

地層処分の極限安全性 に関する研究

(要 約)

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書)

1997年 3 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 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

地層処分の極限安全性 に関する研究

大久保博生*

要 旨

本研究では、まず、活断層／地震活動、大隕石、火山活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：080D0331

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

Research Study for Extremely Unlikely Scenario of High level Waste Disposal

Hiroo Ohkubo*

Abstract

In this research, each event and process relevant to the key works (or scenario initiator) such as active fault/ seismic activity, huge meteorite, volcanic activity, have been identified and the catastrophic scenario, which inspires ordinary people to have tremendous concern, has been analyzed.

Based upon the characteristic events and process 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. :080D0331

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

	頁
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 不確実性	5
3. 活断層	6
3.1 活断層事象シナリオ	6
3.2 事象の発生可能性	7
3.3 放射性ソースターム	8
3.4 事象の影響の大きさ	8
3.4.1 放射線学的影響	8
3.4.2 非放射線学的影響	9
4. 火山活動	10
4.1 火山活動によるシナリオ	13
4.2 事象の発生可能性	13
4.3 放射性ソースターム	13
4.4 処分場に対する火山の影響の大きさ	14
5. 天体の衝突	15
5.1 HLW処分場がない場合の天体衝突の影響	15
5.1.1 リスクと衝突体の大きさとの関係	15
5.1.2 リスク分析	15
5.2 HLW処分場がある場合の天体衝突の影響	17
5.2.1 事象の発生可能性	17
5.2.2 放射性ソースターム	17
5.2.3 天体衝突の影響	19
6. 評価結果の解釈	20

あとかき	21
参考文献	23

表 目 次

	頁
表1 日本における過去の地震	9
表2 世界の主要火山の特徴	12
表3 日本におけるほとんど起こり得ない事象とその他事故による 期待死亡率	20

図 目 次

	頁
図1 仮想的な活断層シナリオを示す概念図……………	6
図2 HLW地層処分場で断層運動が起こり得る条件を示す論理図・	7
図3 雷放電をともなう桜島の爆発的噴火……………	11
図4 地球に巨大な隕石が衝突した瞬間を描いた画家ドン・デイビス の絵……………	18

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、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

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や火山活動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⁽¹⁾。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⁽²⁾。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。このようなほとんど起こり得ない事象が本調査研究の対象であり、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、このような事象の影響の大きさと発生可能性について判断する必要がある。影響の大きさは放射能を伴う事象と伴わない事象の双方について予測し、発生可能性について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空気中に拡散する割合、空気中に拡散する部分のうち大気圏に到達する割合、を検討することによって求められる。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。

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

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

連続的放出の場合、この式は下記のようになる。

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

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

狭い地域に影響を与える事象の場合も、広い地域（地球規模の場合を含む）に影響を与える事象の場合も、放射線学的影響の評価には、RSACコード⁽³⁾を選んだ。

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。

2.2 非放射線学的影響

火山活動、大地震、天体の衝突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に基づいて推定する。影響の評価はシナリオ毎に行なう。

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。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震、火山活動、隕石の衝突などの事象に関する調査も、以前に行なわれている⁽¹⁾。

2.4 不確実性

ほとんど起こり得ない事象の影響評価にも、その発生可能性の評価にも、不確実性が存在する。放射線学的影響に関連する不確実性のほとんどは、放出される放射性物質の量に関するものである。放射線学的影響では、気象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、大規模地震、火山活動、隕石衝突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。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. 活断層

3.1 活断層事象シナリオ

活断層の運動（又は新しい断層の生成）が埋設された廃棄物パッケージを破損させ、断層を通過して大気圏へ直接漏出する経路となるような場所にHLW地層処分場があると想定する。事故のシナリオを単純化した概念図で示すと図1のようになる。

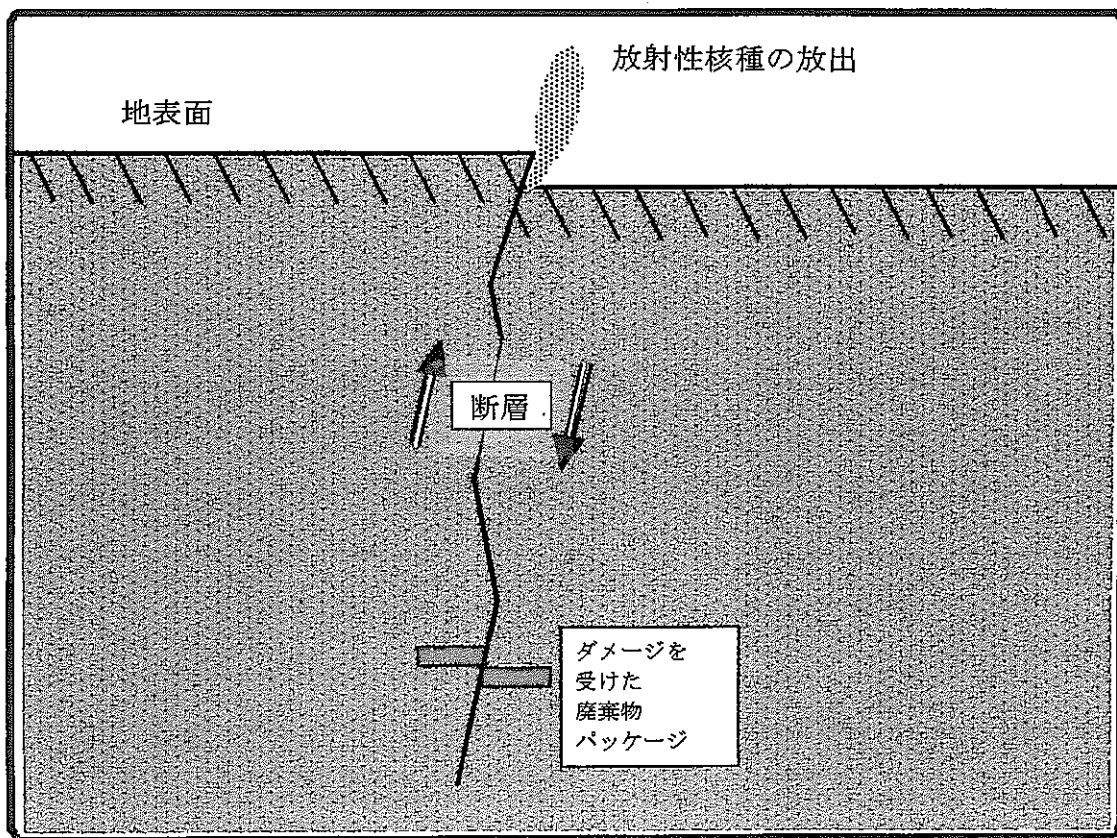


図1 仮想的な活断層シナリオを示す概念図
(縮尺は無視している。廃棄物パッケージの実際の設置深度は数百メートルである)

3.2 事象の発生可能性

断層運動の発生可能性に影響を与える主要な要素を、図2の論理図に示す。

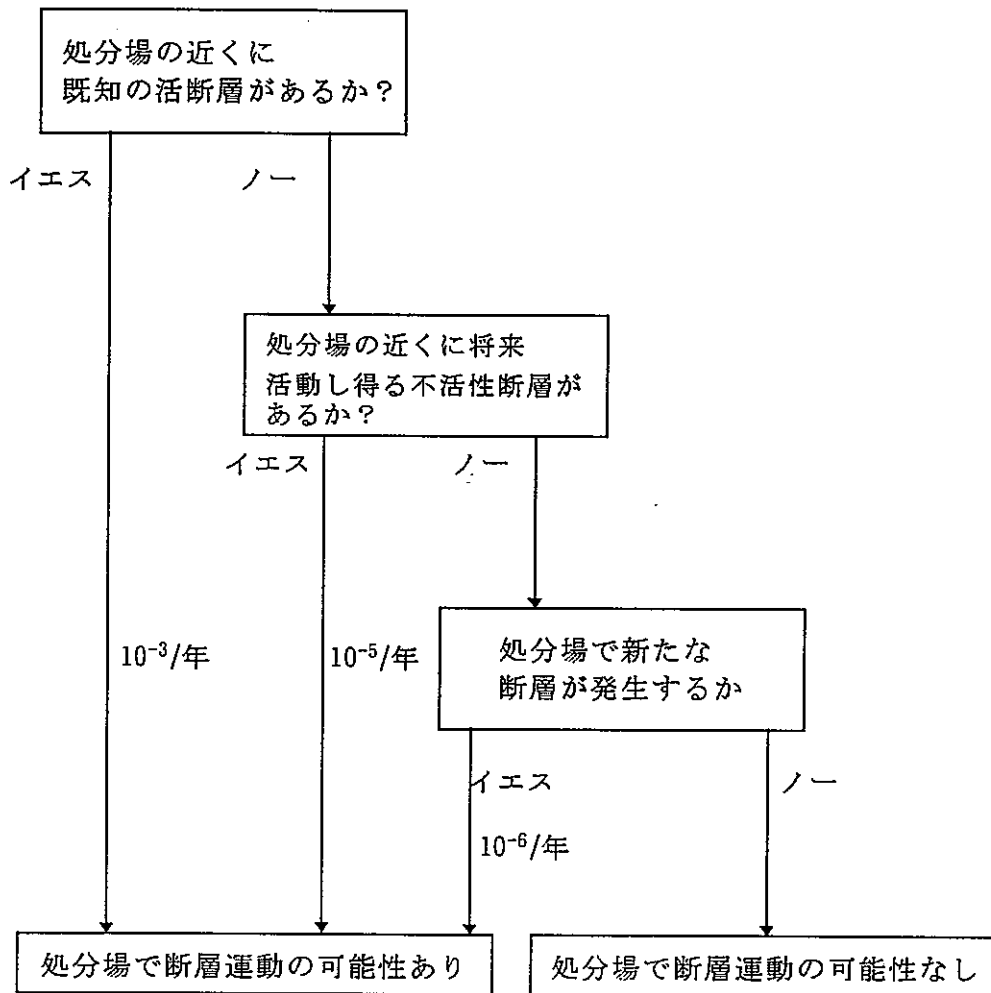


図2 HLW地層処分場で断層運動が起こり得る条件を示す論理図

活断層で破壊される廃棄物パッケージの数は、その合計数と処分場の形状に左右される。本調査では、1000個の廃棄物パッケージが断層運動によってつぶれた場合の影響について検討する。

