

地層処分の極限安全性 に関する研究(Ⅲ)

(核燃料サイクル開発機構 研究概要)

1999年2月

株式会社 三菱総合研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

地層処分の極限安全性に関する研究（Ⅲ）

大久保博生*

要 旨

本研究では、まず、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として、特に、火砕流を伴う中規模クラスの噴火活動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、ここで検討した火山活動シナリオの影響評価プロセス及び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核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：2000年レポートチーム 研究調整グループ

*株式会社 三菱総合研究所

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

Hiroo Ohkubo*

Abstract

In this research, first, event and process relevant to the key words (or scenario initiator) such as volcanism have been identified and, especially a middle-scale eruption scenario including pyroclastic flows has been analyzed as the catastrophic scenario, which inspires ordinary people to have tremendous concern.

Secondly, 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.

Finally, the process for assessing the consequence of volcanism scenario and its risk calculated by the model developed in the above have been visualized, and presented by comparing with other risks.

This work was performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : R&D Coordination Group, Geological Isolation Research Project

* Mitsubishi Research Institute, Inc.

目 次

	頁
1. はじめに	1
1.1 目的	1
1.2 背景	1
1.3 概要	2
2. 方法論	4
2.1 仮想的地層処分場	4
2.2 放射線学的影響	5
2.3 非放射線学的影響	5
2.4 発生可能性及び確率の評価	6
2.5 不確実性	6
3. 火山活動シナリオの評価	8
3.1 火山活動によるシナリオ	10
3.2 事象の発生可能性	10
3.3 処分場に対する火山の影響の大きさ	12
3.3.1 タンボラ級 (VEI=6~7) 噴火ケース ⁽³⁾	12
3.3.2 中規模 (VEI=3~5) 噴火ケース	13
4. 評価結果の可視化	24
4.1 リスク評価	24
4.2 他の原因による事故死率との比較	24
4.3 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の 相互比較	26
4.4 評価結果の可視化	28
5. おわりに	31
参考文献	33

表 目 次

	頁
表 3-1 世界の主要火山の特徴	9
表 3-2(1) 中規模火山噴火ケースにおける MAR, DR, ARF 及び RF	19
表 3-2(2) 中規模火山噴火ケースにおける放射性ソースターム	19
表 3-3 対象人口に対する平均 50 年間預託実効線量当量	23

目 次

	頁
図 1-1 世界の主要な構造プレート	3
図 3-1 1993 年 6 月 24 日、雲仙火山の火砕流	8
図 3-2 過去 2000 年間に於ける日本の火山噴火の規模とその発生頻度	10
図 3-3 過去数世紀に於ける各火山現象での死亡者数の割合	13
図 3-4 エナジーコーンモデルによる火砕流の到達危険区域予測	15
図 3-5 セントヘレンス火山周辺の惨害状況	16
図 3-6(1) 火砕流放出による風下方向への距離での 50 年間預託放射線線量 ..	22
図 3-6(2) 火柱放出による風下方向への距離での 50 年間預託放射線線量 ..	22
図 4-1 仮想的処分場真下の中規模火山噴火による死亡リスクと 1997 年の日本の他の死亡原因との比較	25
図 4-2 日本に於けるほとんど起こり得ない事象，長期的環境プロセスに よる期待死亡率	27
図 4-3 可視化フロー	29
図 4-4 (1) 放射性廃棄物の放出	30
図 4-4 (2) 放射線学的影響	30

1. はじめに

1.1 目的

地層処分の安全性は、処分システムの挙動を将来的に予測する性能評価によって判断される。しかし、性能評価の構造は、シナリオ解析、モデルとデータを組み合わせた影響解析等による複雑なものであるため、一般公衆や性能評価全体に係わらない個別の専門家にその内容をわかりやすく説明することが、国際的にも大きな課題となっている。特に、地下水シナリオには含まれない、活断層・地震、火山活動、人間活動等による直接的影響についてのシナリオの設定については、専門家の判断に依存する部分が多く、その考え方や評価方法が伝わりにくいことが問題である。

本研究の目的は、安全評価を行う専門家と一般公衆との認識のギャップを埋め、地層処分の安全性に対する理解を深めることである。

1.2 背景

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⁽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。

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（図 1-1 参照）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も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している。

1.3 概要

本研究は、活断層・地震、火山活動等、発生する確率は低いですが、処分場で発生した場合には生態圏への大規模な影響が危惧されるような極端なシナリオ（以下、極限シナリオ）について、具体的なイメージを明らかにするとともに、放射線学的リスク及び非放射線学的リスクについて、評価手法を検討し、解析を行うものである。また、極限シナリオに対する影響評価プロセスやその結果について、感覚的な理解を容易にするため、コンピュータグラフィックス等を利用して可視化を実施する。

本研究は、平成 8 年度から開始されており、これまでに放射線学的リスク及び非放射線学的リスクについて評価手法を検討し、前年度は人間侵入シナリオ、隆起・侵食シナリオ、気候変動シナリオに対するリスク評価を実施した。

本年度は、さらに火山活動のうち、特に火砕流を伴う中規模クラスの噴火活動を対象としてリスク評価を実施する。

中規模の火山噴火の評価に用いる方法は 2 章で検討し、処分場を貫通する中規模火山噴火のリスク評価を 3 章に、また、評価結果の解釈と他の社会的リスクとの比較及び評価結果の可視化システムの検討を 4 章に、それぞれ記述する。

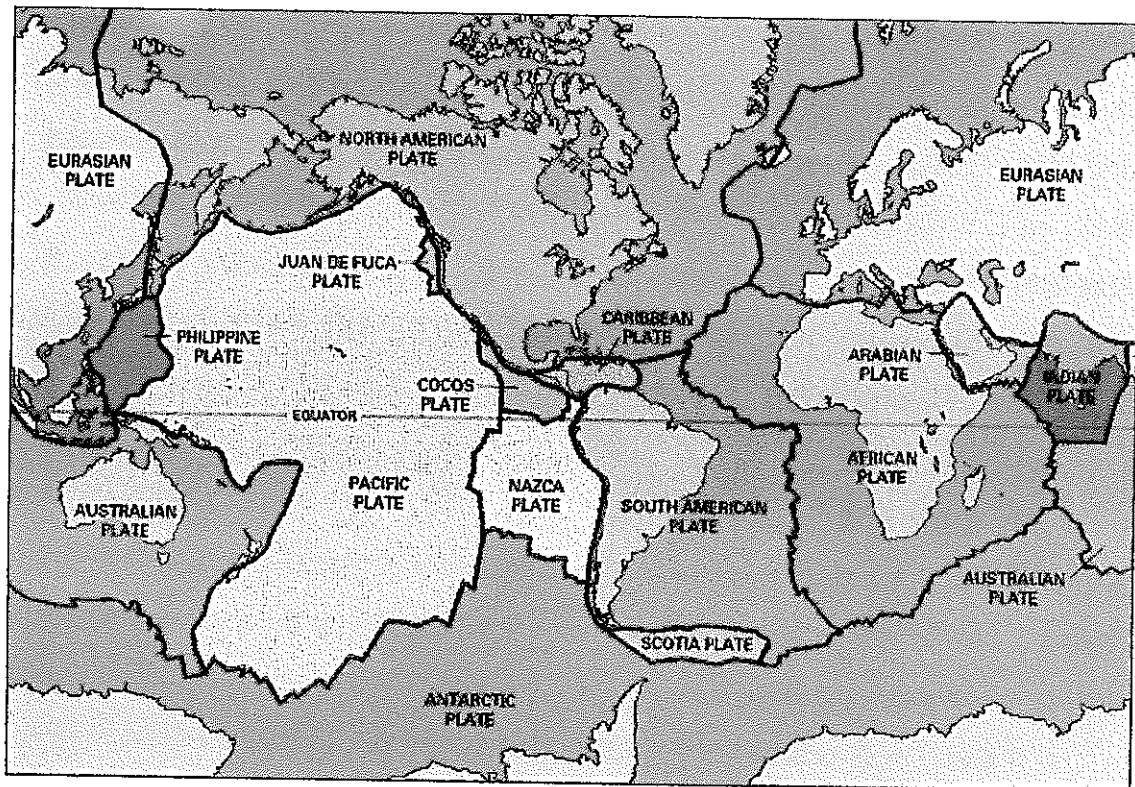


図 1-1 世界の主要な構造プレート

出典：(21)

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 仮想的地層処分場

本調査研究は日本における仮想的な高レベル放射性廃棄物地層処分場に関するものである。以下の想定事項は仮想的な高レベル放射性廃棄物地層処分場の一般的な特徴づけを行なうためのものである。

- ・ 処分場は、大きな地震や火山活動が将来発生するとは予期されない長期的に安定と考えられる地質環境の地域に立地される。
- ・ 独断的な人間侵入行為を防止するような能動的な制度・管理は行われていない。
- ・ 受動的な制度・管理を行うことによって、処分場の位置、設計、埋設物、危険に関する情報が提供されるが、それらは無視される。
- ・ 放射性廃棄物パッケージは多重バリアの封じ込めシステムの中で処分されると想定する。
- ・ 高レベル放射性廃棄物は熔融ガラス材に混合され、冷却された時点で、漏洩しにくいガラス固化体を形成する。
- ・ ガラス固化体は厚肉の炭素鋼製容器に密封される（オーバーパック）。
- ・ 廃棄物固化体は地下千メートルの大深度地下空間中に配置される。
- ・ 母岩と廃棄物固化体との間の空間は緩衝材で埋め戻される⁽⁵⁾。この緩衝材は透水性、密封性、吸着性、熱拡散率、長期の化学的安定性、化学的緩衝性、負荷耐性をコントロールするために使われる。
- ・ 廃棄物固化体を地下処分坑またはトンネルに設置して低透過性の物質で埋め戻したあと、処分場システムは人間の関与を一切必要としない状態となる。

2.2 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⁽³⁾⁽⁴⁾。

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

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

放射性核種の摂取体までの輸送のシミュレーションには、RSAC-5 計算コード⁽⁶⁾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）にある空気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、JNC 殿の線量換算係数と線量データ⁽⁵⁾が用いられる。

2.3 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、評価していない⁽⁴⁾。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⁽⁴⁾。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。特に、中規模の火山噴火での非放射線学的影響には、火山性爆風、降灰、火砕流による死傷者が含まれる。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。

2.4 発生可能性及び確率の評価

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⁽⁴⁾。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⁽¹⁾。

また、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。

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とを組み合わせ、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。

中規模の火山噴火についても、影響評価と発生可能性の両者に不確実性が存在

し得る。放射線学的影響に関する不確実性の大部分は、放射性物質の放出量に関するものであり、さらには、気象条件に依存する放射性物質輸送の想定に起因した不確実性もある。非放射線学的影響の不確実性は、中規模火山噴火の影響に関する統計的解析データに限りがあることによるものである。これらの要因により、リスクの可能性は少なくとも1桁違ってくる判断される。

3. 火山活動シナリオの評価

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、諏訪之瀬島、福岡の場（海底火山）、雌阿寒、安達太良、九重、北海道駒ヶ岳、雲仙（図 3-1 参照）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（VEI=）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 3-1 に示す。また、日本における最近 2000 年間の火山噴火を 6 段階の噴火規模別に発生頻度として整理し直したものを図 3-2 に示す。

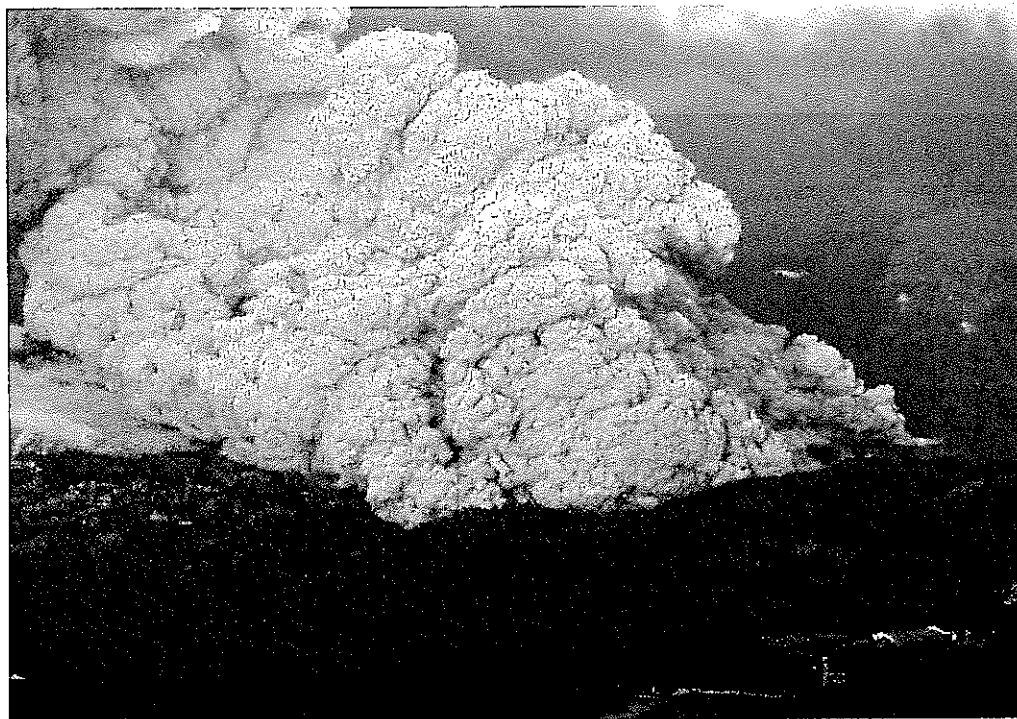


図 3-1 1993 年 6 月 24 日、雲仙火山の火砕流（写真提供は S. Nakada）

表 3-1 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*	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。

* 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。

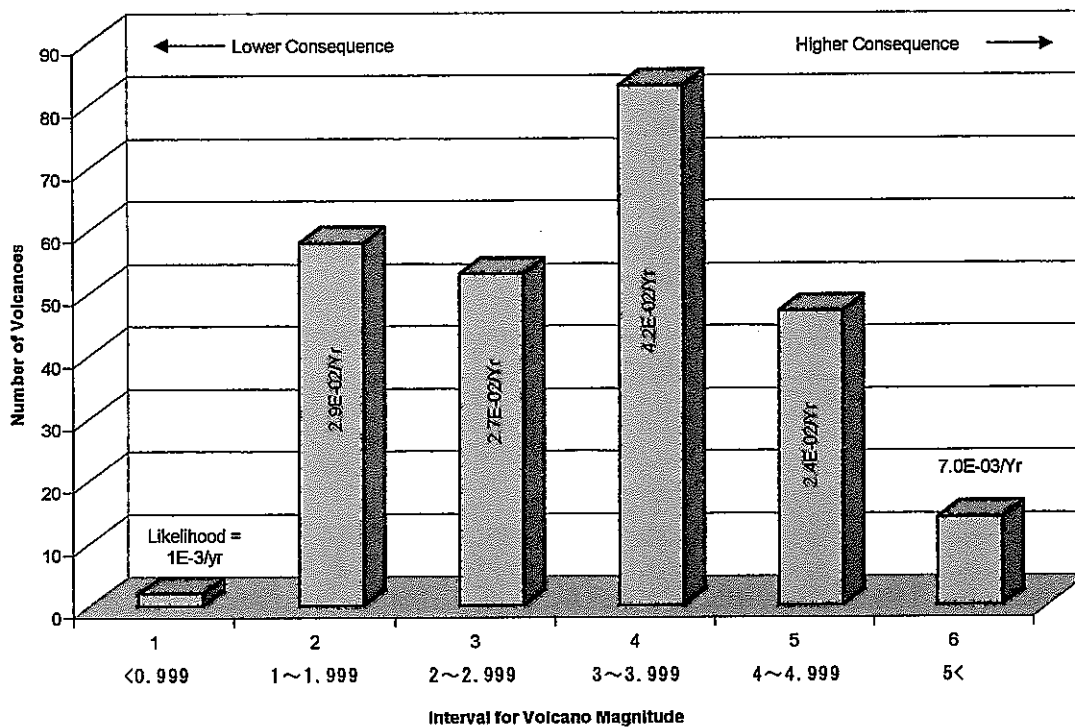


図 3-2 過去 2000 年間における日本の火山噴火の規模とその発生頻度
出典：(13)

3.1 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・中規模火山活動に対する公衆の懸念であるので、ある火山の火山性爆風、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。

