)- Stochastic Assessment of Human Activity -」 Report on Result of PNC - Commissioned Research, PNC ZJ1222 92-001(1992).
- (4) PNC: 「Research and Development of Geological Disposal of High Level Radioactive Waste, First Progress Report」 PNC TN1410 93-059, September(1992).
- (5) D. Wenzel: 「The Radiological Safety Analysis Computer Program」 WINCO-1123 February(1994).
- (6) ICRP : 「1990 Recommendation of the International Commission on Radiological Protection」 Publication 60, Annals of the ICRP, Volume 21, No.1-3, Pergamon Press, Oxford, England(1991).
- (7) SKB: 「Template for Safety Reports with Descriptive Example」 Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden, SKB Technical Report No. 96-05, December (1995).
- (8) C. A. Negin and G. Worku : 「MicroShield Version 4 User's Manual」 Grove Engineering, Inc., Grove 92-2, Rockville, MD, May 1(1992).
- (9) CNWRA: 「Expert Elicitation of Future Climate in the Yucca Mountain Vicinity」 CNWRA 93-016, Center of Nuclear Waste Regulatory Analyses, August(1993).