3.3 放射性ソースターム

MARとDRの積は1000個の廃棄物パッケージに関するものである。Mishimaの方法⁽⁴⁾を使って、固体の粉碎される部分は下記の式によって推定することができる。

$$PULF = A \rho g h$$

ここで、PULF = 10 μ m以下に粉碎される割合

$$A = \text{経験的相関係数 (g-cm}^2/\text{s}^2\text{あたり } 2 \text{E} - 11 \text{cm}^2)$$

$$\rho = \text{供試体密度 (g/cm}^3\text{)}$$

$$g = \text{重力加速度 (海水面で } 980 \text{cm/s}^2\text{)}$$

$$h = \text{等価ドロップハイト (cm)}$$

1000個の破碎された廃棄物パッケージから地下の断層境界線の空气中への合計放出量は、一時間当たり約1グラムと推定される。

おそらく最も不確実なパラメータは漏出経路係数(LPF)で、これは処分場の形状並びに断層の特性と地表面の開口部に左右される。本調査研究の分析では、非常に保守的な漏出経路係数0.1を想定する。この場合ソースタームは1時間当たり0.1gである。

3.4 事象の影響の大きさ

3.4.1. 放射線学的影響

放射線学的影響の場合、放出点からの距離に応じて最大限の被曝を受ける人の癌死リスク増で放射能被曝の推定が行なわれる。この分析では廃棄物パッケージ埋設から1000年後の、保守的な(現状と変わらない)気象条件を想定する。比較のために言うと、原子力事故による被曝を受けない人がその生涯で癌死する確率は約5分の1(20%)である。

放出地点から100mの場所に、避難するまで8時間にわたりとどまっていた施設労働者など最大限被曝した人の場合、その生涯で癌死する率は20%から20.1%に増加する。放出地点から1kmの場所に、避難するまで8時間にわたりとどまっていた最大限

被曝した人の生涯癌死亡率は20%から20.001%に増加する。

放出地点から10kmの場所に丸一年いて最大限被曝した人が、その生涯で癌死するリスクは20%から 20.06%に増加する。放出地点から 100kmの場所で丸一年にわたり最大限被曝した人が、その生涯で癌死するリスクは20%から20.004%にしか増加しない。人口 100万人の人口密集地が放出地点から 100kmの所にあったとして、放射能被曝の結果として被曝した人々の生涯で癌死する人は40人増えることになる。これら数値は、地震に起因する放射性物質の大気中への直接放出に起因する放射能のリスクが小さいことを示唆している。

3.4.2 非放射線学的影響

大地震による非放射線学的影響には、財産の喪失、基本的サービスの中断、人命の損失などが含まれる。放射線学的リスクと比較するために、可能性ある人命の損失の推定値を検討する。

表1 に示すように、1900年から1990年までのデータによると、日本では1000人以上の死者が出た地震は8回あった。これらの記録によれば、大規模地震は数千人の死者を出す可能性がある。本調査研究では死者1000人を想定するのが妥当と思われる。建築技術と耐震設計の向上により死者の数は過去の記録より少なくなると思われるからである。

表1 日本における過去の地震
(出典：United States Geological Survey)

年	場所	死者数	マグニチュード	コメント
1923年	東京・横浜	143,000	8.3	関東大震災
1927年	丹後	3,020	7.9	
1933年	三陸	2,990	8.9	
1943年	鳥取	1,190	7.4	
1944年	東南海	1,000	8.3	
1945年	三河	1,900	7.1	
1946年	東南海	1,330	8.4	
1948年	福井	5,390	7.3	

4. 火山活動

世界の火山の半分以上は「環太平洋火山帯」にあり、日本列島の火山帯にある火山だけでも世界全体の約10%を占める。1997年2月に、東京大学火山研究センターは日本またはその近辺で活動中で最近噴火した火山として、桜島（図3参照）、諏訪之瀬島、福徳岡の場（海底火山）、雌阿寒、安達太良、九重、北海道駒ヶ岳、雲仙の八つを挙げた。過去10,000年の間に世界で四つしかなかったマグニチュード7（火山爆発指数）の火山の一つである喜界島は紀元前4350年に爆発した。世界の主要火山の特徴とそのマグニチュードを表2に示す。

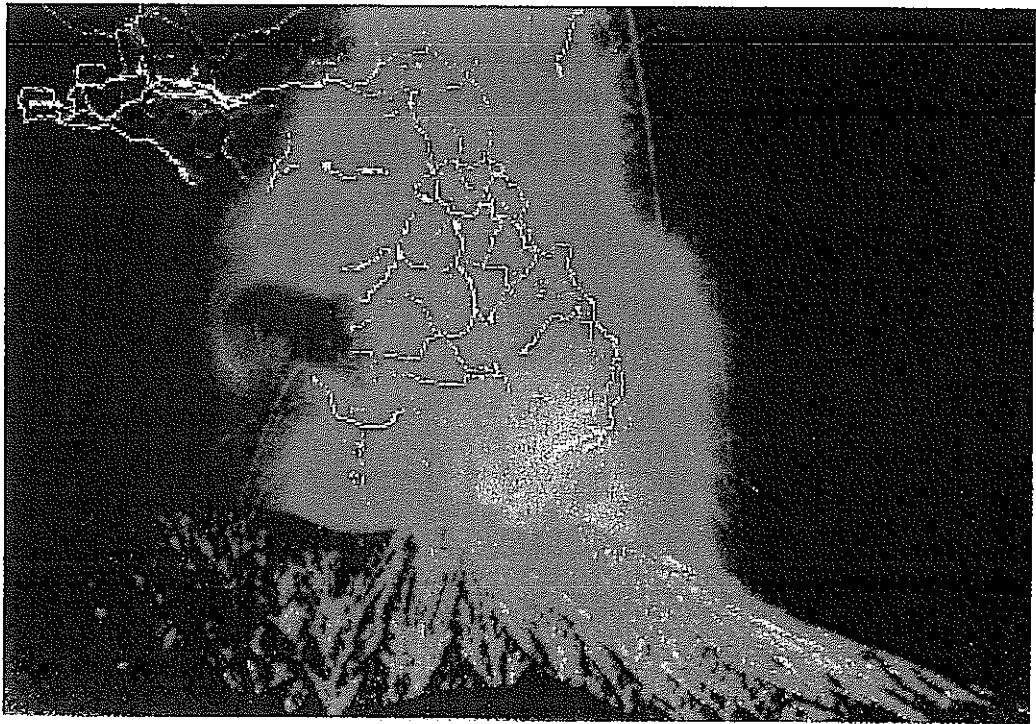


図3 雷放電をともなう桜島の爆発的噴火〔出典：桜島火山観測所（SVO）〕

表2 世界の主要火山の特徴（時系列的にリストアップ）

火山	場所	年度	VEI ^a	備考
トバ	インドネシア	BC71000	8	マグニチュード8の最後の火山。地球の気温が12℃も下がり、氷河時代の契機となった可能性がある。
クレーターレーク	オレゴン州 (米国)	BC4900	7	
喜界島	日本	BC4350	7	
ベスビオス火山	イタリア	79	5	紀元79年に起こった最も有名かつ大規模な噴火で、死者は3000人を越えた。
白頭山	中朝国境	1050	7	
富士山	日本	1707	5	この噴火以来、日本ではこれより大きい火山は生まれていない。
雲仙	日本	1792	3	死者15,000人（大多数は津波による）。1991年にも噴火して死者44人がでた。
タンボラ	インドネシア	1815	7	マグニチュード7の最後の火山。爆風で10,000人が死亡し、作物が全滅して合計92,000人が死亡。「夏がなかった年」と呼ばれる。
クラカトア	インドネシア	1883	6	合計死者36,000人。うち約30,000人は津波による。
セントヘレンス山	ワシントン州 (米国)	1980	5	死者58人。損害12億ドル。
ピナツボ	フィリピン	1991	6	死者932人。25万人が避難した。地球の気温が0.5℃下がった。