3.2 事象の発生可能性

日本には約 80 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約 3×10^{-3} （1000 年に 2~3 個）と想定される。80 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 50km²）を日本の面積（約 380,000km²）で割ったもの、即ち約 1.3×10^{-4} である。

しかし、火山はランダムに分布する訳ではなく、すべり込み帯上方のような在来の地域によく現われやすい。天体衝突やすべり込み帯の境界を移動させるような何か他の外的事象によって、すべり込み帯と無関係の思いがけない場所に火山が出現することがあるかもしれない。そのような非在来的な地域で火山噴火が、Chagos Islands, Laccadive Islands, Yellowstone の火山噴火に対して想定された⁽²²⁾ような天体衝突によって引き起こされるとすると、非在来的な地域に火山が出現する確率は、(ツングスカ級の影響の発生頻度： $1/300\text{y}^{(3)}$) \times (日本の面積： 38万 km^2) \div (地球の面積： $5 \times 10^8\text{km}^2$) $\doteq 2.5 \times 10^{-6}$ と計算される。火山が直径 8km の円内に含まれ、かつ、日本には 80 の火山性サイトが存在すると仮定すると、在来的な地域に火山が出現する確率は、 $80 \times 1.3 \times 10^{-4} = 1.04 \times 10^{-2}$ となる。そこで、この推定に基づくと、火山の非在来的地域に対する在来的地域への出現しやすさはおよそ 4000 倍 ($= 1.04 \times 10^{-2} / 2.5 \times 10^{-6}$) 相当となる。従って、不確実性及びすべり込み帯が変化する可能性を考慮に入れると、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）、また、図 3-2 から求められる中規模 3～4 クラスの発生頻度 $3.6 \times 10^{-2}/\text{y}$ の場合でも、年間 4.7×10^{-9} ($= 3.6 \times 10^{-2}/\text{y} \times 1.3 \times 10^{-4} \times 0.001$) に満たないと推定される。

3.3 処分場に対する火山の影響の大きさ

3.3.1 タンボラ級 (VEI=6~7) 噴火ケース⁽³⁾

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)。

平成 8 年度の評価で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した⁽³⁾。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⁽⁷⁾より 10 倍も大きい。

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、指數的に、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-5 コンピュータ・コード⁽⁶⁾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 3-1 のタンボラ山噴火の場合)。

3.3.2 中規模 (VEI=3~5) 噴火ケース

ここでは前述の大規模噴火ケースと比較するため、雲仙～富士山クラス (VEI=3~5) の噴火規模も検討対象とする。

火砕流による死者数は火山災害の中でも最も多く、火山周辺では最も恐ろしい災害要因である。(図 3-3 参照)

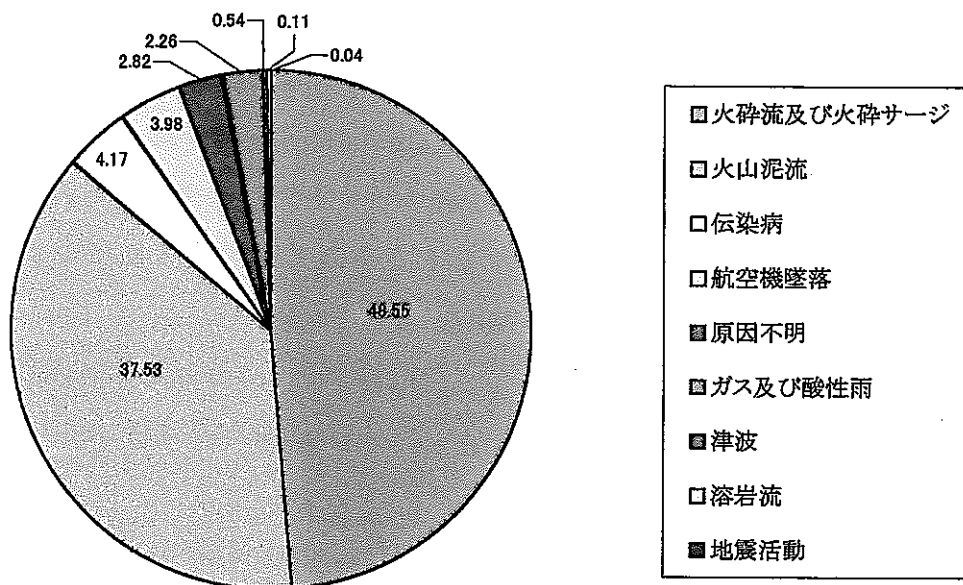


図 3-3 過去数世紀における各火山現象での死亡者数の割合
出典：(8)

(1) 解析ケースの設定

そこで、放射線学的／非放射線学的影響を評価する上で、以下のような前提を設定した。

- ① 発生規模 (VEI=3~4) に対する発生頻度を図 3-2 のデータに基づき、 $3.6 \times 10^{-2}/y$ と設定する。これは、大規模噴火ケース ($3 \times 10^{-3}/y$; 3.2 節参照) の約 10 倍である。
- ② 全ての火山活動では火砕流が発生する。
- ③ 火砕流の非放射線学的影響を推定するため、過去のデータに基づき、火

砕流の最終的な軌跡を想定する。(火砕流モデルの新たな数値解析は行わないが、既往事例(例えば図 3-4 に示す文献⁽⁹⁾)は参考とする。)文献^{(14)~(19)}に基づくと、火砕流の典型的な到達距離は、およそ 2km~50km である(図 3-5 参照)。ここでは、中規模火山噴火からの火砕流の到達距離として、10km を想定する。

火砕流の典型的な幅は、火山地域の航空写真⁽¹⁸⁾によると、典型的な溪谷を流れるときの幅としては約 1km 程度、また典型的な中規模火山噴火の場合、火砕流は約 60° の角度で扇状に流出するとも考えられる。

- ④ 融雪による洪水(火山泥流)の潜在的影響も図 3-3 によると火砕流の次に大きいと考えられるが、放射線学的影響には重要とはならないだろう。これは非放射線学的影響リスクを高めることに寄与するであろうが、日本の火山に関しては火山泥流に触れた典型的事例が見当たらなかったため、今回の解析では考慮しない。

- ⑤ RSAC-5 モデルへ入力する人口と、放射線学的/非放射線学的災害を被る人口とを求めるため、人口密度として、日本全体の平均値 326 人/km²⁽²³⁾を用いる。

RSAC-5 計算用の人口は、径方向に 5 分割された区域毎に決める。

火砕流では、極度の高熱によって全員死亡すると考えられるため、その深さは重要ではない。

上記③の検討から、火口から 10km 遠方まで中心角 60° の扇状をなして流出する火砕流では、約 17,000 人(=3.14×(10km)²×60°/360°×326 人/km²)の人口が火砕流の経路上にいて死亡するリスクを受けることとなる。もし、火砕流の到達距離が 25km まで伸びると、約 107,000 人が死亡することになる。

- ⑥ 噴火に対する事前警報等の防災対策に基づく避難の想定は、死亡者数低下に寄与し得るが、人々が必ずしも警報通りに行動するとは限らないため、ここでは避難は全くないと想定する。



図 3-4 エナジコーロモンモデルによる火砕流の到達危険区域予測

出典：(9)

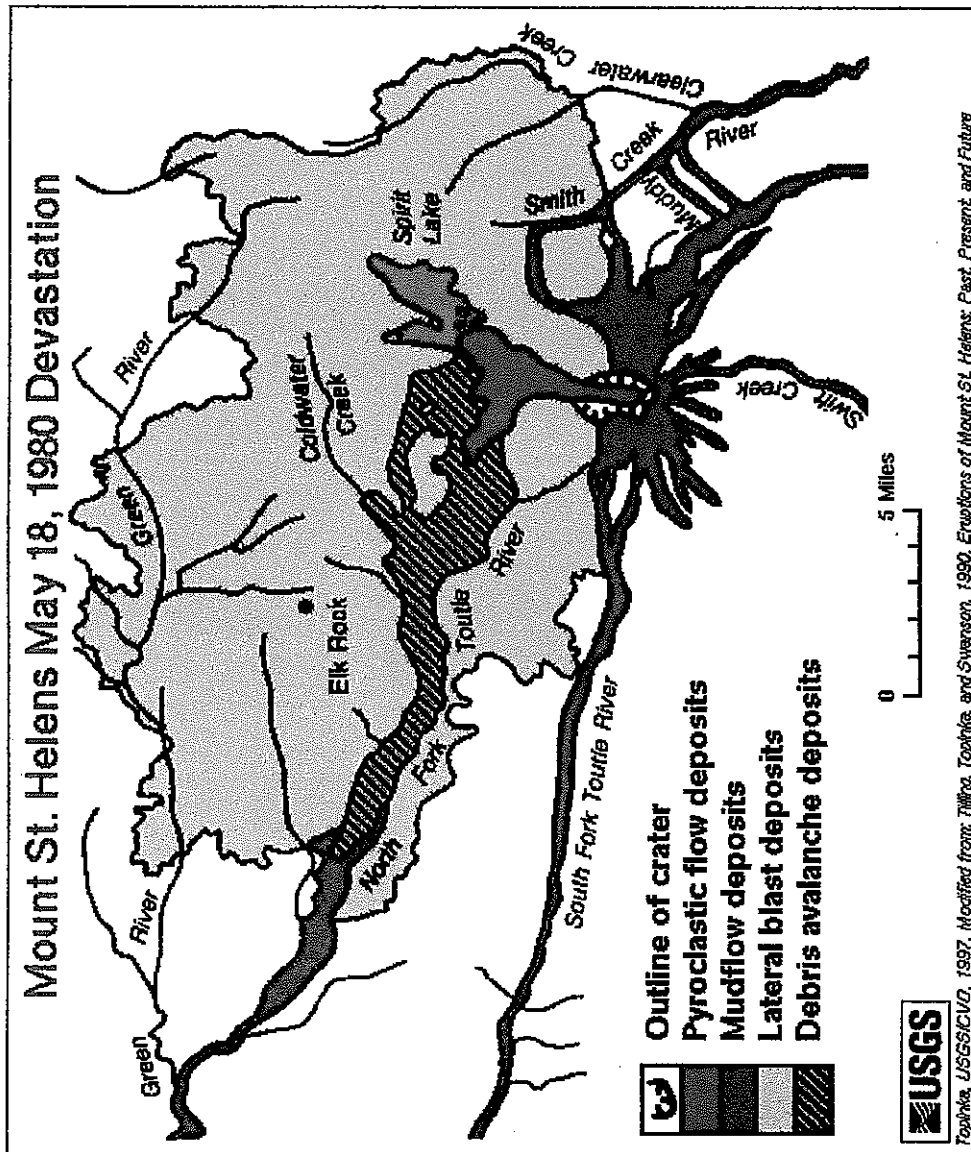


図 3-5 セントヘレンス火山周辺の惨害状況

出典：(16)

- ⑦ 中規模噴火シナリオは、本研究では、キャニスター埋設後、1000年後に発生するものとする。

造山性マグマ（水分とシリカの含有率が高い）の貫入を伴う火山の特徴から言って、放出される放射性物質は、火山による3種類の危険性、即ち、火山性爆風、噴火の火柱及び火砕流と関係すると考えられる。そこで、火山性爆風／噴火の火柱と火砕流に対し、それぞれ、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）及びRF（吸入可能割合）を下記のように推定する。

MARは、処分場閉鎖後1000年時点に対するキャニスター40000本中の放射性核種インベントリ⁽⁵⁾とし、火山噴火に対するDRは、3.3.1項同様 $1000/40000=0.025$ とする。

火山性爆風、噴火の火柱、火砕流に対するDRは、噴出物の体積と火口面積に基づき、次のように算定する。

大規模な火山では、噴火によって、 0.1km^3 以上の物質を放出する⁽¹⁵⁾。中規模の火山では、 0.1km^3 の噴出物容量を用いる。

地下1000m処分場と同じ深度にクレーターが生じると仮定すると、噴出面積は、 $0.1\text{km}^3/1\text{km}=0.1\text{km}^2$ となる。このうち、キャニスターに影響を与える火口の面積は、10%と想定する。処分場の面積は、 5.4km^2 であるから、火砕流によって生ずるDRの値は、 $0.01\text{km}^2/5.4\text{km}^2=0.00185$ （キャニスター76本分）と計算される。

ソースタームの組成は、ガラス固化プロセスで生成される既存の粉塵によるものである。既存の粉塵のソースターム組成への寄与は、粉塵に対するDRを計算することにより、考慮し得る。既存の粉塵の割合は、HLWの0.035%以下である⁽¹²⁾。火山性爆風、噴火の火柱、火砕流に対するDRに既存の粉塵割合を乗ずることにより、粉塵に対する $DR=6.48 \times 10^{-7}(=0.00185 \times 0.00035)$ が得られる。

本解析では、火山性爆風と噴火の火柱に対する $ARF \times RF$ は、3.3.1 項同様 0.01 とする。

ガラス固化プロセスでは、既存の粉塵が、 $RF = 0.7^{(12)}$ で生成され、 ARF はおよそ 1 とする。

火砕流から生ずる粉塵の ARF と RF は、文献⁽¹²⁾の(4-1)式から、次のように計算される。

$$ARF \times RF = (A)(P)(v^2)$$

ここで、 A : 経験的相関係数 2×10^{-11} [$\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}^2)$]

P : 標本密度 [g/cm^3]

v : 速度 [cm/s]

ガラス固化体の密度 P は、 $2800\text{kg}/\text{m}^3^{(5)}$ 又は $2.8\text{g}/\text{cm}^3$ である。

中規模火山噴火からの火砕流の典型的な速度は、 $100\text{mi}/\text{h}$ 又は $160\text{km}/\text{h}$ である⁽¹⁹⁾。

今、速度を $160\text{km}/\text{h}$ ($=4444\text{cm}/\text{s}$) とすると、

$$\begin{aligned} ARF \times RF &= 2 \times 10^{-11} \times 2.8 \times (4444)^2 \\ &= 1.1 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

と計算される。

なお、漏出経路係数 (LPF) は、放射性物質をとどめる機構は存在しないので、1 と設定する。

以上をまとめると、MAR とその他放出関連係数は、表 3-2(1)のようになる。これらを用いて、中規模火山噴火ケースの火柱と火砕流に含まれる放射性ソースタームを計算すると、表 3-2(2)のようになる。

表 3-2(1) 中規模火山噴火ケースにおける MAR, DR, ARF 及び RF

同位体	キャニスター 当り グラム数	キャニスター 本数	MAR [g]	DR	DR (粉塵)	ARF×RF (噴火の火柱)	ARF×RF (火砕流)	ARF×RF (粉塵)
Se-79	7.99E+00	40000	3.20E+05	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Zr-93	1.00E+03	40000	4.00E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Tc-99	1.06E+03	40000	4.24E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Pd-107	2.75E+02	40000	1.10E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Sn-126	3.58E+01	40000	1.43E+06	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Cs-135	4.96E+02	40000	1.98E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Th-230	5.44E-03	40000	2.18E+02	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Th-232	1.25E-03	40000	5.00E+01	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
U-233	2.46E-01	40000	9.84E+03	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
U-234	2.35E+00	40000	9.40E+04	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
U-235	2.08E+01	40000	8.32E+05	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
U-236	1.29E+01	40000	5.16E+05	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
U-238	1.94E+03	40000	7.76E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Np-237	8.36E+02	40000	3.34E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Pu-239	5.34E+01	40000	2.14E+06	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Pu-240	3.76E+01	40000	1.50E+06	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Am-241	5.54E+01	40000	2.22E+06	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Am-243	8.71E+01	40000	3.48E+06	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7

表 3-2(2) 中規模火山噴火ケースにおける放射性ソースターム

同位体	ソースターム (噴火の火柱) [g]	ソースターム (火砕流) [g]	比放射能 [Ci/g]	ソースターム (噴火の火柱) [Ci]	ソースターム (火砕流) [Ci]
Se-79	6.06E+00	8.00E-01	7.04E-02	4.27E-01	5.63E-02
Zr-93	7.59E+02	1.00E+02	2.54E-03	1.93E+00	2.54E-01
Tc-99	8.04E+02	1.06E+02	1.71E-02	1.38E+01	1.81E+00
Pd-107	2.09E+02	2.75E+01	5.20E-04	1.09E-01	1.43E-02
Sn-126	2.72E+01	3.58E+00	2.87E-02	7.80E-01	1.03E-01
Cs-135	3.76E+02	4.96E+01	1.16E-03	4.37E-01	5.76E-02
Th-230	4.13E-03	5.44E-04	2.04E-02	8.42E-05	1.11E-05
Th-232	9.49E-04	1.25E-04	1.11E-07	1.05E-10	1.39E-11
U-233	1.87E-01	2.46E-02	9.79E-03	1.83E-03	2.41E-04
U-234	1.78E+00	2.35E-01	6.33E-03	1.13E-02	1.49E-03
U-235	1.58E+01	2.08E+00	2.19E-06	3.46E-05	4.56E-06
U-236	9.79E+00	1.29E+00	6.54E-05	6.40E-04	8.44E-05
U-238	1.47E+03	1.94E+02	3.40E-07	5.01E-04	6.60E-05
Np-237	6.34E+02	8.37E+01	7.13E-04	4.52E-01	5.96E-02
Pu-239	4.05E+01	5.34E+00	6.29E-02	2.55E+00	3.36E-01
Pu-240	2.85E+01	3.76E+00	2.30E-01	6.56E+00	8.65E-01
Am-241	4.20E+01	5.54E+00	3.47E+00	1.46E+02	1.92E+01
Am-243	6.61E+01	8.72E+00	2.02E-01	1.34E+01	1.76E+00