^a VEI = (Volcanic Explosivity Index の略で噴火の規模を測定する複合的指数)

0 = 非爆発的、1 = 穏やか、2 = 爆発的、3 = 重大、4 = 天変地異的、5 = 激発的、> 6 = この世の終わりの。

4.1 火山活動によるシナリオ

火山活動が埋設された廃棄物パッケージを破損させ、大気圏へ直接漏洩する経路となるような場所にHLW地層処分場があると想定する。本調査研究の発端はHLW地層処分場を貫通する大規模火山活動に対する公衆の懸念であるので、単一の火山の火山性爆風、噴火の火柱および火砕流による放射線学的影響について評価する。このような現象は、「環太平洋火山帯」の周辺に位置する造山性マグマ（水分とシリカの含有率が高い）の貫入した大型火山に特徴的なものである。

4.2 事象の発生可能性

日本には約 60 の活火山があり、それら全てが過去 30,000 年の間に出現したとすれば、日本のどこかに新しい火山が出現する確率は年間 2×10^{-3} （1000 年に 2 個）と想定される。60 の活火山には海底火山も含まれ、一部の火山の年齢は実際には 30,000 年以上であるので、この確率は保守的なものである。新しい火山が日本の任意の場所に出現し、それが直径 8 km の円の中にあり、HLW 処分場もそこに含まれると（取り敢えず）想定した場合、その円の中に火山が出現する条件付き確率は、円の面積（約 50 km^2 ）を日本の面積（約 $380,000 \text{ km}^2$ ）で割ったもの、即ち約 1.3×10^{-4} である。しかし、我々はこのような事象が任意の場所に出現はしないことを知っている。新しい火山は、もぐり込むプレートが地球のマントルへ下りていく地点の約 125 km 上にある在来の火山地帯に出現する方が、HLW 処分場に適した非火山地帯に比べて確率が 1000 倍以上大きい。これらの要因を考え合わせると、HLW 地層処分場を貫通する火山が出現する全体的な可能性は、保守的に見ても年間 3×10^{-10} （百億年に三つ）に満たないと推定される。

4.3 放射性ソースターム

本調査では、1000 個の廃棄物パッケージが火山活動によってつぶれた場合の影響について検討する（MAR と DR の積が 1000）。

本調査研究での評価は噴火の火柱の一部となる放射性物質の放射線学的影響のみを検討する。噴火の火柱はガラス固化体で放射能汚染されたガラスの破片のごく一部を対流圏と下部成層圏へ吹き上げる。

空气中放出係数（ARF）は、火山が処分場にどのような影響を与えるか、また廃

棄物パッケージが埋設されてからの年数とどのような関係があるかによって決まる。本調査研究の分析では、吸入可能な空中浮遊物質の係数として保守的な0.01という数値を、影響を受ける廃棄物インベントリに適用する。この数値は地球規模で拡散する粉塵となる微粒岩屑についてToon他が使用したマイクロメートル以下の粒子に対する粉塵生成係数⁽⁵⁾より10倍も大きい。

4.4 処分場に対する火山の影響の大きさ

放射性核種の大気中への拡散特性は、火山噴火の特徴並びにいくつかの地球規模の要因の影響を受ける。単純化のために、吸入可能な空中浮遊の放射性粒子の100%が地球の対流圏に均等に分布する場合の放射能被曝を計算する。

不確実性の原因は大気圏に入ったあとの放射性粒子の拡散特性と滞留時間にある。大量の非放射性物質に凝集された放射性粒子のほとんどは、指数的に、最初の年に降下すると予想される。本調査研究で分析するケースでは、被曝を一年の間に降下する粒子の線形比率に基づいて保守的に計算する。

放射性核種の初期濃度に基づき、RSACコンピュータ・コード⁽³⁾を使って放射能被曝を計算した。世界の人口を59億人、放射能を被曝しない場合に生涯の間に癌死する平均確率を20%と想定すると、放射性核種を吸入した場合の追加の癌死率は0.00006%となる。つまり、生涯の間に癌死する合計確率は20.00006%となる。非放射線学的影響は、警告を発する時間と人口密度によって異なる。比較のために言えば、爆風によって死亡する人は1000人だが、世界規模の作物の不作に起因する飢餓による死者は80,000人を越えると想定される（表2のタンボラ山噴火のような場合）。

5. 天体の衝突

5.1 H L W処分場がない場合の天体衝突の影響

5.1.1 リスクと衝突体の大きさとの関係

小さな物体（流れ星か火球）は大気圏上層でエネルギーを使い切り、地上には直接的影響を与えない。突入する物体が直径約 10 m より大きい場合のみ、人間に何らかの危険を与えるようになる。便宜上、衝突体の大きさ（即ち、運動エネルギー）によりこの危険を大きく下記の三つに分類する。

分類 1（直径 10～100 m の衝突体）

：衝突体が地上に到達する前に分解する。運動エネルギーのほとんどは大気圏で使い切るが、局地的な影響を与える可能性がある。

分類 2（直径 100 m～1 km の衝突体）

：衝突体がクレーターを作るに十分な形で地上に到達する。まだ影響は局地的なものだが、酸化窒素と粉塵が遠隔地まで運ばれる可能性がある。海に落下すれば津波の危険がある。

分類 3（直径 1 km～5 km の衝突体）

：大きなクレーターを作るような衝突は、地球全体に拡散するに十分な粉塵を生成して、短期間地球気候を大幅に変え、また衝突した地域に破壊的な爆風をもたらす。

上記各分類の衝突体の限界サイズは、衝突体の密度、強度、衝突速度および衝突場所の特性に左右される。特に地球規模の影響を与えるものの限界サイズはよく定義されていない。

5.1.2 リスク分析

(1) 各種サイズの衝突の頻度

天体の衝突のリスクに対処するためには、まず規模の異なる事象の頻度を評価する必要がある。小規模な衝突の頻度は大規模なものに比べてずっと多い。論議のために、二つのケースを検討する。上で論じた地球規模の災害をもたらす限界のサイズの衝突（分類 3 クラス）と、比較のために直径が 100 m 前後のもっと小

さな物体によるツングスカ級の衝突（分類1（～2）クラス）の二つである。以下の計算で使う数値は、一般的な規模を説明するのに使われる推定値で、2倍未満0.5倍以上の不確実性を考慮に入れている。

地球規模の破滅的な影響をもたらす衝突：

衝突の平均的間隔：500,000年

ツングスカ級の衝突：

衝突の平均的間隔（地球全体で）300年

衝突の平均的間隔（人が住む地域）：3,000年

衝突の平均的間隔（都市部）：100,000年

(2) 衝突により人が死亡する年間リスク

このリスクに対処する一つの方法は、衝突の結果として人が年間当り死亡する確率によってこのリスクを表すことである。この年間死亡確率は、(a) 衝突が発生する確率と (b) そういう事象が誰か人を死亡させる確率、の積である。

地球規模の破滅的な影響をもたらす衝突：

衝突の平均的間隔（地球全体で）：500,000年

年間衝突確率：1/500,000

衝突による想定死亡率：地球全人口の1/4

個人の死亡確率：1/4

個人の年間死亡確率：1/2,000,000

ツングスカ級の衝突：

衝突の平均的間隔（地球全体で）：300年

年間衝突確率：1/300

衝突により全員が死亡する地域：5,000 km²

個人の死亡確率：1

地球の総面積：5 × 10⁸ km²

個人の年間死亡確率：1/30,000,000

従って年間に直したリスクは、大規模な衝突の方がツングスカ級の衝突より約15倍大きい。

5.2 H L W処分場がある場合の天体衝突の影響

5.2.1 事象の発生可能性

前述のNASAの分析を使うと、分類3の物体が処分場の近くに衝突する可能性を計算できる。単純化のために、1～2 kmの限界的直径の天体がH L W地層処分場から5 km以内に衝突すれば、埋設された放射性物質が大気圏に放出されると想定する。地球のどこかに年間 2×10^{-6} の頻度で衝突するという想定を使えば、処分場を中心とする直径10 kmの円の中に分類3の天体が衝突する可能性は下記のようになる。

$$\begin{aligned} P_{HLW} &= (2 \times 10^{-6}) \times (\text{目標地域の面積}) / (\text{地球の総面積}) \\ &= (2 \times 10^{-6}) \times (78.5) / (5 \times 10^8) \\ &= 3 \times 10^{-13} / \text{年} \end{aligned}$$

ここで P_{HLW} は直径1～2 km（地球規模の事象を起こす限界サイズ）の天体がH L W地層処分場を中心とする直径10 kmの円の中に衝突する確率を表す。

5.2.2 放射性ソースターム

放射性ソースタームを求める場合、天体の衝突が処分場にどれだけ近いか、および廃棄物パッケージの深さに比べてクレーターの深さがどれだけあるかによってダメージを受ける比率が違ふ。天体衝突シナリオの場合は火山噴火シナリオの場合と比べてダメージを受ける比率が大きくなると判断されるため、ソースタームが後者より多くなる。火山噴火シナリオで想定する廃棄物パッケージの数は1000個だけだが、天体衝突シナリオでは50,000個の廃棄物パッケージを想定する。

処分場の形状の不確実性と処分場にどんなダメージを与えるかに関する不確実性のため、空气中放出係数と吸入可能な部分に当てはめるべき数値にも非常に大きな不確実性が残る。本調査研究の分析では、廃棄物全体のインベントリに対して吸入可能な空气中放出係数を0.1と想定する〔空气中放出係数（ARF）と漏出経路係数（LPF）を組み合わせると、保守的な数値と判断される〕。単純化のために、吸入可能な空中浮遊の放射性粒子の100%が地球の対流圏に均等に分布する場合の放射能被曝を計算する。

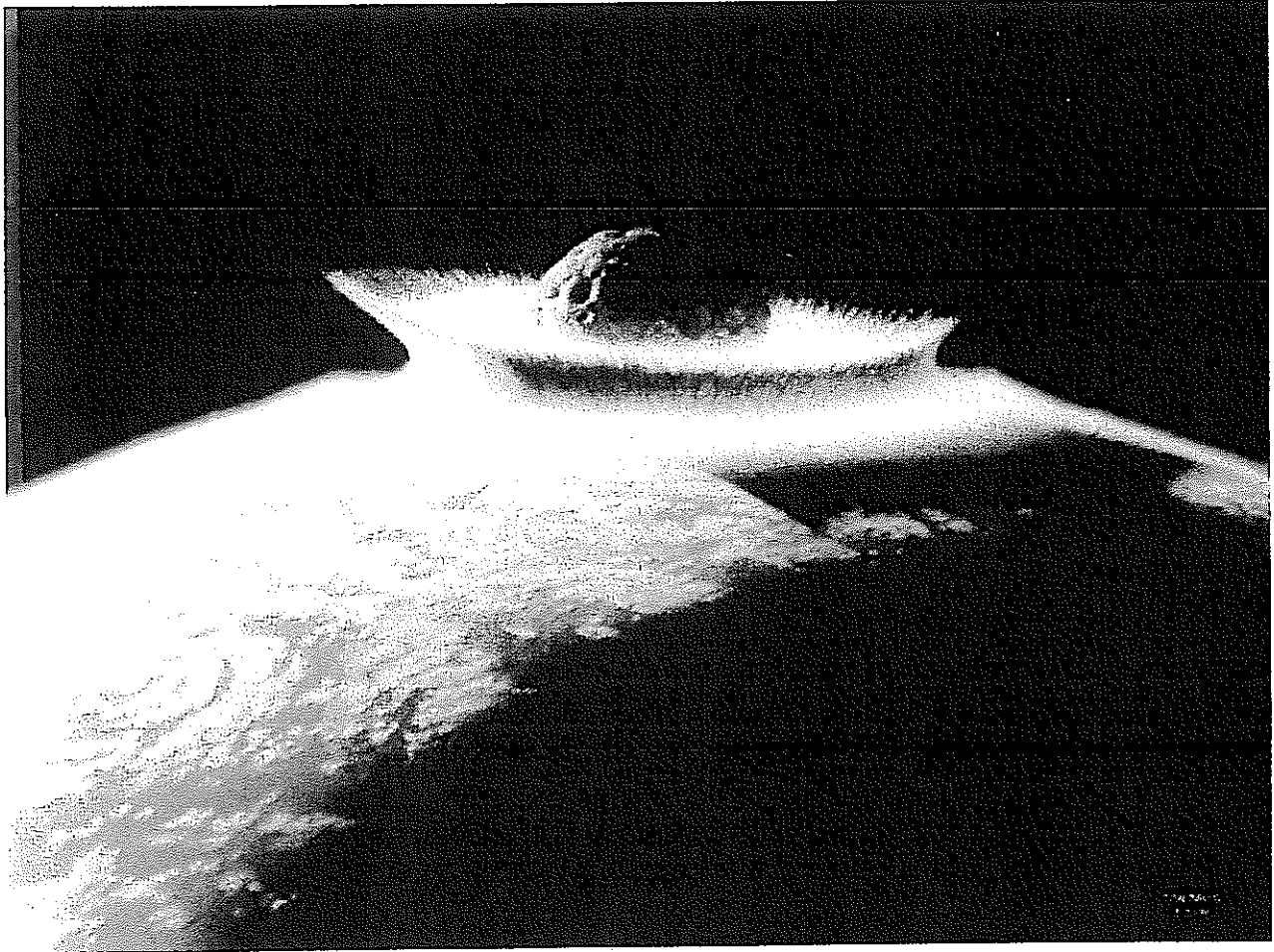


図4 地球に巨大な隕石が衝突した瞬間を描いた画家ドン・デイビスの絵
(NASA提供)

5.2.3 天体衝突の影響

H L W地層処分場に巨大な天体が衝突した場合の限界的影響として考えられるのは、(1)処分場が破壊される、(2)天体衝突による爆風、地震、津波、膨大な熱放射による大規模な火災が直径約 1000 kmの範囲にある全生命体を死滅させる⁽⁵⁾、(3)衝突によるクレーターの中の放射性廃棄物の一部と数km³の物質が蒸発する、(4)粒子が細かい粉塵となって対流圏と成層圏に拡散する、(5)衝突後1年間、粒子が日光を遮蔽し、地球上の気温が低下し、世界の人口の4分の1が飢餓その他気候関連の事象によって死亡する、である。

不確実性の原因は大気圏に入ったあとの放射性粒子の拡散特性と滞留時間にある。本調査研究で分析するケースでは、被曝を一年の間に降下する粒子の線形比率に基づいて保守的に計算する。

放射性核種の初期濃度に基づき、R S A Cコンピュータ・コード⁽³⁾を使って放射能被曝を計算した。世界の人口を 59 億人、放射能を被曝しない場合に生涯の間に癌死する平均確率を 20%と想定すると、放射性核種を吸入した場合の追加の癌死率は 0.03%となる。つまり、生涯の間に癌死する合計確率は 20.03%となる。天体の衝突に起因する約 15 億人の死亡のうち、処分場の放射性核種による放射能被曝が原因となるのは1%の1/5未満である。

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。

第 3、4、5 章で紹介した H L W 地層処分場に対する活断層、火山噴火、天体衝突の影響に関する分析に基づき、日本におけるほとんど起こり得ない事象による 100,000 人当たりの死亡者数を想定し、それをその他の事故で報告された事故死の数と比較した。各事象による死亡率、並びにほとんど起こり得ない各事象の合計死亡率に対する「日本のその他事故」による死亡率の比率を表 3 に要約した。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で死亡する率よりも、「普通の」事故で死亡する率が 10 万～100 億倍 も多いことを示している。

本分析は保守的なものとする（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ほとんど起こり得ない事象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。

表 3 日本におけるほとんど起こり得ない事象と
その他事故による期待死亡率

事象の種類	非放射線学的影響による十万人あたりの期待死亡率	放射線学的影響による十万人あたりの期待死亡率	日本で事故により死亡する可能性の最も高い回数
活断層	1.0E-04	3.6E-06	2.6E+05
火山噴火	4.1E-10	1.8E-11	6.3E+10
天体衝突	7.5E-09	8.9E-12	3.6E+09
その他事故	27	ほぼ 0	—

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活断層／地震活動、火山活動、隕石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。

今後の課題としては、

① 隆起・侵食、気候変動、人間侵入を発端事象とする直接放出シナリオのリスク評価

② 静学的評価方法から動学的評価方法への展開

が指摘される。

参 考 文 献

- (1) PNC: 「A Study on Scenario Development for Waste Disposal Performance Assessment (Ⅲ)」 PNC ZJ1222 91-002 (1991) .
- (2) PNC: 「A Study on the Scenario Development for Waste Disposal Performance Assessment in Japan (Ⅳ), Stochastic Assessment of Human Activity」 PNC ZJ1222 92-001 (1992) .
- (3) D. Wenzel:「The Radiological Safety Analysis Computer Program」WINCO-1123 February(1994).
- (4) J. Mishima et al.: 「Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for NonReactor Nuclear Facilities」 DOE Handbook,DOE-HDBK-3010-94, December (1994) .
- (5) O.B. Toon, et al.: 「Environmental Perturbations caused by the Impacts of Asteroids and Comets」 Reviews of Geophysics, February (1997) .
- (6) D. Slaughterbeck: 「Assessment of Extremely Unlikely Events at a Hypothetical High Level Waste Repository」 SAIC-0155-97-31 with its supplement(1997).

Research Study for Extremely Unlikely Scenario
of High Level Waste Disposal

(Summary)

(REPORT ON RESULT OF PNC-COMMISSIONED RESEARCH)

March, 1997

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, Japan

Research Study for Extremely Unlikely Scenario of High level Waste Disposal

Hiroo Ohkubo*

Abstract

In this research, each event and process relevant to the key works (or scenario initiator) such as active fault/ seismic activity, huge meteorite, volcanic activity, have been identified and the catastrophic scenario, which inspires ordinary people to have tremendous concern, has been analyzed.