⑧ 火山噴火からの放出高度は、2000m以下の高度と想定する（例えば、フェルナンデス火山の山頂は、1100m高にある⁽²⁰⁾）。保守的な線量推定を行うため、典型的な放出高度として1000mを設定する。RSAC-5の入力パラメータである煙雲の厚さと出口速度への値から、実効放出高度は約1135mとなる。

火砕流からの放出高度は、浮揚性放射能流上昇成分と共に、10mと想定する。浮揚性放射能流上昇モデルへ入力される熱放出率より、実効放出高度は約45mとなる。

火山噴火の間、全く安定な気象状態が存在するとは考えられない。現実的な影響を推定するため、やや安定な気象状態を考える。シミュレーション計算用の気象条件として、文献(3)よりも保守的なPasquill-Giffordの気象安定クラスD、風速4m/sを用いる⁽¹⁰⁾。

RSAC-5では、摂取体の状態の方向依存性をシミュレートするため、人口、拡散係数、風速を放射能流の広がり状態に基づき16方位に分割することができるが、本中規模火山噴火シミュレーションでは、方向依存性は想定せず、人口と気象条件は、全方位とも同じ状態とする。

(2) 解析結果

地層処分場に埋設された廃棄物パッケージから大気中へ放出される放射性同位体の影響を以下のように検討する。

(1)項で設定した入力データに基づき、RSAC-5計算コードを用いて、火山噴火の火柱及び火砕流に対し、放出地点から風下100kmまでの最大個人被曝線量を評価した。その結果を、図3-6(1)（火砕流）と図3-6(2)（火山噴火の火柱）にそれぞれ示す。

RSAC-5計算では、火砕流と火柱の両者に対し、火口から半径80km以内の人口に対する平均50年間預託実効線量当量（CEDE）も算出された。RSAC-5の16方位区域の1つの各径方向間隔毎の区域に対する人口と預託集団線量を表3-3に示す。また、集団線量に加え、集団線量を人口で除することにより、平均個人線量が算出されている。その結果、火砕流による平均個人CEDEは、5.85mSv、噴火の火柱による平均個人CEDEは、23.4mSvとなった。被曝の健康

への影響を表わす ICRP のリスク換算係数 5×10^{-2} 死/Sv⁽¹¹⁾を適用すると、噴火の火柱からの放射性物質放出により、480 人 ($=9.6 \times 10^3$ マン・Sv $\times 5 \times 10^{-2}$ 死/Sv) の癌死者増が生じ、個人の癌死リスクは 0.12% ($=2.34 \times 10^{-2}$ Sv $\times 5 \times 10^{-2}$ 死/Sv) 増となる。一方、火砕流からの放射性物質放出により、120 人 ($=2.4 \times 10^3$ マン・Sv $\times 5 \times 10^{-2}$ 死/Sv) の癌死者増が生じ、個人の癌死リスクは 0.029% ($=5.85 \times 10^{-3}$ Sv $\times 5 \times 10^{-2}$ 死/Sv) 増となる。

火山性爆風、噴火の火柱及び火砕流に関する非放射線学的影響には、負傷者と死者の双方が含まれる。非放射線学的影響は、警報の時期並びに人口分布によって変わり得る。本研究では、(1)項でも述べているように、避難は全く行われぬものとし、また、爆風により 1000 人が死亡するものとする⁽³⁾。火山灰は、航空機に対して災害をもたらし、民間航空機事故で乗員全員の 300 人の死者が生じ得ると想定される。最近 20 年間では飛行中に火山灰雲に入り込んだ航空機に関する報告が 80 件以上出されている⁽²⁴⁾。

(1)項で設定した影響領域を用いると、火砕流の高熱と火災によって、17,000 人がリスクを破り、死亡すると想定される。もし火砕流の到達範囲が火山中心から 25km に拡大し、被災人口が火山周囲の 1/4 円内に含まれるとすると、リスクを破る人口は 160,000 人台となり、中心角 60° の扇状内の 107,000 人が死亡することとなろう。

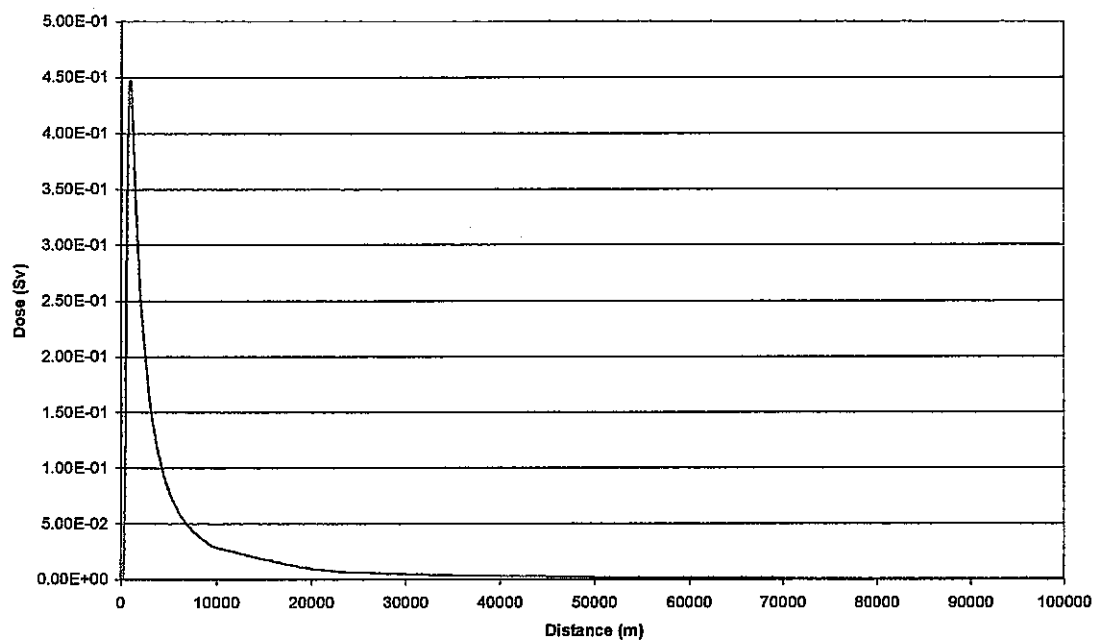


図 3-6(1) 火砕流放出による風下方向への距離での 50 年間預託放射線線量

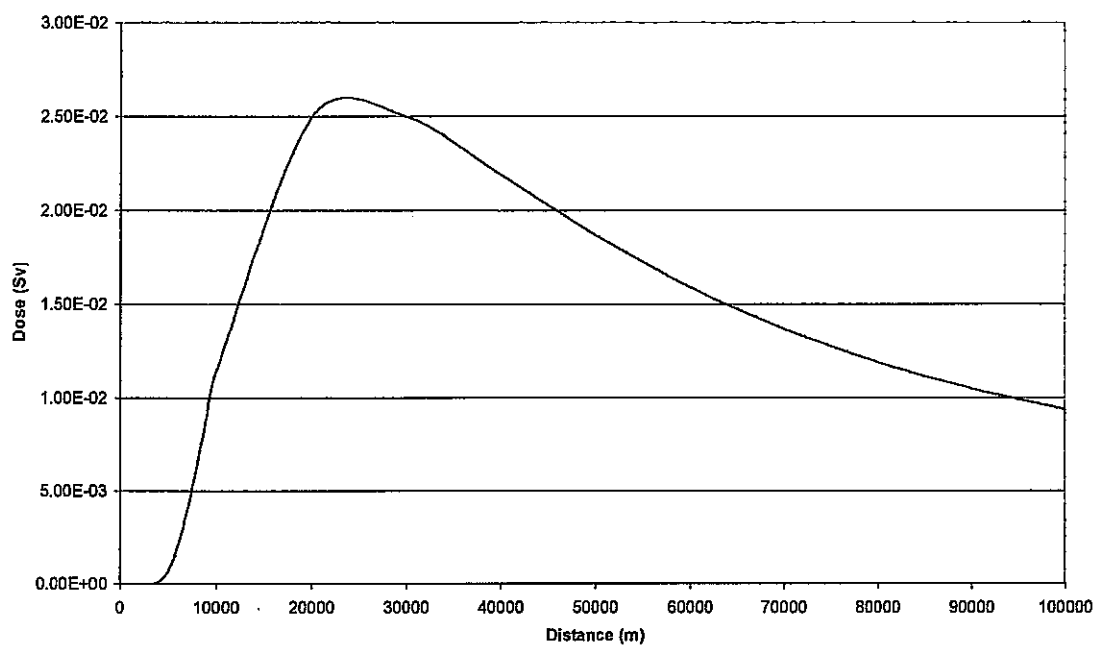


図 3-6(2) 火柱放出による風下方向への距離での 50 年間預託放射線線量

表 3-3 対象人口に対する平均 50 年間預託実効線量当量

	風下方向距離区域(km)					
	0-16	16-32	32-48	48-64	64-80	0-80
各セクターの人口	1.70E+04	5.00E+04	8.30E+04	1.20E+05	1.50E+05	4.10E+05
火砕流からの集団 CEDE (マン・Sv)	6.20E+02	5.30E+02	4.20E+02	3.90E+02	3.90E+02	2.40E+03
火砕流からの個人 CEDE (Sv)	3.65E-02	1.06E-02	5.06E-03	3.25E-03	2.60E-03	5.85E-03
噴火の火柱からの集団 CEDE (マン・Sv)	1.80E+02	1.50E+03	2.40E+03	2.70E+03	2.80E+03	9.60E+03
噴火の火柱からの個人 CEDE (Sv)	1.06E-02	3.00E-02	2.89E-02	2.25E-02	1.87E-02	2.34E-02

4. 評価結果の可視化

本章では、日本の将来の HLW 地層処分場における火山活動シナリオの影響を評価した結果の可視化に関する検討を行う。また、他の社会的リスクと比較し、リスクの表示方法を検討する。

4.1 リスク評価

適切な立地場所にある処分場の真下において中規模の火山噴火が発生する可能性は、 $4.7 \times 10^{-9}/y$ と推定され、非放射線学的影響として、火山の周囲 80km 以内の想定人口 414,298 人中 18,300 人（火山性爆風 1000 人+噴火の火柱（火山灰による航空機事故）300 人+火砕流 17,000 人）の死者が発生すると推定された。非放射線学的影響による個人の死亡確率は、 4.42×10^{-2} ($=18,300/414,298$) と計算される。

非放射線学的影響による年間期待死亡者数は、事象の発生可能性 ($4.7 \times 10^{-9}/y$) に非放射線学的影響による死亡者数 (18,300 人) を乗ずることにより、結局、 8.6×10^{-5} 死/y となる。

RSAC-5 計算により算定された放射線学的影響は、想定人口 414,298 人中 600 人/事象（噴火の火柱（含、粉塵）480 人+火砕流（含、粉塵）120 人），個人の死亡確率は、 1.45×10^{-3} ($=600/414,298$) となる。放射線学的影響による年間期待死亡者数は、事象の発生可能性 ($4.7 \times 10^{-9}/y$) に放射線学的死亡者数 (600 人) を乗ずることにより、結局、 2.82×10^{-6} 死/y となる。

人口 10 万人当りの年間死亡者数で表示されている既知の事故統計と比較するため、放射線学的影響による個人死亡確率 (4.42×10^{-2}) に事象発生可能性 ($4.7 \times 10^{-9}/y$) と 100,000 を乗ずることにより、中規模火山噴火ケースの非放射線学的影響による人口 10 万人当りの期待死亡率 2.08×10^{-5} が得られる。同様に、放射線学的影響による人口 10 万人当りの期待死亡率は 6.82×10^{-7} ($=4.7 \times 10^{-9} \times 1.45 \times 10^{-3} \times 100,000$) となる。

4.2 他の原因による事故死率との比較

1993 年における日本の 10 万人当りのその他の事故死率 27 人というデータに基

づく、その他の事故である想定人口中の個人が死亡する可能性は、処分場での中規模火山噴火ケースによる放射線学的／非放射線学的影響の場合の 1.3×10^6 倍 ($=27 / (2.08 \times 10^{-5} + 6.82 \times 10^{-7})$) 大きい。

日本における4大死亡原因と産業／交通事故による死亡率を図4-1に示す。

火山のみのリスクは、図4-1に示されるその他の死亡原因のリスクよりずっと小さい。処分場の真下で火山噴火が起こってもわずか3%程度のリスク増にしかならない。年間リスクを100年間の生涯リスクに換算したとしても、中規模火山噴火リスクは、日本の日常的事故リスクに比べればはるかに小さなものと言えよう。

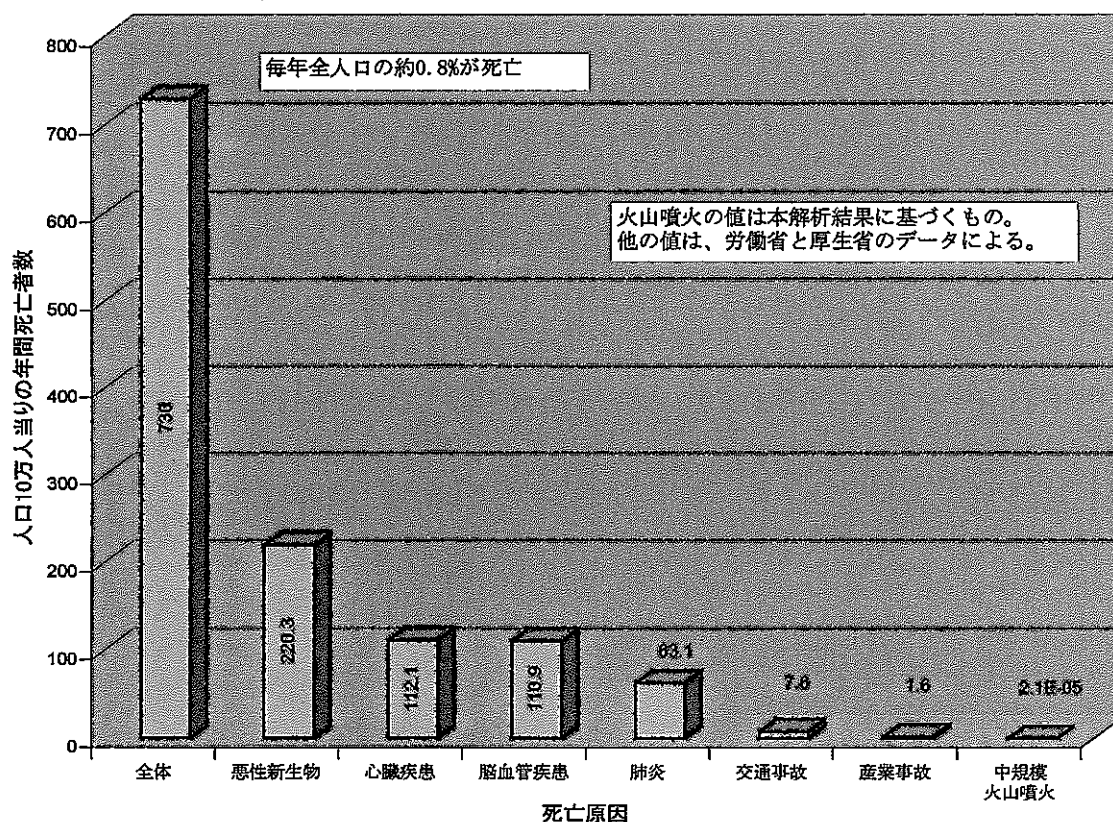


図4-1 仮想的処分場真下の中規模火山噴火による死亡リスクと1997年の日本の他の死亡原因との比較

出典：(25)

4.3 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の相互比較

前年度まで⁽³⁾⁽⁴⁾及び本年度の検討結果に基づき、日本における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 10 万人当りの期待死亡者数とその他の事故で報告された事故死の数とを比較した（図 4-2 参照）。

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。



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

図 4-2 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による期待死亡率

4.4 評価結果の可視化

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、前年度は、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 等を用いて可視化資料を作成した。

このようなリスク等の可視化方法に関し、本年度は特に火山活動シナリオの影響・評価プロセスの詳細化が行えるような可視化システムの作成を行った。

ここでは、本編で用いたシナリオリスク評価プロセスに基づいて作成された、可視化資料（図 4-3 参照）を用い、リスク可視化システムのテスト版を作成した。

開発言語は Windows98 用の Microsoft Visual Basic(Version 5.0)を使用し、画像処理は Paint Shop Pro5J を使用した。

作成したシステムの開始画面の上部のメニューバーには、図 4-3 に基づき、「シナリオ開始」、「平常状態」、「外乱（火山）」、「処分場ダメージ」、「放出」、「影響」及び「リスク比較」のメニューが設定されており、それぞれのメニューをクリックすることによって画面表示を開始する。また、「終了」のメニューをクリックするとシステムが終了する。バックミュージックにより音響効果も演出している。

例えば、「放出」メニューをクリックすると、放射性物質の放出される場面として火山噴火の場合と火砕流の場合の画面が表示される。（図 4-4 (1)）

「影響」メニューをクリックすると、非放射線学的影響の画面、放射線学的影響の画面（図 4-4 (2)）、火砕流の放出による風下方向への放射線線量の分布画面、火柱放出による風下方向への放射線線量の分布画面がそれぞれ 5 秒の間隔で連続的に表示される。

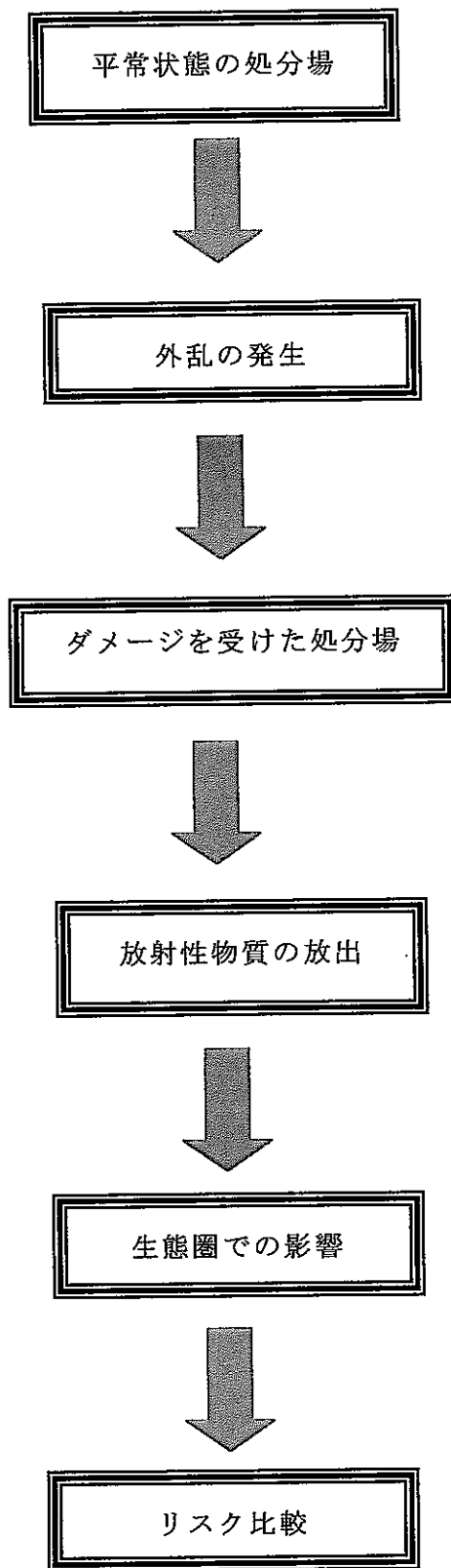


図 4-3 可視化フロー

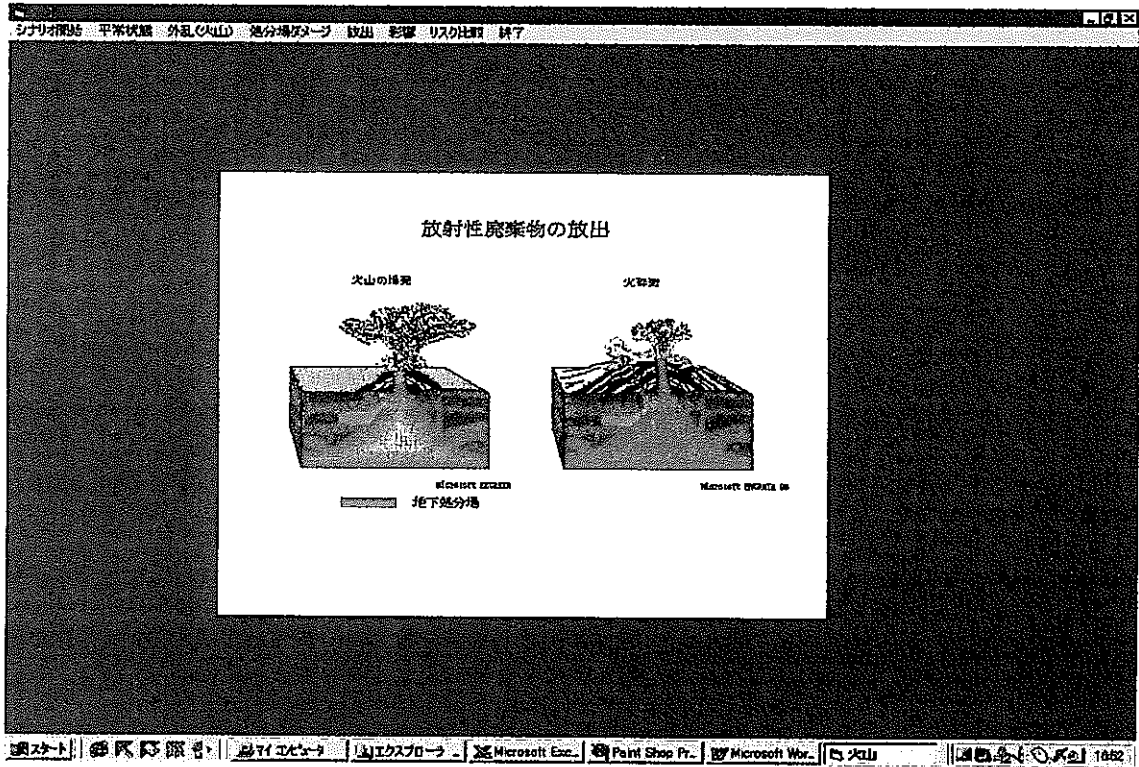


図 4-4 (1) 放射性廃棄物の放出



図 4-4 (2) 放射線学的影響

5. おわりに

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火山活動、特に、火砕流を伴う中規模クラスの噴火活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、前年度に引き続き、火山活動シナリオを一例とする可視化資料の作成及びこれを扱う可視化システムの開発を行った。

今後の課題としては、

- ① 他の直接放出シナリオの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技法の検討（他の直接放出シナリオの可視化表示、動的表現への展開とこれに伴う画像システム改良化など）

が指摘される。

参 考 文 献

- (1) ㈱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)。
- (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(Ⅳ)－人的行為シナリオの確率論的評価－」PNC ZJ1222 92-001 (1992)。
- (3) ㈱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)。
- (4) ㈱三菱総合研究所：「地層処分の極限安全性に関する研究（Ⅱ）」PNC 研究委託内容報告書 PNC ZJ1222 98-001 (1998)。
- (5) PNC：「Research and Development of Geological Disposal of High Level Radioactive Waste, First Progress Report」PNC TN1410 93-059 September (1992)。
- (6) D. Wenzel：「The Radiological Safety Analysis Computer Program」WINCO-1123 February (1994)。
- (7) O.B. Toon, et al.：「Environmental Perturbations caused by the Impacts of Asteroids and Comets」Reviews of Geophysics, February (1997)。
- (8) R. Scandone, G. Arganese and F. Goldi：「The evaluation of volcanic risk in the Vesuvian area」J. Volcanol. and Geotherm. Res., Vol. 58, pp263-271 (1993)。
- (9) 荒牧：「火山災害による被害量の評価手法の開発」平成 6~7 年度科研費補助金 試験研究 B 研究成果報告書 No. 06558052 (1996)。
- (10) K.L. Clawson, G.E. Start and N.R. Ricks：「Climatology of the Idaho National Engineering Laboratory. 2nd Edition」DOE/ID-12118, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Air Resource Laboratory, Field Research Division, Idaho Falls, Idaho, December (1989)。

- (11) ICRP : 「1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection」 Publication 60, Annals of the ICRP, Vol.21, No.1-3, Pergamon Press, Oxford, England (1991).
- (12) J.Mishima et al.: 「Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for NonReactor Nuclear Facilities」 DOE Handbook, DOE-HDBK-3010-94, December(1994).
- (13) Hayakawa's one million-year tephra catalog, <http://www.edu.gunma-u.ac.jp/~hayakawa/catalog/2000J>, Hayakawa Paleovolcanology Laboratory, Gunma University (1996).
- (14) Pinatubo Volcano, <http://www.expo.edu.ph/pinatubo/page4.html>, ABS-CBN Broadcasting Corporation, Philippine Network Foundation, Inc. (1996).
- (15) Lyn Topinka : 「Cascades Volcano Observatory」 http://vulcan.wr.usgs.gov/Hazards/NRC_Report/nrc_volcanoes.html, United States Geological Survey, Reston, VA, February 24 (1999).
- (16) Lyn Topinka : 「Cascades Volcano Observatory」 http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/MSH/Publications/MSHPPF/PPF_pyro_flows.html, United States Geological Survey, Reston, VA, February 24 (1999).
- (17) volcano.und.edu/vwdocs/volc_images/img_unzen2.html
- (18) Prof. Mike Ingg, Radar Remote Sensing Group, University of Cape Town, <http://rrsg.ee.uct.ac.za/~jpl/DATA/LOCATION/ASIAMIDE/UNZEN/UNZEN.HTM>, Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, South Africa, 26 February (1999).
- (19) Lyn Topinka : 「Cascades Volcano Observatory」 http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/WestIndies/Pelee/description_1902_eruption.html, United States Geological Survey, Reston, VA, February 24 (1999).
- (20) netsurf.geo.mtu.edu/eos/education/slide_set2/slides.captions.html
- (21) Kathie Fraser and John Watson : 「Major Tectonic Plates of the World」 <http://geology.er.usgs.gov/eastern/plates.html>, United States Geological Survey, Reston, VA, October 3 (1997).

- (22) David Alt and Donald W. Hyndman : 「Roadside Geology of Idaho」 Mountain Press Publishing Co., Missoula, MT (1989).
- (23) 「The World Almanac and Book of Facts」 World Almanac, p773 (1992).
- (24) Gari C. Mayberry : 「 Volcanic Ash Clouds and Aircraft Safety 」 <http://www.geo.mtu.edu/department/classes/ge404/gcmayber/historic.html>, Department of Geological Engineering and Sciences, Michigan Technological University, Houghton, MI, USA, April 20 (1998).
- (25) Statistics Bureau & Statistics Center, Management and Coordination Agency of Japan, Data for 1997, <http://www.stat.go.jp/1602.htm#jf02-09>, <http://www.stat.go.jp/1624.htm#jf24-02>, <http://www.stat.go.jp/1602.htm#jf02-01>, <http://www.stat.go.jp/1620.htm#jf20-03> (1999).

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

(REPORT ON RESULT OF JNC-COMMISSIONED RESEARCH SUMMARY)

February, 1999

Mitsubishi Research Institute, Inc.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

|| Japan Nuclear Cycle Development Institute

1999

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

Hiroo Ohkubo*

Abstract

In this research, first, event and process relevant to the key words (or scenario initiator) such as volcanism have been identified and, especially a middle-scale eruption scenario including pyroclastic flows has been analyzed as the catastrophic scenario, which inspires ordinary people to have tremendous concern.

Secondly, 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.

Finally, the process for assessing the consequence of volcanism scenario and its risk calculated by the model developed in the above have been visualized, and presented by comparing with other risks.

This work was performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : R&D Coordination Group, Geological Isolation Research Project

* Mitsubishi Research Institute, Inc.

地層処分の極限安全性に関する研究 (Ⅲ)

大久保博生*

要 旨

本研究では、まず、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として、特に、火砕流を伴う中規模クラスの噴火活動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、ここで検討した火山活動シナリオの影響評価プロセス及び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核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：2000年レポートチーム 研究調整グループ

*株式会社 三菱総合研究所

TABLE OF CONTENTS

	page
1. Introduction	1
1.1 Objective	1
1.2 Background	1
1.3 Summary	2
2. Methodology	4
2.1 Hypothetical Geologic Repository	4
2.2 Radiological Consequences	5
2.3 Non-Radiological Consequences	6
2.4 Assessment of Likelihoods and Probabilities	6
2.5 Uncertainties	7
3. Evaluation of Volcanism Scenario	8
3.1 Scenario due to Volcanism	10
3.2 Event Likelihood	10
3.3 Consequences of Volcano at Repository	12
3.3.1 Tambora Class (VEI =6~7) Eruption Case ⁽³⁾	12
3.3.2 Middle-Scale (VEI=3~5) Eruption Case	13
4. Interpretation of Results	24
4.1 Risk Assessment	24
4.2 Comparison to Deaths from Other Causes	25
4.3 Risks from Extremely Unlikely Events and Long-Term Environmental Processes	26
4.4 Visualization of Assessment Results	28
5. Concluding Remarks	31
References	33

CONTENTS OF TABLES

	page
Table 3-1 Characteristics of selected worldwide volcanoes.....	9
Table 3-2(1) Summary of MAR, DR, ARF, and RF for moderate volcanic eruption	19
Table 3-2(2) Radioactive source term for moderate volcanic eruption	19
Table 3-3 Average fifty year committed effective dose equivalent to the involved population	23

CONTENTS OF FIGURES

		page
Fig.1-1	Major tectonic plates of the world	3
Fig.3-1	Pyroclastic flow of Unzen Volcano dated 24 th June, 1993	8
Fig.3-2	Number of volcanoes in Japan during the last 2000 years as a function of the volcano magnitude	10
Fig.3-3	Mortality (in percentage) due to volcanic phenomena during the last century	13
Fig.3-4	A result of simulation indicating footprint of pyroclastic flow by using energy cone model	15
Fig.3-5	Damage around Mount St. Helens	16
Fig.3-6(1)	Fifty year committed radiation dose as a function of distance downwind from a pyroclastic flow release	22
Fig.3-6(2)	Fifty year committed radiation dose as a function of distance downwind from a column release	22
Fig.4-1	Comparison of the risk of death from a moderate volcanic eruption beneath the hypothetical repository to the risk of death from other causes in Japan for 1997	25
Fig.4-2	Expected death rates from extremely unlikely events, long-term environmental processes and from other accidents in Japan ..	27
Fig.4-3	Visualization flow	29
Fig.4-4 (1)	Release of radioactive material	30
Fig.4-4 (2)	Radiological impact	30

1. Introduction

1.1 Objective

The safety of geological disposal of high level radioactive waste is judged by prediction of future behavior of disposal system. However, the structure of performance assessment (PA) is so complicated with scenario, impact and data analysis that it becomes an important international problem of how to explain the contents of PA results to the public including experts in non-nuclear field. If PA experts for HLW disposal actually evaluate such very extreme direct release scenario induced by faulting and seismicity, volcanism and human intrusion, not included in groundwater scenario, there is a possibility that the results of the analysis may mislead the public.

This research aims at a deeper understanding to the safety assessment of HLW disposal, through the efforts to bridge the gap between the experts engaged in the safety assessment, and the public.

1.2 Background

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, 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⁽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.

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" (as shown in Fig.1-1) 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 also the subject of this research in which the consequences are evaluated regardless of the low likelihood or probability of occurrence.