Based upon the characteristic events and process 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. :080D0331

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

大久保博生*

要 旨

本研究では、まず、活断層／地震活動、大隕石、火山活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：080D0331

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 Uncertainties	6
3 Active Fault	7
3.1 Active Fault Event Scenario	7
3.2 Event Likelihood	8
3.3 Radioactive source Term	9
3.4 Event Consequences	9
3.4.1 Radiological Impacts.....	9
3.4.2 Non-Radioactive Impacts.....	10
4 Volcano	12
4.1 Scenario due to Volcanism	15
4.2 Event Likelihood	15
4.3 Radioactive Source Term	16
4.4 Consequences of Volcano at Repository	16
5 Cosmic Impacts	18
5.1 Cosmic Impacts Without Involvement of HLW Repository	18
5.1.1 Relationship of Risk to Size of Impactor.....	18
5.1.2 Risk Analysis.....	19
5.2 Cosmic Impacts with Involvement of HLW Repository	20
5.2.1 Event Likelihood.....	20
5.2.2 Radioactive Source Term.....	21
5.2.3 Consequences of Cosmic Impact.....	23

6 Interpretation of Results 24
Afterword 27
References 29

CONTENTS OF TABLES

Table 1	Historical Earthquakes in Japan.....	11
Table 2	Characteristics of Selected Worldwide Volcanoes.....	14
Table 3	Expected Death Rates from Extremely Unlikely Events and from Other Accidents in Japan	24

CONTENTS OF FIGURES

Figure 1	Schematic Diagram Depicting Postulated Active Fault Scenario	7
Figure 2	Logic Diagram Illustrating Conditions That Could Lead to Fault Movement in an Underground Geologic HLW Disposal Facility	8
Figure 3	Explosive Eruption of Sakurajima Volcano Showing Lightning Discharges	13
Figure 4	Artist Don Davis's Depiction of a Huge Meteorite Striking the Earth	22

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, 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 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 or great seismic events. Either of these would be extremely unlikely given the thorough evaluations conducted during repository siting. Site selection excludes those places close to active faults or volcanic activity. While extremely unlikely, it is possible that new faults could develop or that magma could intrude 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⁽¹⁾. Repository destruction could also be postulated by intrusion of future human generations in a variety of scenarios⁽²⁾. If we reflect back on cultures of several thousand years ago, one can reasonably 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. The extremely unlikely events just discussed are the subject of this research in which the consequences are evaluated regardless of the low probability of occurrence.

2. Methodology

Assessment of the potential risks associated with extremely unlikely events requires determination of the consequences and the likelihood of such events. The consequences are predicted for both radiological and non-radiological events and the likelihood is estimated from 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, the fraction of the damaged inventory that becomes airborne, and the fraction of the airborne material that reaches the atmosphere. For a puff release, this can be written in equation form as:

$$S = MAR \times DR \times ARF \times LPF$$

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, the equation becomes:

$$S = MAR \times DR \times ARR \times LPF$$

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⁽³⁾ was selected for assessment of radiological impacts from events involving a small region and was also used for assessment of events potentially involving a large region or a region with global implications. 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.

2.2 Non-Radiological Consequences

In addition to radiological consequences, extremely unlikely events related to volcanism, great seismic events, and cosmic impacts also have non-radiological consequences. Estimates of the consequences of such events are based on world-wide records of similar experiences. The consequences 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. A large amount of information has been developed relating to the frequency of occurrence of extremely unlikely events. Studies of potential seismic, volcanic, and meteorite events in Japan have been previously considered⁽¹⁾.

2.4 Uncertainties

Uncertainties exist in both the assessment of consequences from extremely unlikely events and the assessment of likelihood of extremely unlikely events. Most of the uncertainty associated with radiological consequences relates to the amount of radioactive material released. Additional uncertainty in radiological consequences results from radioactive material transport assumptions that depend on meteorological conditions. Uncertainties in non-radiological consequences result from limited data for statistical analysis of effects from large earthquakes, volcanoes, and meteor impacts. Uncertainties in the likelihood exist because we have comparatively few examples of extremely unlikely events from which to extrapolate to a given site. These factors are judged to cause uncertainties of at least one order of magnitude in risk.

3. Active Fault

3.1 Active Fault Event Scenario

It is postulated that a geologic HLW repository is sited in a location where movement of an active fault (or the formation of a new fault) causes failures of emplaced waste packages and provides for a direct leak path through the fault to the atmosphere. A simplified schematic diagram of the accident scenario is shown in Figure 1.

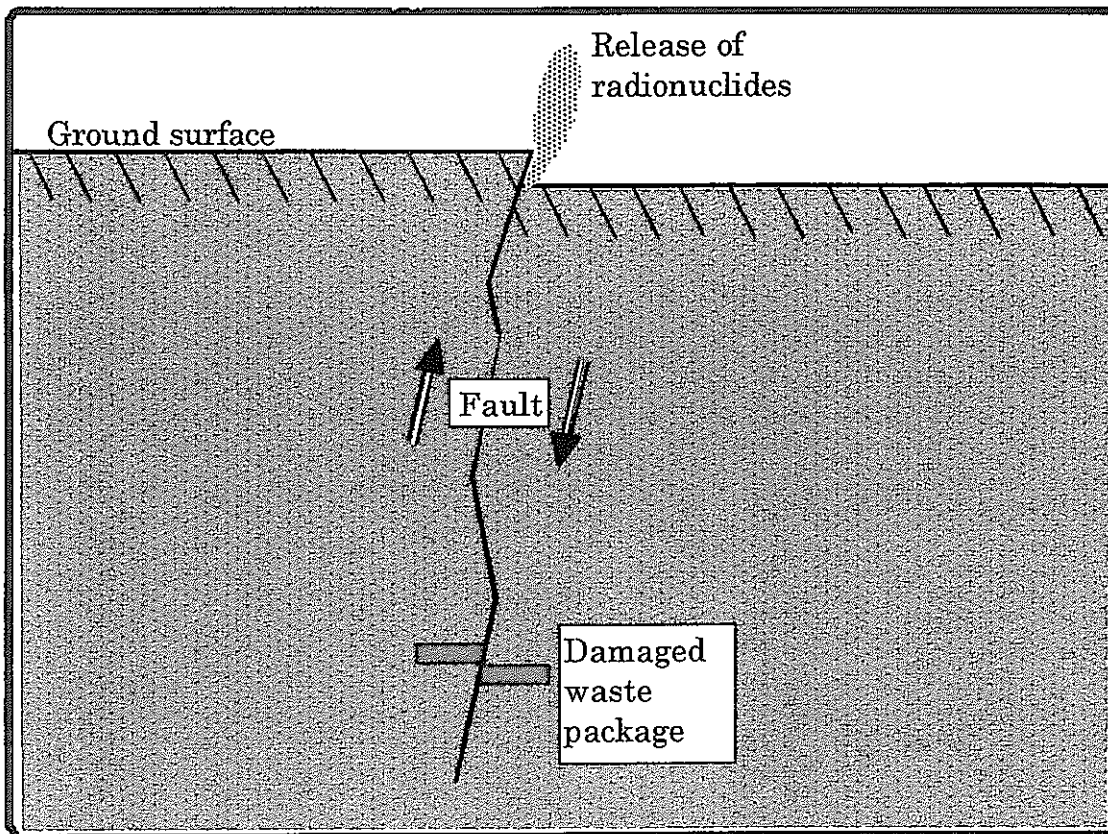


Figure 1 Schematic Diagram Depicting Postulated Active Fault Scenario

(Not to scale, actual depth of emplaced waste packages would be several hundred meters.)

3.2 Event Likelihood

The principal factors that influence the likelihood of fault movement are illustrated in the logic diagram shown in Figure 2.