1.3 Summary

In this research, first, extreme scenarios induced by rare events such as faulting and seismicity, and volcanism which might cause a large consequence in the biosphere if it occurs at a disposal site (called extremely unlikely scenario) will be concretely imagined, and discussion of assessment method and analysis will be made on radiological and non-radiological risks. Then, the process and result of risk analysis of extremely unlikely scenario will be visualized by using some tool such as computer graphics to help intuitive understanding.

This research started in Heisei 8th fiscal year. Since then, radiological and non-radiological risk assessment methods have been discussed, and last year, risk assessment for human intrusion, uplift and erosion, and climate change scenarios has been made.

This year, risk assessment for volcanism, especially a middle-scale eruption scenario including pyroclastic flows will be made.

The methodology used in the assessment of the moderate volcanic eruption is discussed in Chapter 2. The risks from the moderate volcanic eruption through the repository are assessed in Chapter 3 and the results of the assessments are interpreted and compared to other societal risks in Chapter 4 where a method for risk visualization system is also presented.

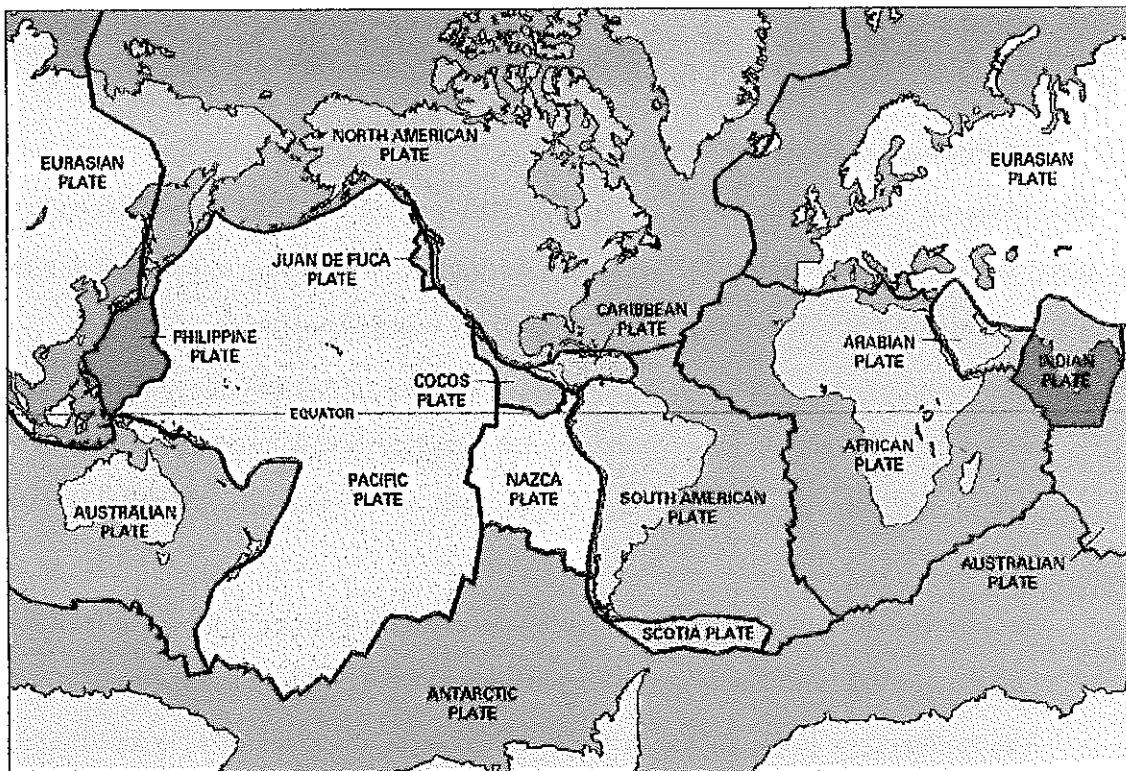


Fig.1-1 Major tectonic plates of the world

Source : (21)

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 Hypothetical Geologic Repository

This research study pertains to a hypothetical geological high level radioactive disposal facility sited in Japan. The following assumptions are made to characterize the general aspects of a hypothetical geologic high level waste repository:

- The repository is sited in an area forecast for long term geologic stability where major seismic and volcanic events are not expected in the foreseeable future.
- Active institutional controls are not present to prevent unauthorized human intrusion.
- Passive institutional controls are present to provide information on the location, design, content, and hazard of the repository but the controls are ignored.
- The radioactive waste packages are assumed to be disposed of in a multibarrier confinement system.
- The high level radioactive waste is mixed with melted glass material and when cooled forms a solid leach-resistant package of vitrified waste.
- The vitrified waste is sealed into a thick-walled carbon steel container (overpack).
- The waste packages are placed in a deep underground labyrinth one thousand meters below the ground surface.
- The area between the host rock and the waste packages is backfilled with a buffering material⁽⁵⁾. The buffering material is used to control water permeability, sealing, adsorption, thermal diffusivity, long term chemical

stability, chemical buffering, and load bearing capacity.

- After waste package emplacement in the underground pits or tunnels and backfilling with the leach-resistant materials, the repository system is entirely passive with no requirements for continuing human involvement.

2.2 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 ⁽³⁾⁽⁴⁾, 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.

The RSAC-5 computer code⁽⁶⁾ 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 JNC⁽⁵⁾ are used to determine the consequences from drinking water contaminated with radionuclides.

2.3 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 were therefore not evaluated again⁽⁴⁾. 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⁽⁴⁾. Because of these differences, consequence assessments are performed on a scenario-specific basis. In addition to radiological consequences, the eruption of a moderate volcano also has non-radiological consequences. The non-radiological consequences include deaths and injuries caused by volcanic blast, ash fallout, and pyroclastic flows. Estimates of the consequences of such events are based on world-wide records of similar experiences.

2.4 Assessment of Likelihoods and Probabilities

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⁽⁴⁾. 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 ⁽¹⁾.

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.

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.

Uncertainties exist in both the assessment of consequences and the assessment of likelihood from a moderate volcanic eruption. 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 moderate volcanic eruptions. These factors are judged to cause uncertainties of at least one order of magnitude in risk.

3. Evaluation of Volcanism Scenario

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, Suwanose-Jima, Fukutoku-Okanoba (submarine), Me-Akan, Adataru, Kuju, Hokkaido-Komagatake, and Unzen (see Fig.3-1). 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 3-1. The information relating to the magnitude of volcanic eruptions in Japan during the last 2,000 years is arranged according to the number of volcanoes in six magnitude intervals and charted in Fig.3-2.

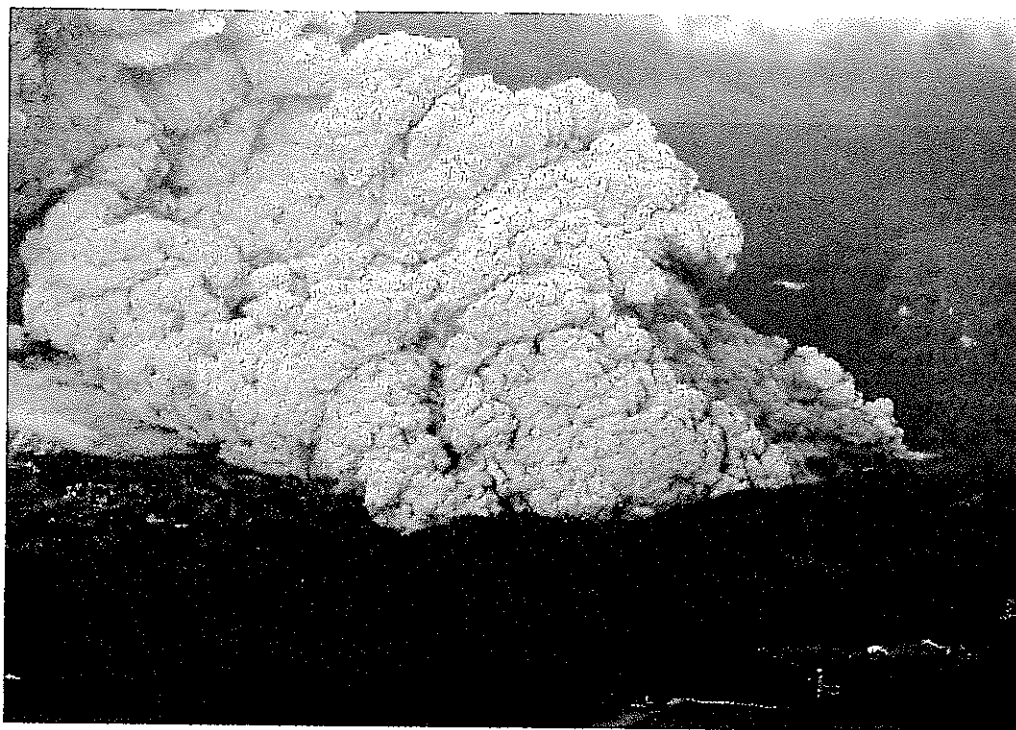


Fig.3-1 Pyroclastic flow of Unzen Volcano dated 24th June, 1993
(presented by S. Nakada)

Table 3-1 Characteristics of selected worldwide volcanoes
(listed chronologically)

Eruption	Place	Year	VEI*	Comments
Toba	Indonesia	71000 BC	8	Last magnitude 8 volcano. Earth's temperature plunged 12°C, 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 0.5°C

* 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

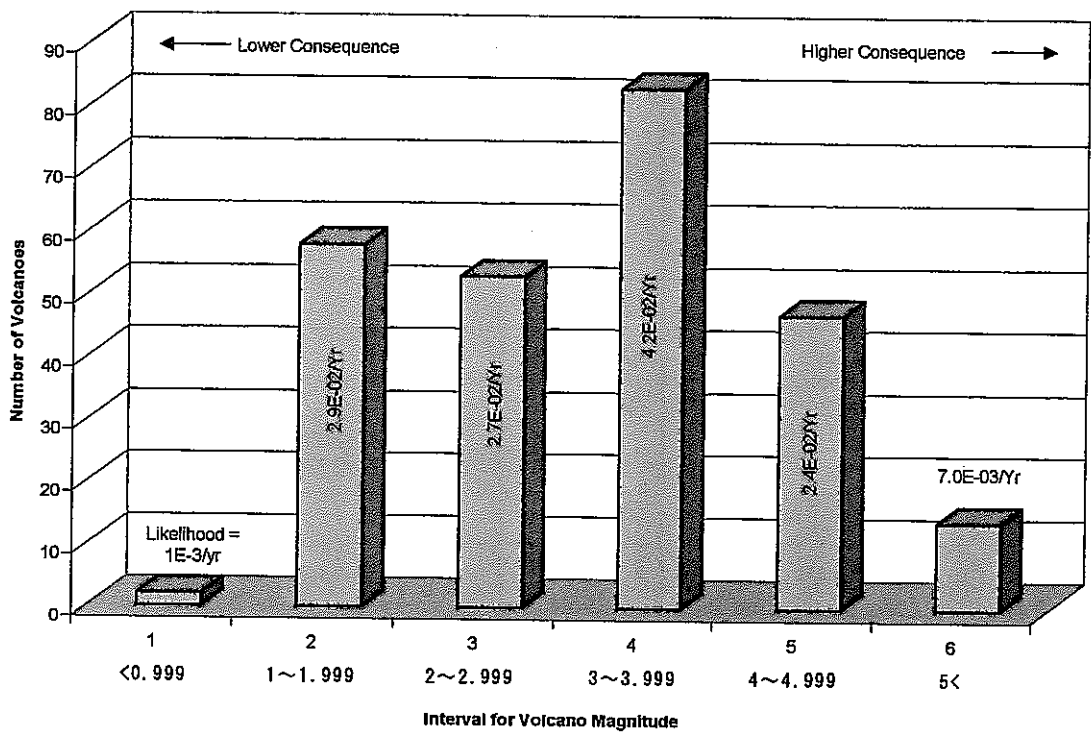


Fig.3-2 Number of volcanoes in Japan during the last 2000 years as a function of the volcano magnitude source : (13)

3.1 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 and middle-scale volcanic event emerging through a geologic HLW repository, the potential radiological consequences are evaluated for a 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.”

3.2 Event Likelihood

If one assumes there are about 80 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 3×10^{-3} per year. This probability is conservative because some of the 80 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 8 km 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} .

However, volcanoes are not randomly distributed and are more likely to emerge in traditional areas such as above a subduction zone. Some external event such as a cosmic impact or some other cause such as changes in subduction boundaries may be required to cause a volcano to emerge in a non-traditional area not associated with subduction. If the volcanic eruption in a non-traditional zone were triggered by a cosmic impact such as has been postulated for the Chagos Islands, Laccadive Islands, and Yellowstone volcanic eruptions ⁽²²⁾, then the probability of a volcano emerging in a non-traditional zone is the likelihood of a Tunguska-class impact ($1/300$ years between impacts⁽³⁾) times the area of Japan ($380,000 \text{ km}^2$) divided by the area of the earth ($5 \times 10^8 \text{ km}^2$) or 2.5×10^{-6} . Assuming that a volcano is contained in a circle with a diameter of 8 km and that there are 80 volcanic sites in Japan, then the probability of a volcano emerging in a traditional area is $80 \times 1.3 \times 10^{-4}$ or 1.04×10^{-2} . Thus, according to this estimate, a volcano is approximately 4000 ($1.04 \times 10^{-2} / 2.5 \times 10^{-6}$) times more likely to emerge in a traditional area than in a non-traditional area. To account for uncertainties and the possibility of changes in subduction boundaries, a new volcano is conservatively estimated to be at least 1000 times more likely to emerge in traditional volcanic zones that are about 125 km 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 properly-sited geologic HLW repository is conservatively estimated at less than 3×10^{-10} per year or, for a middle-scale eruption case 4.7×10^{-9} per year (3.6×10^{-2} per year (from Fig.3-2) $\times 1.3 \times 10^{-4} \times 0.001$).

3.3 Consequences of Volcano at Repository

3.3.1 Tambora Class (VEI =6~7) Eruption Case⁽³⁾

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 assessment in Heisei 8th fiscal year only considers the radiological impacts of the radioactive materials that are part of the volcanic eruption column⁽³⁾. 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⁽⁷⁾.

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-5 computer code⁽⁶⁾. 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 shown in Table 3-1).

3.3.2 Middle-Scale (VEI=3~5) Eruption Case

In this section, a middle-scale eruption case such as Unzen~Fuji (VEI=3~5) was discussed, in order to compare the previously discussed large-scale eruption case.

Mortality ratio due to the pyroclastic flow is the largest in volcanic phenomena (as shown in Fig.3-3) and the most hazardous factor around the volcano.

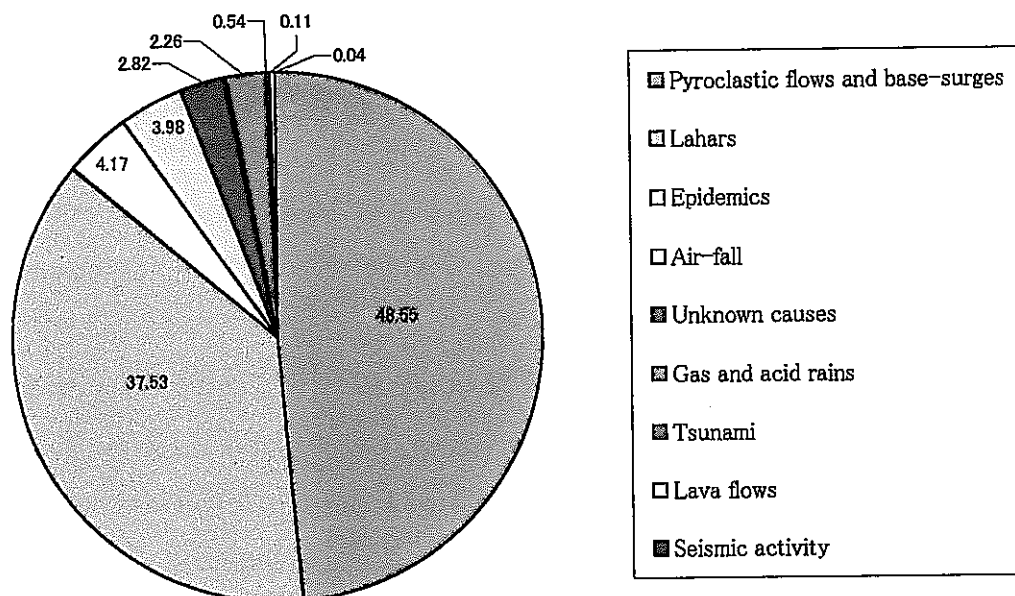


Fig.3-3 Mortality (in percentage) due to volcanic phenomena during the last century
source : (8)

(1) Calculation Case

Thus, in order to make a comparison of radiological and non-radiological effects, the assumptions were given as follows :

- ① We assign a likelihood of $3.6E-02/y$ for occurrence of a moderate volcano in Japan according to Fig.3-2. This value is about ten times larger than that ($=3 \times 10^{-3} / y$; see section 3.2) in large eruption case.
- ② We assume all volcanoes produce pyroclastic flows.
- ③ To estimate the non-radiological consequences of the pyroclastic flows, the ultimate footprint of pyroclastic flow is determined based on historical data (with no use of calculation model for pyroclastic flow but referring to an example shown in Fig.3-4⁽⁹⁾).

Based on references^{(14)~(19)}, pyroclastic flows typical run from 2 km to 50 km (see Fig.3-5). For the current analysis, a pyroclastic flow from a moderate volcano is assumed to extend for a distance of 10 km.

Based on aerial photos of volcanic regions⁽¹⁸⁾, the flow path through a typical valley would not exceed 1 km, and also based on aerial photos of volcanic regions, the pyroclastic flow path of a typical moderate volcano would subtend an arc of approximately 60 degrees.

- ④ Although flooding from a volcanic eruption would be secondly typical of the lahar flows discussed in the literature (see Fig.3-3), the radiological consequences of a lahar would be insignificant. Inclusion of lahars would increase the reported non-radiological risk but the literature does not typically associate lahars with volcanoes in Japan. At present, we have not included lahar flows in the analysis.
- ⑤ An average population density of 326 people/km² ⁽²³⁾ is used when determining population values for the RSAC-5 model and for the involved populations exposed to radiological and non-radiological hazards. Population values in an RSAC-5 analysis sector are determined for five radial intervals.

The depth of a pyroclastic flow is of no importance since anyone exposed to the flow would be killed by the extreme heat of the material in the flow.

Based on the above ③, for a pyroclastic flow extending 10 km from the vent and subtending an arc of 60 degrees, about 17,000 ($3.14 \times (10 \text{ km})^2 \times 60 \text{ degrees} / 360 \text{ degrees} \times 326 \text{ people/km}^2$) people would be in the path of and at risk of death from a pyroclastic flow. If the pyroclastic flow were to extend to 25 km, about 107,000 people would be killed.

- ⑥ Advanced warning of the volcanic eruption and subsequent evacuation would reduce the number of lives lost as a result of a volcanic eruption. However, people do not always follow the advice to evacuate. For our analysis, we evaluate the consequences assuming that no evacuation occurs.

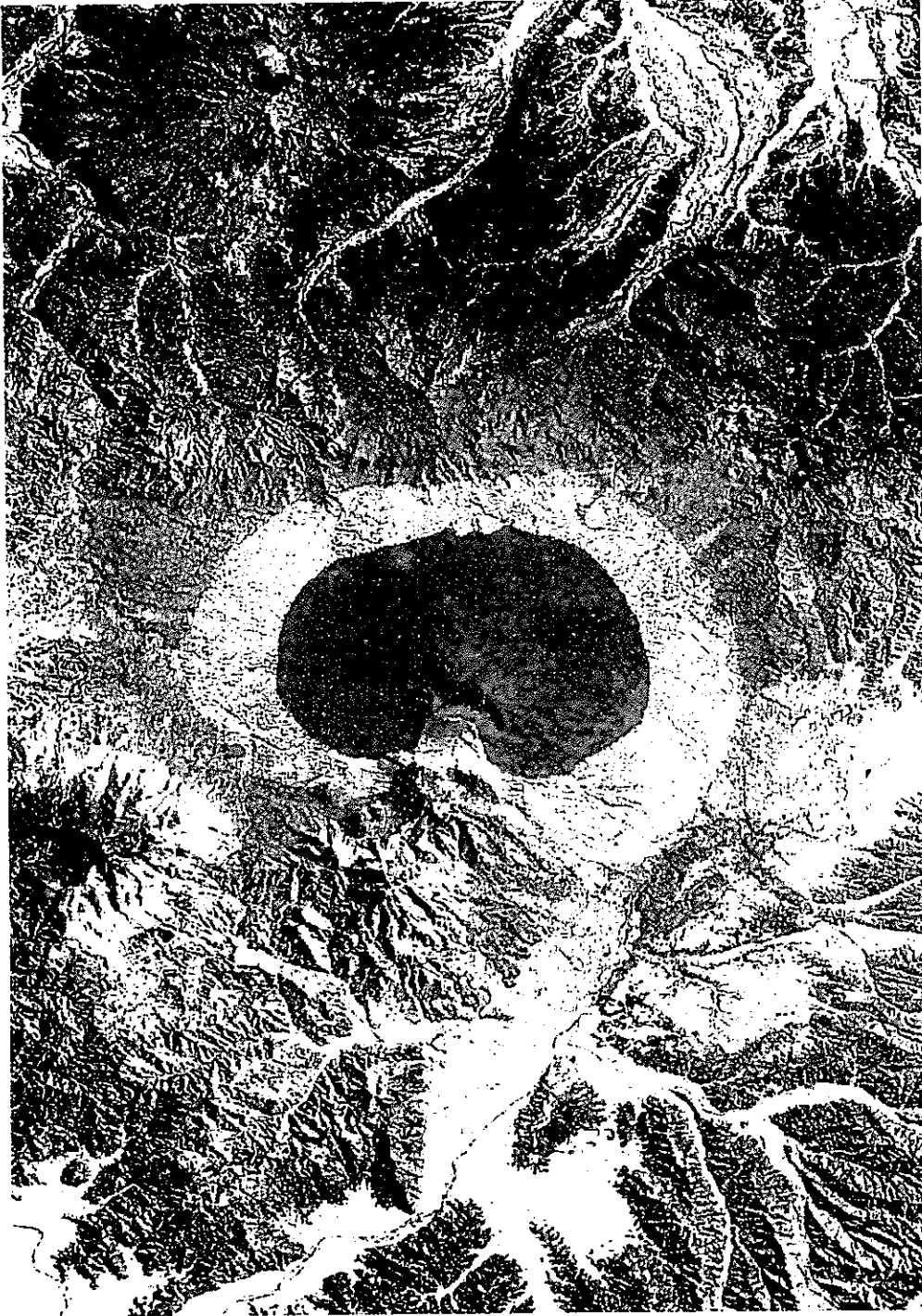


Fig.3-4 A result of simulation indicating footprint of pyroclastic flow by using energy cone model
source : (9)

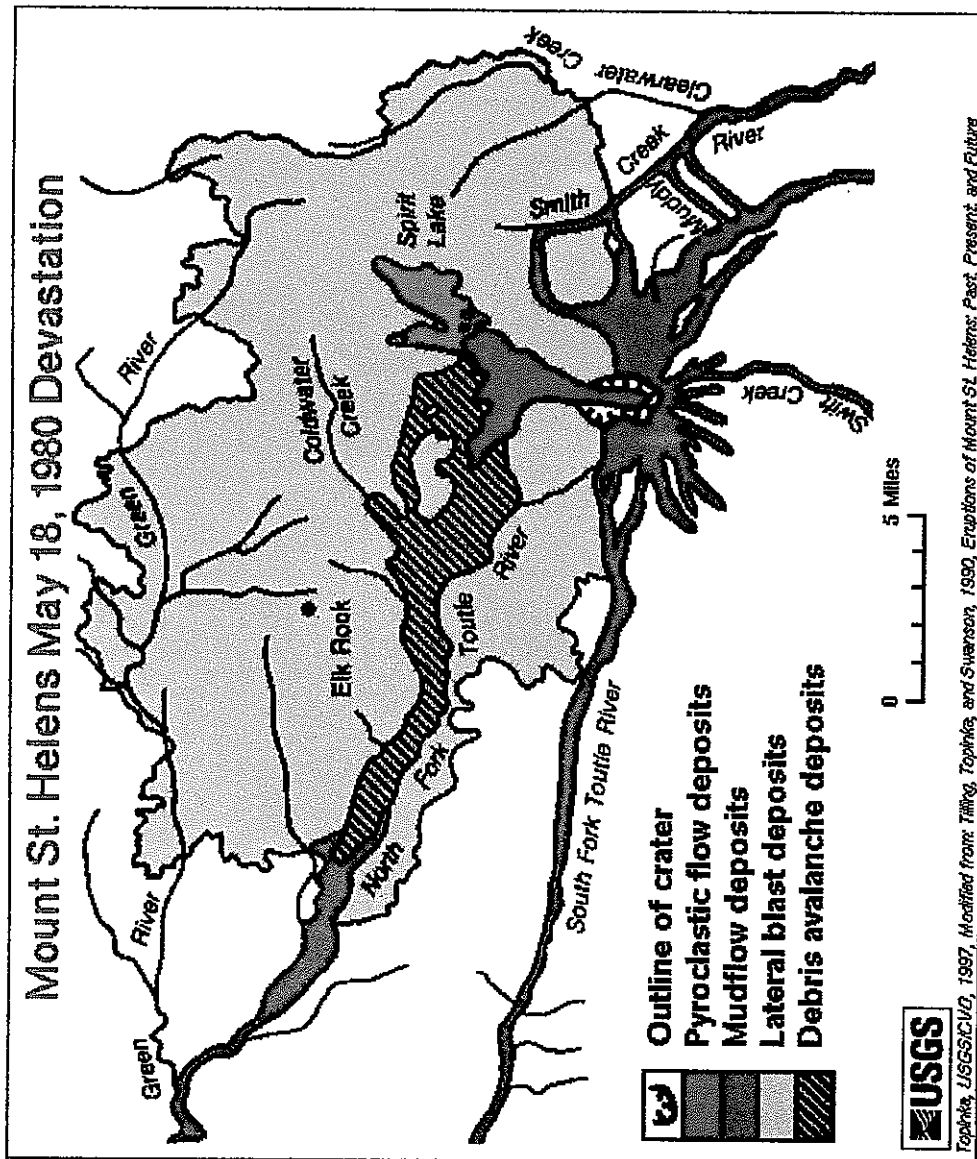


Fig.3-5 Damage around Mount St. Helens

source : (16)

- ⑦ The moderate volcanic eruption scenario under study occurs 1,000 years after canister emplacement.

Consistent with the characteristics of volcanoes with orogenic magma intrusions (high water, high silica), the released radioactive materials would be divided among three types of volcanic hazards: the volcanic blast, an eruption column, and pyroclastic flows. Estimates are made for material at risk(MAR), damage ratio(DR), airborne release fraction(ARF), and respirable fraction(RF) for the volcanic blast/eruption column and the pyroclastic flows.

The MAR consists of the radionuclides in 40,000 canisters 1000 years after emplacement⁽⁵⁾. The DR for the volcano explosion is the same as in section 3.3.1 (1000 canisters / 40,000 canisters = 0.025).

The damage ratio for the volcanic blast, volcanic eruption column, and pyroclastic flow is based on the volume of material ejected from a moderate volcanic eruption and a vent area of the volcano. A large volcano ejects > 0.1 km³ of material as a result of the volcanic eruption ⁽¹⁵⁾. For the moderate volcano, a volume of 0.1 km³ is assumed.

If the moderate volcanic eruption is assumed to create a crater that is at the same depth as the waste, 1 km, then the area of eruption is 0.1 km³ / 1 km = 0.1 km². To better estimate the vent area affecting the canisters, only 10% of the area is assumed to be affected. Since the area of the repository is 5.4 km², the damage ratio for a pyroclastic flow is 0.01 km² divided by 5.4 km² or 0.00185 and would involve about 76 canisters.

A component of the source term results from pre-existing fines produced by the vitrification process. The component of the source term attributable to pre-existing fines is included by calculating a DR for the fines. The fraction of pre-existing fines is up to 0.035% of the HLW ⁽¹²⁾. Multiplying the DR for the volcanic blast, eruption column and pyroclastic flows by the fraction of

pre-existing fines gives a DR for the fines of 6.48×10^{-7} (0.00185×0.00035).

For the present analysis, the product of ARF \times RF for the volcanic blast and eruption column is 0.01 which is the same as in section 3.3.1. The vitrification process produces pre-existing fines with a respirable fraction of 0.7⁽¹²⁾ and an assumed bounding ARF of 1. The ARF and RF for the pyroclastic flow is estimated using Equation 4-1 in reference ⁽¹²⁾.

$$\text{ARF} \times \text{RF} = (A)(P)(v)^2$$

where A : empirical correlation, $2\text{E-}11$ [$\text{cm}^3/(\text{g}\text{-cm}^2/\text{s}^2)$]

P : specimen density [g/cm^3]

v : velocity [cm/s]

The density, P, of vitrified waste is $2,800 \text{ kg}/\text{m}^3$ ⁽⁵⁾ or $2.8 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Typical velocities for a pyroclastic flow from a moderate volcanic eruption are on the order of 100 mi/hr or 160 km/hr⁽¹⁹⁾. With a velocity of 160 km/hr (4,444 cm/s) the ARF \times RF is:

$$2\text{E-}11 [\text{cm}^3/\text{g}\text{-cm}^2/\text{s}^2] \times 2.8 [\text{g}/\text{cm}^3] \times (4444 [\text{cm}/\text{s}])^2 = 1.1 \times 10^{-3}$$

The Leak Path Factor is 1 since no mechanism exists for containing the radioactive material.

The MAR and release factors are summarized in Table 3-2(1). Using these release factors, the radioactive source terms for the moderate volcanic eruption column and the pyroclastic flow are calculated and the resulting source terms are displayed in Table 3-2(2).

Table 3-2(1) Summary of MAR, DR, ARF, and RF for moderate volcanic eruption

Isotope	Grams per Canister	Number of Canisters	MAR [g]	DR	DR Fines	Volcanic Column ARF×RF	Pyroclastic Flow ARF×RF	Fines ARF×RF
Se-79	7.99E+00	40000	3.20E+05	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Zr-93	1.00E+03	40000	4.00E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Tc-99	1.06E+03	40000	4.24E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Pd-107	2.75E+02	40000	1.10E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Sn-126	3.58E+01	40000	1.43E+06	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Cs-135	4.96E+02	40000	1.98E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Th-230	5.44E-03	40000	2.18E+02	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Th-232	1.25E-03	40000	5.00E+01	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
U-233	2.46E-01	40000	9.84E+03	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
U-234	2.35E+00	40000	9.40E+04	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
U-235	2.08E+01	40000	8.32E+05	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
U-236	1.29E+01	40000	5.16E+05	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
U-238	1.94E+03	40000	7.76E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Np-237	8.36E+02	40000	3.34E+07	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Pu-239	5.34E+01	40000	2.14E+06	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Pu-240	3.76E+01	40000	1.50E+06	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Am-241	5.54E+01	40000	2.22E+06	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7
Am-243	8.71E+01	40000	3.48E+06	1.85E-03	6.48E-07	0.01	1.11E-03	0.7

Table 3-2(2) Radioactive source term for moderate volcanic eruption

Isotope	Volcanic Column Source Term [g]	Pyroclastic Source Term [g]	Specific Activity [Ci/g]	Volcanic Column Source Term [Ci]	Pyroclastic Flow Source Term [Ci]
Se-79	6.06E+00	8.00E-01	7.04E-02	4.27E-01	5.63E-02
Zr-93	7.59E+02	1.00E+02	2.54E-03	1.93E+00	2.54E-01
Tc-99	8.04E+02	1.06E+02	1.71E-02	1.38E+01	1.81E+00
Pd-107	2.09E+02	2.75E+01	5.20E-04	1.09E-01	1.43E-02
Sn-126	2.72E+01	3.58E+00	2.87E-02	7.80E-01	1.03E-01
Cs-135	3.76E+02	4.96E+01	1.16E-03	4.37E-01	5.76E-02
Th-230	4.13E-03	5.44E-04	2.04E-02	8.42E-05	1.11E-05
Th-232	9.49E-04	1.25E-04	1.11E-07	1.05E-10	1.39E-11
U-233	1.87E-01	2.46E-02	9.79E-03	1.83E-03	2.41E-04
U-234	1.78E+00	2.35E-01	6.33E-03	1.13E-02	1.49E-03
U-235	1.58E+01	2.08E+00	2.19E-06	3.46E-05	4.56E-06
U-236	9.79E+00	1.29E+00	6.54E-05	6.40E-04	8.44E-05
U-238	1.47E+03	1.94E+02	3.40E-07	5.01E-04	6.60E-05
Np-237	6.34E+02	8.37E+01	7.13E-04	4.52E-01	5.96E-02
Pu-239	4.05E+01	5.34E+00	6.29E-02	2.55E+00	3.36E-01
Pu-240	2.85E+01	3.76E+00	2.30E-01	6.56E+00	8.65E-01
Am-241	4.20E+01	5.54E+00	3.47E+00	1.46E+02	1.92E+01
Am-243	6.61E+01	8.72E+00	2.02E-01	1.34E+01	1.76E+00

⑧ The release height from the volcanic eruption is determined assuming that the height is less than 2,000 m (For example, the summit of the Fernandian volcano is at 1100m⁽²⁰⁾). To obtain a conservative estimate for dose, 1,000 m is chosen as a typical release height. The input values for the RSAC-5 parameters, stack diameter and exit velocity, give an effective release height of about 1,135 m.