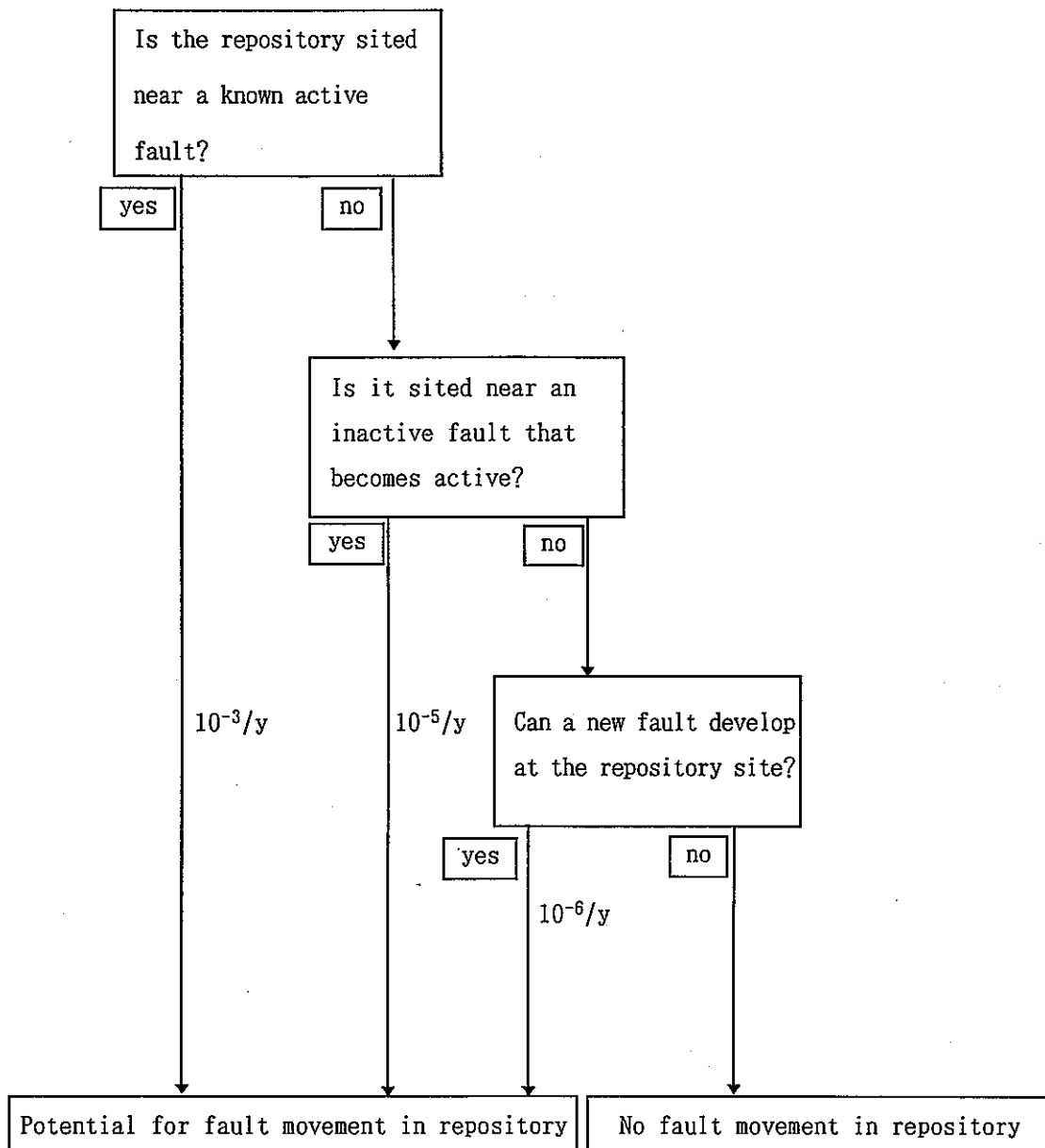


Figure 2 Logic Diagram Illustrating Conditions That Could Lead to Fault Movement in an Underground Geologic HLW Disposal Facility

The number of waste packages that could be damaged by the active fault depends on the total number of waste packages and the repository configuration. The present study investigates the impact of having 1000 waste packages crushed by the fault movement.

3.3 Radioactive Source Term

The product of the MAR and DR involves 1000 waste packages. Using the methods of Mishima⁽⁴⁾, the pulverized fraction of solids can be estimated by:

$$PULF = A \rho g h$$

where:

PULF = fraction pulverized to 10 μ m or less

A = empirical correlation, 2E-11 cm³ per g-cm²/s²

ρ = specimen density (g/cm³)

g = gravitational acceleration (980 cm/s² at sea level)

h = equivalent drop height (cm)

The total airborne release to the underground fault boundary is estimated to be about one gram per hour from 1000 fractured waste packages.

Perhaps the most uncertain parameter is the leak path factor (LPF) which would depend on the configuration of the repository as well as the characteristics of the fault and openings to the ground surface.

For the present analysis, a very conservative leak path factor of 0.1 is assumed and the resulting source term is 0.1 g/hr.

3.4 Event Consequences

3.4.1 Radiological Impacts

For radiological impacts, estimates are made of the radiological exposures in terms of the increased risk of a fatal cancer of a maximally exposed individual at various distances from the release point. The analysis

assumes 1000 year old waste packages and conservative meteorological conditions(stagnant). For purposes of comparison, an individual without radiological exposure from a nuclear accident has about one chance in five(20 percent)of developing a fatal cancer in their lifetime.

For a maximally exposed person such as a facility worker who stays at a location 100m from the release point for 8 hours before evacuation, the lifetime risk of developing a fatal cancer increases from 20 percent to 20.1 percent. A maximally exposed person who stays at a location 1km from the release point for 8 hours before evacuation increases the lifetime risk of developing a fatal cancer from 20 percent to 20.001 percent.

At 10km from the release point, a maximally exposed person may spend a full year and increase the lifetime risk of developing a fatal cancer from 20 percent to 20.06 percent. At 100km from the release point, a maximally exposed person may spend a full year and only increase the lifetime risk of developing a fatal cancer from 20 percent to 20.004 percent. If a population center of 1 million people were exposed at 100km from the release point, an additional 40 fatal cancers could occur in the lifetime of the exposed population as a result of the radiological exposure. These values suggest that the radiological risk from a seismically-induced direct release of radioactive materials to the atmosphere is small.

3.4.2 Non-Radioactive Impacts

The non-radiological impacts of a great earthquake include financial loss and interruptions in basic services as well as loss of life. To compare with the radiological risks, estimates of potential loss of life are examined.

As shown in Table 1, data from 1900 to 1990 indicate there have been eight earthquakes in Japan that have caused 1000 or more deaths. Based on these records, a large earthquake could be fatal to several thousand people. For purposes of the present research, 1000 deaths are believed a more credible estimate because improved construction techniques and seismic

design help to limit the number of deaths as compared to the historical record.

Table 1 Historical Earthquakes in Japan
(from United States Geological Survey)

Date	Location	Deaths	Magnitude	Comments
1923	Tokyo-Yokohama	143,000	8.3	Great Tokyo Fire
1927	Tango	3,020	7.9	
1933	Sanriku	2,990	8.9	
1943	Tottori	1,190	7.4	
1944	Tonankai	1,000	8.3	
1945	Mikawa	1,900	7.1	
1946	Tonankai	1,330	8.4	
1948	Fukui	5,390	7.3	

4. Volcano

Over half of the world's volcanoes are along the Pacific "ring of fire" and about 10 percent of all of the world's volcanoes are in the Japanese Island chain. In February 1997, the Volcano Research Center at the University of Tokyo listed eight ongoing and recent volcanic eruptions in or near Japan: Sakurajima (see Figure 3), Suwanose-Jima, Fukutoku-Okanoba (submarine), Me-Akan, Adataru, Kuju, Hokkaido-Komagatake, and Unzen. Kikai, one of the world's four magnitude 7 (Volcanic Explosivity Index) volcanoes in the last 10,000 years, occurred in Japan in 4350 BC. Characteristics of selected worldwide volcanoes and their magnitudes are listed in Table 2.

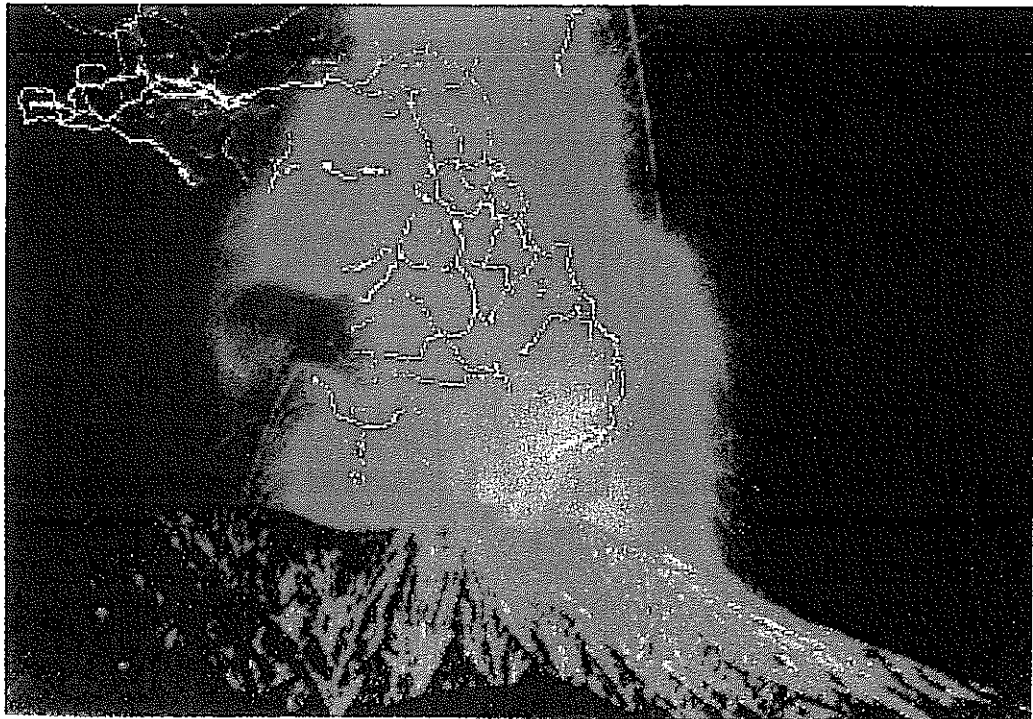


Figure 3 Explosive Eruption of Sakurajima Volcano Showing Lightning Discharges (from Sakurajima Volcanological Observatory (SVO))