The release height from the pyroclastic flow is assumed to be at 10 m with a buoyant plume rise component. The heat emission rate input to the buoyant plume rise model gives an effective release height of about 45 m.

During a volcanic eruption, stable meteorological conditions are not expected to exist. To obtain a realistic consequence estimate, moderately stable meteorological conditions are used. The meteorological conditions are simulated using Pasquill-Gifford stability class D with a wind speed of 4 m/s⁽¹⁰⁾ to be more conservative than in reference⁽³⁾.

To simulate direction-dependent receptor conditions, RSAC-5 allows population values, dispersion coefficients, and wind velocities to be entered for sixteen compass sectors according to the area consistent with the plume spreading. For the moderate volcanic eruption simulation, no direction-dependency is assumed and the population and meteorological conditions are the same for all compass directions.

(2) Result of Consequence Analysis

The consequences related to the airborne release of radioisotopes from the emplaced waste packages in the geological repository are considered below.

Using the above (1), RSAC-5 calculations were performed to evaluate the dose to a maximally exposed individual at downwind locations up to 100 km away from the release point for both the volcanic column eruption and the pyroclastic flow. These results are shown graphically in Fig.3-6(1) for the pyroclastic flow and in Fig.3-6(2) for the volcanic column.

RSAC-5 calculations were also performed to evaluate the average fifty year committed effective dose equivalent (CEDE) to the population within an 80 km radius

of the volcanic vent for both the pyroclastic flow and the volcanic column eruption. The population and committed population dose for one of RSAC-5's sixteen compass sectors and for each radial interval are shown in Table 3-3. In addition to the population dose, an average dose to an individual in the population is computed by dividing the population dose by the number of people. The average CEDE to an individual as a result of the pyroclastic flow is 5.85 mSv while the average CEDE to an individual as a result of the volcanic column is 23.4 mSv. Applying the ICRP conversion factor of 5×10^{-2} fatalities/Sv⁽¹¹⁾ for exposure-related health effects indicates that radioactive releases in the volcanic column would cause an increase of 480 (9.6×10^3 person-Sv $\times 5 \times 10^{-2}$ fatalities/Sv) fatal cancers in the population and an increased risk of fatal cancer of 0.12% (2.34×10^{-2} Sv $\times 5 \times 10^{-2}$ fatalities/Sv) per person while the radioactive releases in the pyroclastic flow would cause an increase of 120 (2.4×10^3 person-Sv $\times 5 \times 10^{-2}$ fatalities/Sv) fatal cancers in the population and an increased risk of fatal cancer of 0.029% (5.85×10^{-3} Sv $\times 5 \times 10^{-2}$ fatalities/Sv) per person.

The non-radiological consequences related to the volcanic blast, eruption column and pyroclastic flows consist of both injuries and deaths. Non-radiological impacts could vary depending on the warning time and population distribution. For the current analysis, as mentioned in the above (1), no evacuation is assumed and 1000 people are assumed to be killed by the blast⁽³⁾. Injuries and deaths from the eruption column are related to ash fall downwind from the volcano. Volcanic ash is a hazard to aircraft and could cause 300 (meaning deaths of all people on board the aircraft) deaths in a commercial airliner crash. There have been over 80 reports of aircraft flying into ash clouds in the last 20 years⁽²⁴⁾.

Using the area of impact defined in the above (1), 17,000 people are at risk and assumed to be killed by a pyroclastic flow due to the high temperatures and fires. If pyroclastic flows were to extend to 25 km from the center of the volcano and the affected population is contained in one quarter of the circle surrounding the volcano, then the population at risk is on the order of 160,000 people and 107,000 people in the 60 degree subtended arc would be killed by the pyroclastic flow.

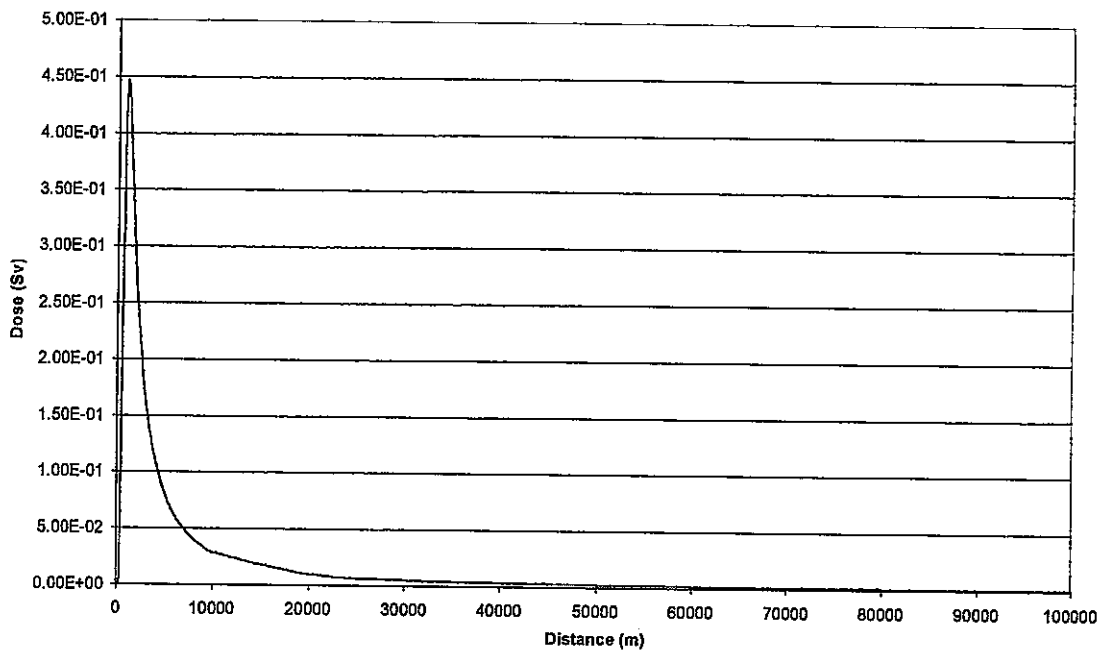


Fig.3-6(1) Fifty year committed radiation dose as a function of distance downwind from a pyroclastic flow release

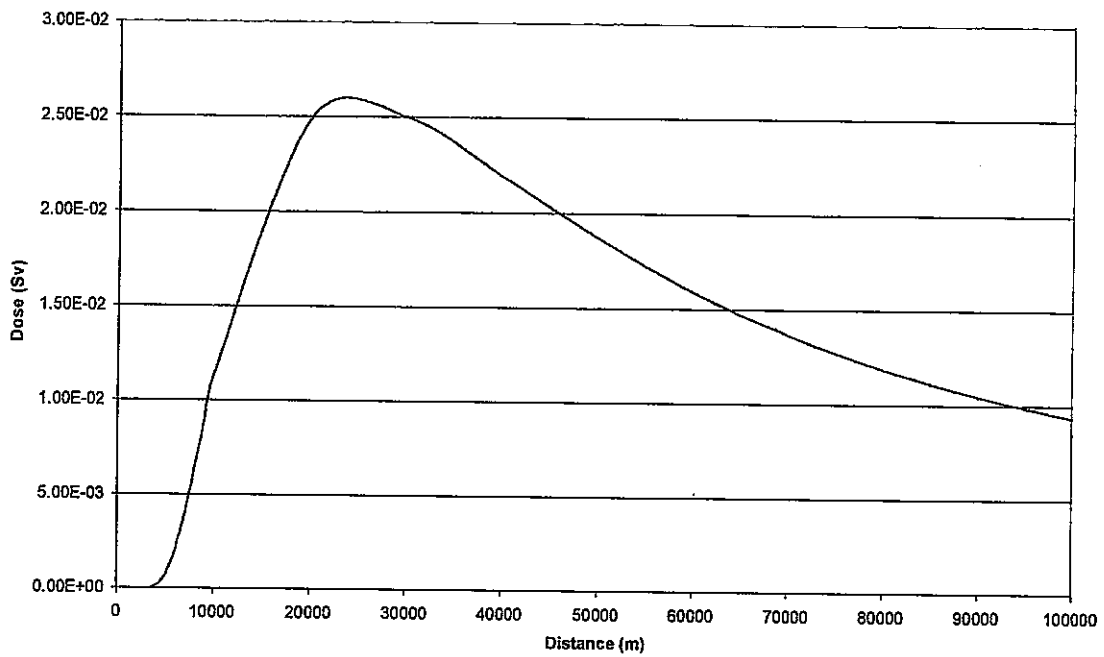


Fig.3-6(2) Fifty year committed radiation dose as a function of distance downwind from a column release

Table 3-3 Average fifty year committed effective dose equivalent to the involved population

	Downwind Distance Interval (km)					
	0-16	16-32	32-48	48-64	64-80	0-80
Compass Sector Population	1.70E+04	5.00E+04	8.30E+04	1.20E+05	1.50E+05	4.10E+05
Population CEDE from Pyroclastic Flow (person-Sv)	6.20E+02	5.30E+02	4.20E+02	3.90E+02	3.90E+02	2.40E+03
Individual CEDE from Pyroclastic Flow (Sv)	3.65E-02	1.06E-02	5.06E-03	3.25E-03	2.60E-03	5.85E-03
Population CEDE from Volcanic Column (person-Sv)	1.80E+02	1.50E+03	2.40E+03	2.70E+03	2.80E+03	9.60E+03
Individual CEDE from Volcanic Column (Sv)	1.06E-02	3.00E-02	2.89E-02	2.25E-02	1.87E-02	2.34E-02

4. Interpretation of Results

In this chapter, discussion was made on how to visualize the result of consequence analysis on volcanism scenario at Japan's future HLW disposal site. And, the risk associated with its scenario was compared to other societal risks and a method to present the risks was studied.

4.1 Risk Assessment

The estimated likelihood of occurrence for the moderate volcanic eruption beneath a properly-sited repository is 4.7×10^{-9} per year with an estimated non-radiological consequence of 18,300 deaths in an assumed population of 414,298 people within 80 km of the volcano. Of these deaths, 1,000 are from the volcanic blast, 300 are from the volcanic column, and 17,000 are from the pyroclastic flow. An individual's probability of death due to non-radiological effects is 18,300 divided by 414,298 or 4.42×10^{-2} .

The number of expected deaths per year as a result of non-radiological effects is determined by multiplying the event likelihood (4.7×10^{-9} per year) by the number of deaths due to non-radiological effects (18,300). The results of the multiplication shows that non-radiological effects cause 8.6×10^{-5} deaths per year.

The radiological consequence, based on the output from RSAC-5, is 600 (480 (volcanic column with fines) + 120 (pyroclastic flow with fines)) deaths per event in an assumed population of 414,298 people with an individual's probability of death due to radiological effects being 600 divided by 414,298 or 1.45×10^{-3} . The number of expected deaths per year as a result of radiological effects is determined by multiplying the event likelihood (4.7×10^{-9} per year) by the number of deaths due to radiological effects (600). The results of the multiplication shows that radiological effects cause 2.82×10^{-6} deaths per year.

To compare with common accident statistics expressed in deaths per 100,000 people, the event likelihood (4.7×10^{-9} per year) is multiplied by the probability of death due to non-radiological effects (4.42×10^{-2}) and then multiplied by 100,000 giving 2.08×10^{-5} as the number of people in a population of 100,000 who would die from non-radiological consequences of the volcanic eruption. Similarly the number of people in a population of 100,000 who would die from radiological consequences of the volcanic eruption is 6.82×10^{-7} (4.7×10^{-9} per year $\times 1.45 \times 10^{-3} \times 100,000$).

4.2 Comparison to Deaths from Other Causes

Based on a historical 27 accidental deaths per year per 100,000 people for other accidents reported by Japan in 1993, a person in the assumed population is 1.3 million $(27 / (2.08 \times 10^{-5} + 6.82 \times 10^{-7}))$ times more likely to die from other accidents than from the non-radiological and radiological effects of a volcanic eruption at the repository.

The death rates for the four leading causes of death as well as for industrial and road traffic accidents in Japan are illustrated in Fig.4-1.

The risk from a volcano alone is much less than the risks from the other causes of death considered in Figure 4-1. Eruption of the volcano beneath the repository increases the risk by only about 3%. Even if the annual risks were converted to a lifetime risk assuming a one hundred year lifespan, the risks from a moderate volcanic eruption would be much less than the risks from everyday accidents in Japan.