Table 2 Characteristics of Selected Worldwide Volcanoes

(listed chronologically)

Eruption	Place	Year	VEI ^a	Comments
Toba	Indonesia	71000 BC	8	Last magnitude 8 volcano. Earth's temperature plunged 12C, and may have initiated an ice age
Crater Lake	Oregon, USA	4900 BC	7	
Kikai	Japan	4350 BC	7	
Vesuvius	Italy	79	5	Most famous and powerful eruption in 79 AD claimed over 3000 fatalities
Baitoushan	China/Korea	1050	7	
Fuji	Japan	1707	5	No larger volcano has occurred in Japan since this eruption
Unzen	Japan	1792	3	15,000 fatalities (most from a tsunami), also active in 1991, killing 44
Tambora	Indonesia	1815	7	Last magnitude 7 volcano, killed 10,000 in blast and caused crop failure and famine for total of 92,000 fatalities. Known as the "year without a summer"
Krakatua	Indonesia	1883	6	Total of 36,000 fatalities, about 30,000 were from a tsunami
Mount Saint Helens	Washington, USA	1980	5	58 fatalities, 1.2 billion dollars in damage
Pinatubo	Philippines	1991	6	932 fatalities, quarter of a million people evacuated, earth's temperature decrease 0.5C

^a Volcanic Explosivity Index, a composite method of measuring volcanic magnitudes: 0-non-explosive, 1-gentle, 2-explosive, 3-severe, 4-cataclysmic, 5-paroxysmal, and >6-colossal

4.1 Scenario due to Volcanism

We postulate that a geologic HLW repository is sited in a location where volcanic events cause failures of emplaced waste packages and provide for a direct path to the atmosphere.

Because this research is driven by the public perception of a large volcanic event emerging through a geologic HLW repository, the potential radiological consequences are evaluated for a single volcano with a volcanic blast, an eruption column, and pyroclastic flows. Such phenomena are characteristic of the large volcanoes with orogenic magma intrusions (high water, high silica) located around the Pacific "ring of fire."

4.2 Event Likelihood

If one assumes there are about 60 active volcanoes in Japan and each of these emerged within the last 30,000 years, then the probability of the emergence of a new volcano somewhere in Japan would be forecast at 2×10^{-3} per year. This probability is conservative because some of the 60 active volcanoes are submarine and because some volcanoes are much older than 30,000 years. If one assumes (for the moment) an emerging volcano is randomly distributed within Japan and is within a circle 8km in diameter that also contains the HLW repository, the conditional probability of the volcano emerging in the circle is the area of the circle (about 50 km^2) divided by the area of Japan (about $380,000 \text{ km}^2$) or about 1.3×10^{-4} . But we know such events are not randomly distributed. A new volcano is at least 1000 times more likely to emerge in traditional volcanic zones that are about 125km above the location where the subducting plate descends into the earth's mantle than in a non-volcanic area suitable for a HLW repository. Combining these factors, the overall likelihood of a volcano emerging through a geologic HLW repository is conservatively estimated at less than 3×10^{-10} per year.

4.3 Radioactive Source Term

The present study investigates the impact of having 1000 waste packages destroyed by the volcanic eruption (product of the MAR and DR is 1000).

The current assessment only considers the radiological impacts of the radioactive materials that are part of the volcanic eruption column. The eruption column carries traces of radiologically contaminated glass fragments from the vitrified waste into the troposphere and lower stratosphere.

The airborne release factor (ARF) depends on how the volcano affects the repository as well as the age of the emplaced waste packages. For the present analysis, a respirable airborne release factor of 0.01 is conservatively applied to the affected waste inventory. This value is 10 times larger than the dust production value for submicrometer particles used by Toon, et al. for pulverized rock that results in globally distributed dust⁽⁵⁾.

4.4 Consequences of Volcano at Repository

The dispersion characteristics of radionuclides in the atmosphere depend on the characteristics of the volcanic eruption as well as a number of global factors. For simplicity, the radiological exposures are calculated for a case with 100% of the respirable airborne radioactive particles uniformly distributed over the earth's troposphere.

A source of uncertainty lies in the diffusion characteristics and residence time of the radioactive particles once in the atmosphere.

Because of agglomeration with the tremendous mass of non-radioactive materials, one would expect most of the radioactive particulates to fallout exponentially during the first year. For the case analyzed here, exposures are conservatively calculated for a linear rate of particulate fallout over the course of a year.

Based on the initial radionuclide concentrations, radioactive exposures were calculated with the RSAC computer code⁽³⁾. Assuming a world population of 5.9 billion people, and an average lifetime risk of developing a fatal cancer of 20 percent without the radioactive exposure, individuals would have an excess cancer rate caused by inhalation of radionuclides of about 0.00006 percent, or a total lifetime risk of developing a fatal cancer of 20.00006 percent. Non-radiological impacts could vary depending on the warning time and population distribution. For comparative purposes, it is assumed that 1000 people are killed by the blast and that 80,000 more people die from famine caused by world-wide crop failures(similar to the Tambora eruption, Table 2).

5. Cosmic Impacts

5.1 Cosmic Impacts without Involvement of HLW Repository

5.1.1 Relationship of Risk to Size of Impactor

Small impacting objects--the meteors or fireballs--dissipate their energy in the upper atmosphere and have no direct effect on the ground below. Only when the incoming projectile is larger than about 10m diameter does it begin to pose some hazard to humans. The hazard can be conveniently divided into three broad categories that depend on the size or kinetic energy of the impactor:

Category 1(10m to 100m diameter impactors)

: Impacting body generally is disrupted before reaching the surface; most of its kinetic energy is dissipated in the atmosphere resulting in potential local effects.

Category 2(100m to 1km diameter impactors)

: Impacting body reaches ground sufficiently intact to make a crater; effects are still chiefly local, although nitric oxide and dust can be carried large distances, and there will be a tsunami if the impact is in the ocean.

Category 3(1km to 5km diameter impactors)

: Large crater-forming impact generates sufficient globally dispersed dust to produce a significant, short-term change in climate in addition to devastating blast effects in the region of impact.

The threshold size of an impacting body for each category depends on its density, strength, and velocity as well as on the nature of the target. The threshold for global effects, in particular, is not well determined.

5.1.2 Risk Analysis

(1) Frequency of impacts of different sizes

To address the risk of cosmic impacts, an assessment of the frequency of events of different magnitudes is first considered. Small impacts are much more frequent than large ones. For purposes of discussion, two cases are considered: The threshold globally catastrophic impact discussed above (category 3), and for comparison, a Tunguska-class impact from a smaller object perhaps 100m in diameter (category 1 (~2)). In the calculations given below, the values are estimates used to illustrate the general magnitudes involved and uncertainties of a factor of two are acknowledged.

For the globally catastrophic impact:

Average interval between impacts: 500,000 years

For the Tunguska-class impacts:

Average interval between impacts for total Earth: 300 years

Average interval between impacts for populated area of Earth:

3,000 years

Average interval between impacts for world urban areas:

100,000 years

(2) Annual risk of death from impacts

One way to address the risk is to express that risk in terms of the annual probability that an individual will be killed as a result of an impact. This annual probability of mortality is the product of (a) the probability that the impact will occur and (b) the probability that such an event will cause the death of any random individual.

For the globally catastrophic impact:

Average interval between impacts for total Earth: 500,000 years

Annual probability of impact: 1/500,000

Assumed fatalities from impact: one-quarter of world population

Probability of death for an individual: 1/4

Annual probability of an individual's death: 1/2,000,000

For the Tunguska-class impact:

Average interval between impacts for total Earth: 300 years

Annual probability of impact: 1/300

Assumed area of devastation and total mortality from impact:

5,000km²

Probability of death for an individual: 1

Area of Earth: 5x10⁸km²

Annual probability of an individual's death: 1/30,000,000

The annualized risk is therefore about 15 times greater from the large impact than from the Tunguska-class impact.

5.2 Cosmic Impacts with Involvement of HLW Repository

5.2.1 Event Likelihood

Using the NASA analysis above, the likelihood of a Category 3 object impacting near a repository can be calculated. For simplicity, if a cosmic object with a threshold diameter of 1 to 2km impacts within 5km of the geologic HLW Repository, emplaced radioactive materials are assumed to be released to the atmosphere. Using a frequency of 2x10⁻⁶ strikes per year for anywhere on Earth, the likelihood of a Category 3 object impacting a particular 10km diameter circle centered over the repository is:

$$\begin{aligned}
P_{HLW} &= (2 \times 10^{-6}) (\text{target area}) / (\text{Earth area}) \\
&= (2 \times 10^{-6}) (78.5) / (5 \times 10^8) \\
&= 3 \times 10^{-13} \text{ per year}
\end{aligned}$$

where P_{HLW} represents the probability of a cosmic object 1 to 2km in diameter (threshold for global events) striking within a 10km diameter circle centered over the geologic HLW repository.

5.2.2 Radioactive Source Term

When determining the radioactive source term, the damage ratio depends on how close the cosmic impact is to the repository and how deep the impact crater is compared to the depth of the waste packages. The source term for the cosmic impact scenario is greater than the source term for the volcanic eruption scenario because the damage ratio is judged to be greater. The cosmic impact scenario assumes that 50,000 waste packages are damaged while the volcanic eruption scenario assumes only 1000 waste packages.

Because of uncertainties in the configuration of the repository and uncertainties in the type of damage to the repository, there is also a very large uncertainty as to the appropriate values for airborne release factors and respirable fractions. For the present analysis, a respirable airborne release factor of 0.1 (combined airborne release factor, ARF, and leak path factor, LPF, judged to be conservative) is applied to the entire waste inventory.

For simplicity, the radiological exposures are calculated for a case with 100% of the respirable airborne radioactive particles uniformly distributed over the Earth's troposphere.

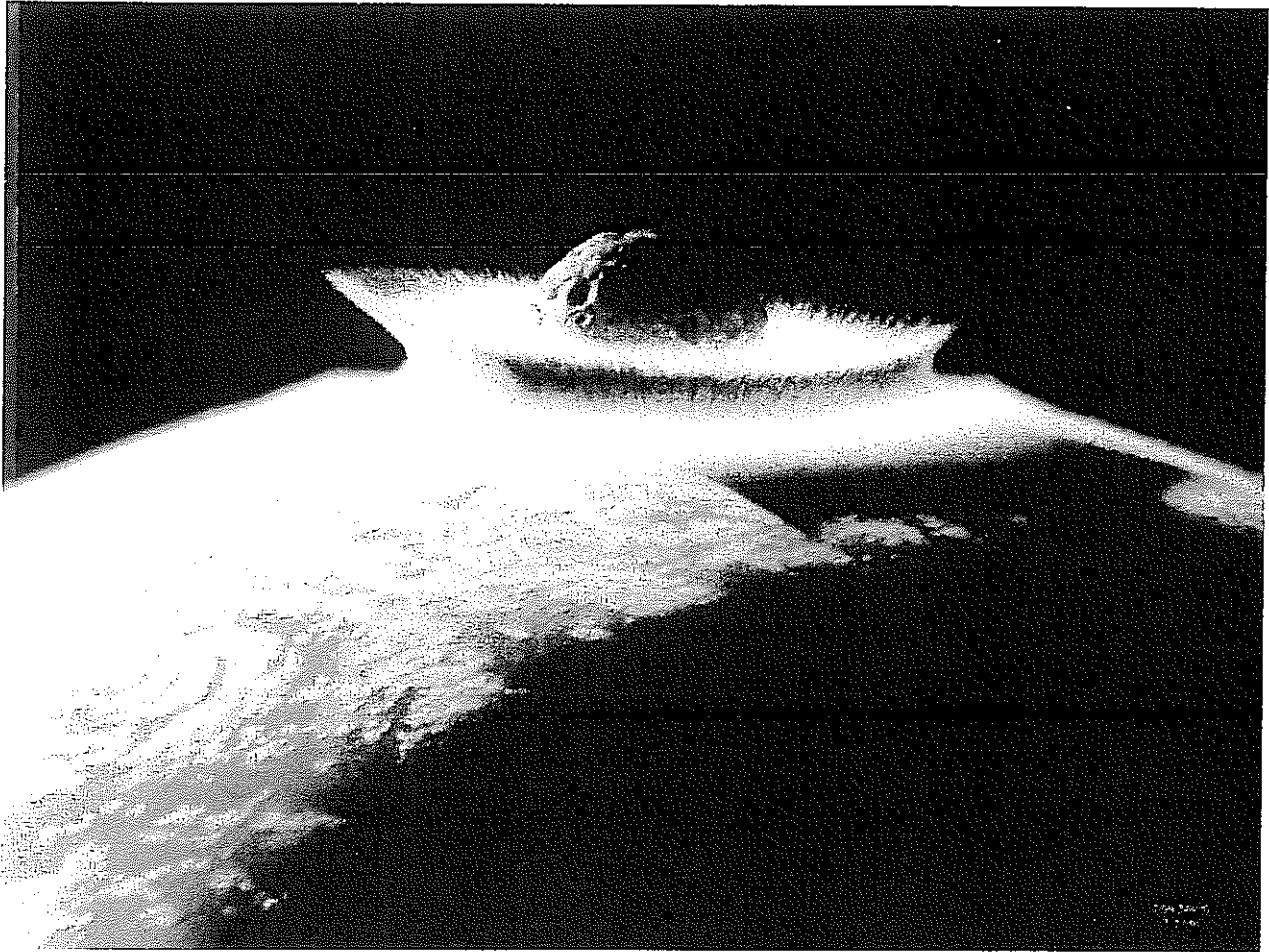


Figure 4 Artist Don Davis's Depiction of a Huge Meteorite Striking the Earth(Courtesy National Aeronautics and Space Administration (NASA))

5.2.3 Consequences of Cosmic Impact

The bounding consequences of a large cosmic impact at a HLW geologic repository are assumed to be (1)the repository is destroyed, (2)blast damage, earthquakes, possible tsunamis and extensive wild fires ignited by the enormous thermal radiation from the cosmic impact destroys all life forms within a diameter of about 1000km⁽⁵⁾, (3)portions of the radioactive waste and several cubic kilometers of materials in the impact crater are vaporized, (4)particulates are dispersed to the troposphere and stratosphere as small dust particles, (5)the particulates block sunlight and reduce the temperature of the Earth in the year following the event resulting in the death of one quarter of the world's population from starvation and other weather-related events.

A source of uncertainty lies in the diffusion characteristics and residence time of the radioactive particles once in the atmosphere.

For the case analyzed here, exposures are conservatively calculated for a linear rate of particulate fallout over the course of a year.

Based on the initial radionuclide concentrations, radioactive exposures were calculated with the RSAC computer code⁽³⁾. Assuming a world population of 5.9 billion people and an average lifetime risk of developing a fatal cancer of 20 percent without the radioactive exposure, individuals would have an excess cancer rate caused by inhalation of radionuclides of about 0.03 percent or a total lifetime risk of developing a fatal cancer of 20.03 percent. Of the nearly 1.5 billion deaths caused by the cosmic impact, less than two-tenths of 1 percent would be attributable to radioactive exposures from radionuclides in the repository.

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

Based on the analyses presented in Chapters 3, 4, and 5 for active fault movement, volcanism, and cosmic impacts at a HLW geological repository, the number of expected deaths per 100,000 people from extremely unlikely events was estimated and compared to the nominal accidental death rate reported for other accidents in Japan. The death rate from each event as well as the ratio of the death rate from "Other Accidents in Japan" to the sum of the death rates from each of the extremely unlikely events is summarized in Table 3. The last column in the table indicates that a Japanese individual is over 10^5 to 10^{10} times more likely to die from "normal" accidents than from the extremely unlikely events considered in this report.

Table 3 Expected Death Rates from Extremely Unlikely Events and from Other Accidents in Japan

Type of Event	Expected deaths per 100,000 people from Non-Radiological Impacts	Expected deaths per 100,000 people from Radiological Impacts	Times more likely to die from accidents in Japan
Active Fault Movement	1.0E-04	3.6E-06	2.6E+05
Volcanic Eruption	4.1E-10	1.8E-11	6.3E+10
Cosmic Impact	7.5E-09	8.9E-12	3.6E+09
Other Accidents in Japan	27	near 0	-

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 the extremely unlikely events considered herein are negligible compared to the everyday risks from accidents in Japan.

Afterword

We studied the accident scenarios (direct release scenarios) initiated by active fault/seismic activity, volcano and cosmic impacts on high-level radioactive waste (HLW) disposal sites 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.

The next matters are to be considered as

- ① risk analysis on the direct release scenario such as uplift/erosion, climatic change and human intrusion
- ② extension of this static representation of risk to a dynamic one.

References

- (1) PNC: 「A Study on Scenario Development for Waste Disposal Performance Assessment(III)」 PNC ZJ1222 91-002(1991).
- (2) PNC: 「A Study on the Scenario Development for Waste Disposal Performance Assessment in Japan(IV), Stochastic Assessment of Human Activity」 PNC ZJ1222 92-001(1992).
- (3) D.Wenzel: 「The Radiological Safety Analysis Computer Program」 WINCO-1123 February(1994).
- (4) J.Mishima et al.: 「Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for NonReactor Nuclear Facilities」 DOE Handbook, DOE-HDBK-3010-94, December(1994).
- (5) O. B. Toon, et al.: 「Environmental Perturbations caused by the Impacts of Asteroids and Comets」 Reviews of Geophysics, February(1997).
- (6) D.Slaughterbeck: 「Assessment of Extremely Unlikely Events at a Hypothetical High Level Waste Repository」 SAIC-0155-97-31 with its supplement(1997).