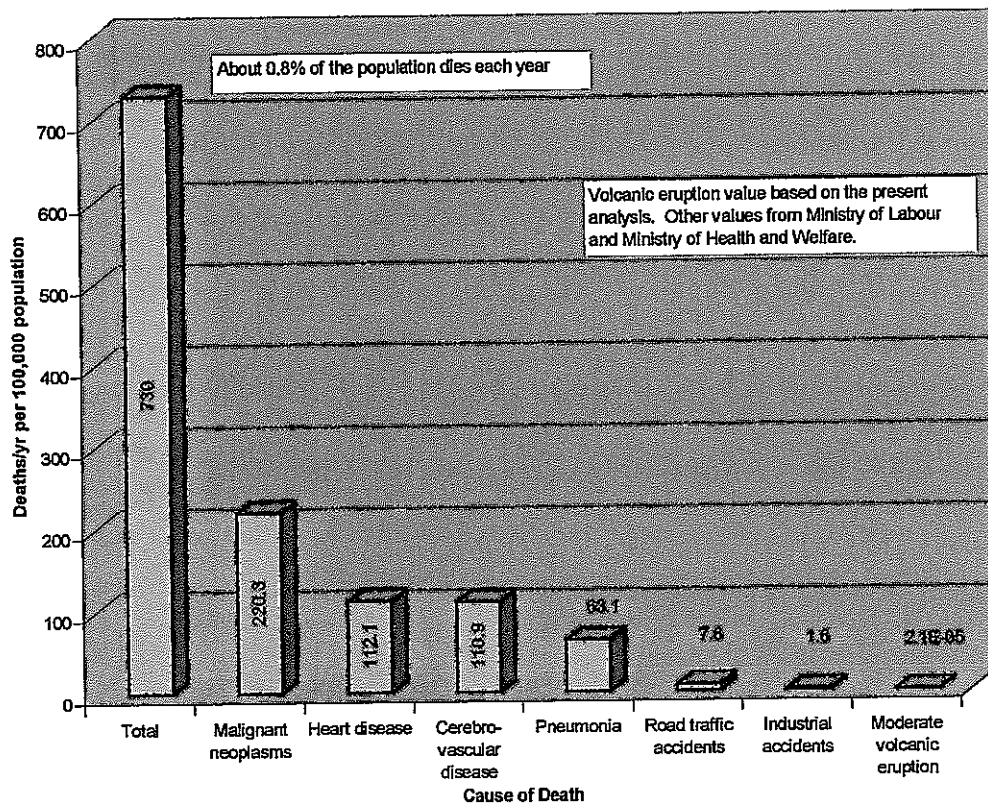


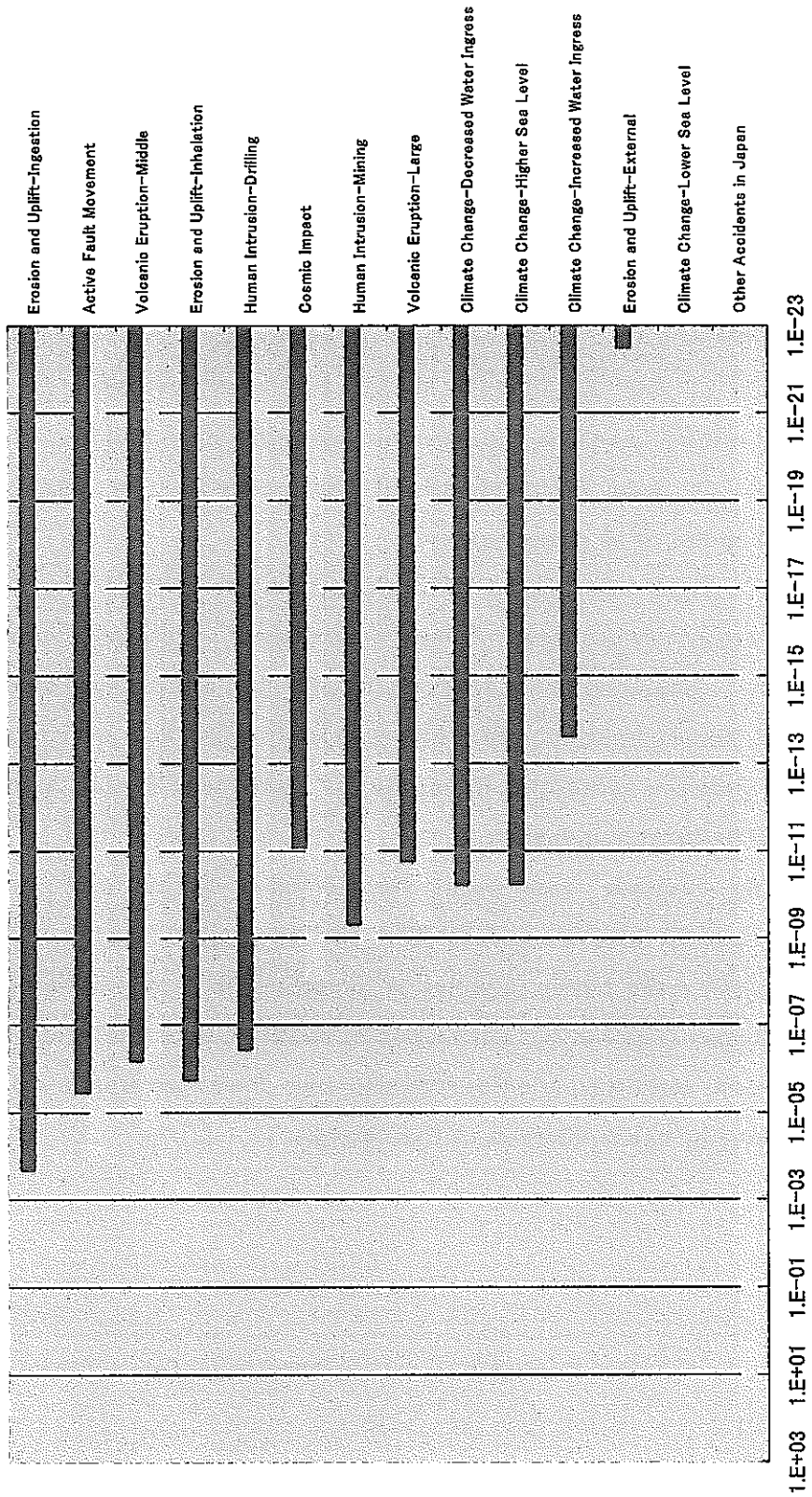
Fig.4-1 Comparison of the risk of death from a moderate volcanic eruption beneath the hypothetical repository to the risk of death from other causes in Japan for 1997

Source : (25)

4.3 Risks from Extremely Unlikely Events and Long-Term Environmental Processes

Based on the results obtained in references⁽³⁾⁽⁴⁾ and this year, 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 Fig.4-2).

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.



Expected deaths per 100,000 people from Non-Radiological Impacts Expected deaths per 100,000 people from Radiological Impacts

Fig.4-2 Expected death rates from extremely unlikely events, long-term environmental processes and from other accidents in Japan

4.4 Visualization of Assessment Results

On extremely unlikely scenario discussed 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 ⁽⁴⁾. This year, a visualization system for presenting risks associated with volcanism scenario was developed to express the processes of consequence and evaluation in more detail.

Here, a test version of risk visualization system has been developed for the presentation of main results based on the scenario risk assesment process in this research (see Fig.4-3), by using Microsoft Visual Basic (Ver.5.0) for Win'98 as language, and Paint Shop Pro 5J as image processor.

According to Fig.4-3, there are some specific menus such as "start of scenario" "normal state" "disturbance (volcanism)" "repository damaged" "release" "impact" and "risk comparison" on the menu bar appeared in upper part of the first picture of this developed system. These presentation functions start by clicking their menu button, respectively, and the system is terminated by clicking "end" menu button. A sound effect is also produced by background music.

For example, clicking "release" menu button, the pictures of volcanic eruption and pyroclastic flow are presented to show a release of radioactive material (see Fig.4-4(1)), while clicking "impact" menu button, a series of pictures such as non-radiological impact, radiological impact (Fig 4-4(2)), distribution of radiation dose downwind from a pyroclastic flow release and distribution of radiation dose downwind from a column release are presented one by one at intervals of five seconds.

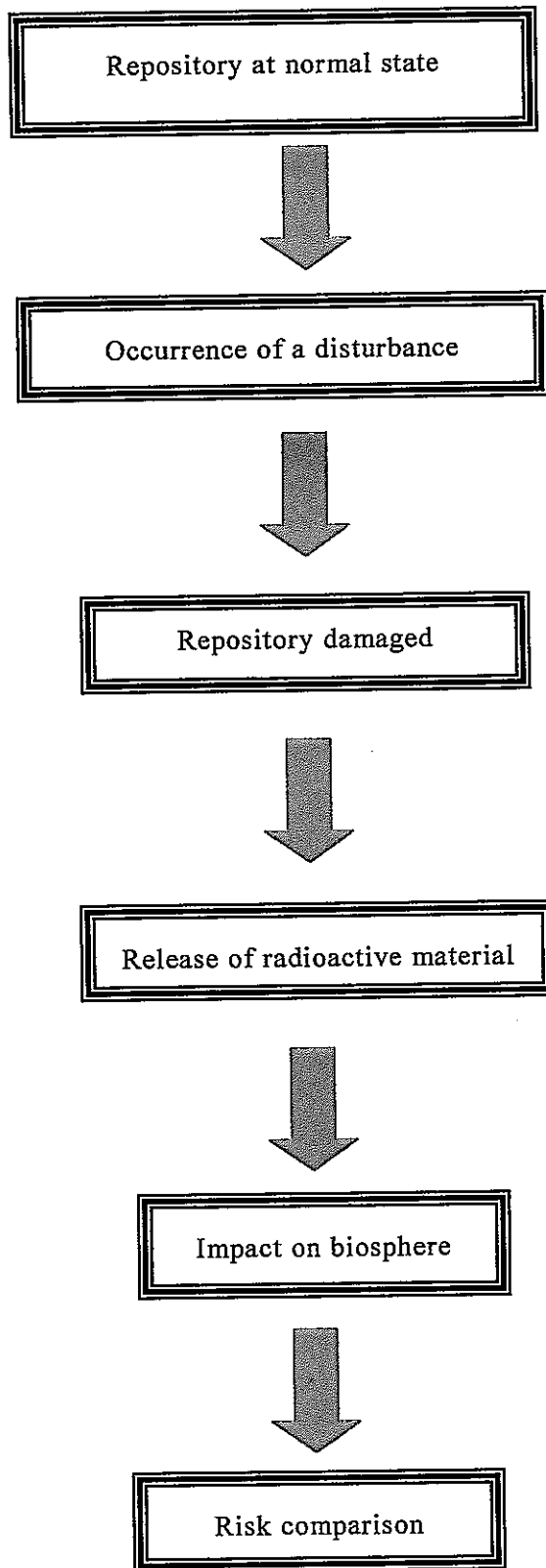


Fig.4-3 Visualization flow

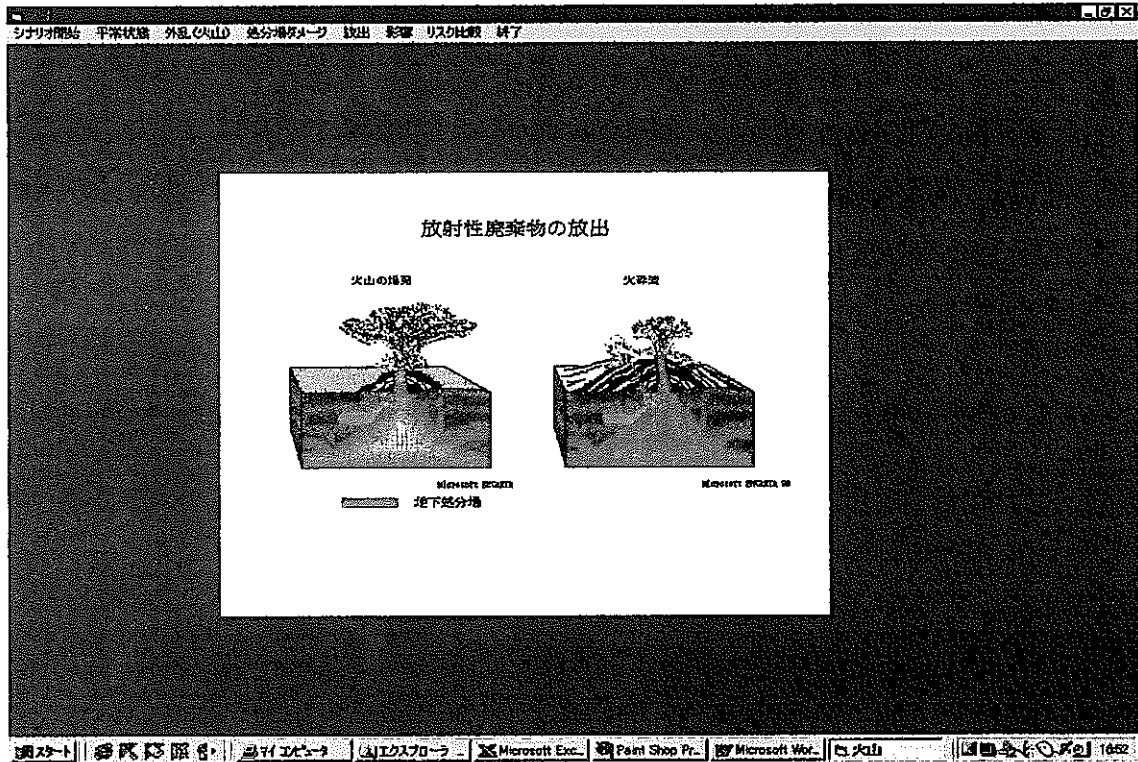


Fig.4-4 (1) Release of radioactive material

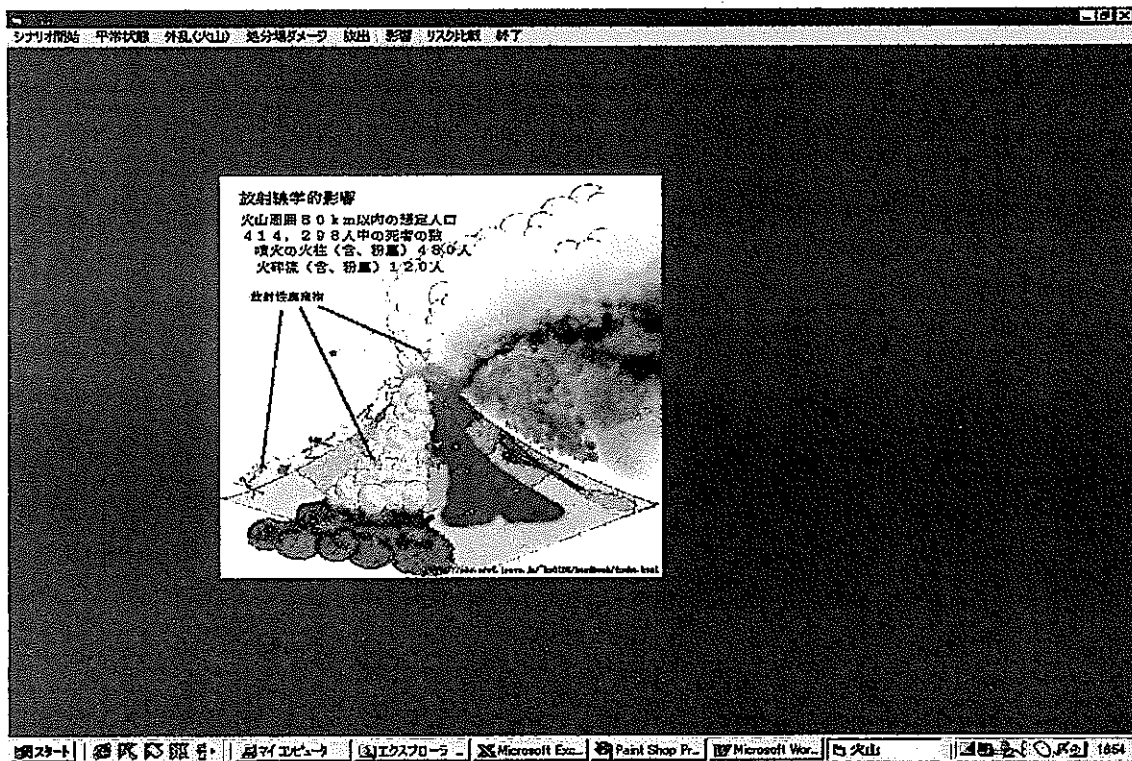


Fig.4-4 (2) Radiological impact

5. Concluding Remarks

We studied the accident scenarios (direct release scenarios) initiated by volcanism, especially a middle-scale eruption with pyroclastic flows 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, following the previous year, more realistically, a series of slides were produced for volcanism scenario, and a system was developed to support visualization of the above results.

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 by improving the above developed image-processing system).

References

- (1) MRI: 「A Study on Scenario Development for Waste Disposal Performance Assessment(Ⅲ)」 Report on Result of PNC-Commissioned Research, PNC ZJ1222 91-002(1991).
- (2) 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).
- (3) MRI: 「Research Study For Extremely Unlikely Scenario of High Level Waste Disposal」 Report on Result of PNC-Commissioned Research, PNC ZJ1222 97-005(1997).
- (4) MRI: 「Research Study For Extremely Unlikely Scenario of High Level Waste Disposal (Ⅱ)」 Report on Result of PNC-Commissioned Research, PNC ZJ1222 98-001(1998).
- (5) PNC : 「Research and Development of Geological Disposal of High Level Radioactive Waste, First Progress Report」 PNC TN1410 93-059 September (1992) .
- (6) D. Wenzel : 「The Radiological Safety Analysis Computer Program」 WINCO-1123 February (1994) .
- (7) O.B. Toon, et al. : 「Environmental Perturbations caused by the Impacts of Asteroids and Comets」 Reviews of Geophysics, February (1997) .
- (8) R. Scandone, G. Arganese and F. Goldi : 「The evaluation of volcanic risk in the Vesuvian area」 J. Volcanol. and Geotherm. Res., Vol. 58, pp263-271 (1993).
- (9) S. Aramaki : 「Development of Assessment Method for Volcanism Hazard」 Report on Result of Test Research B Supported by Budget of Ministry of Education in Heisei 6th and 7th fiscal years, No. 06558052 (1996).

- (10) K.L. Clawson, G.E. Start and N.R. Ricks : 「Climatology of the Idaho National Engineering Laboratory. 2nd Edition」 DOE/ID-12118, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Air Resource Laboratory, Field Research Division, Idaho Falls, Idaho, December (1989).
- (11) ICRP : 「1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection」 Publication 60, Annals of the ICRP, Vol.21, No.1-3, Pergamon Press, Oxford, England (1991).
- (12) J.Mishima et al. : 「Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for NonReactor Nuclear Facilities」 DOE Handbook, DOE-HDBK-3010-94, December(1994).
- (13) Hayakawa's one million-year tephra catalog, <http://www.edu.gunma-u.ac.jp/~hayakawa/catalog/2000J>, Hayakawa Paleovolcanology Laboratory, Gunma University (1996).
- (14) Pinatubo Volcano, <http://www.expo.edu.ph/pinatubo/page4.html>, ABS-CBN Broadcasting Corporation, Philippine Network Foundation, Inc. (1996).
- (15) Lyn Topinka : 「Cascades Volcano Observatory」 http://vulcan.wr.usgs.gov/Hazards/NRC_Report/nrc_volcanoes.html, United States Geological Survey, Reston, VA, February 24 (1999).
- (16) Lyn Topinka : 「Cascades Volcano Observatory」 http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/MSH/Publications/MSHPPF/PPF_pyro_flows.html, United States Geological Survey, Reston, VA, February 24 (1999).
- (17) volcano.und.edu/vwdocs/volc_images/img_unzen2.html
- (18) Prof. Mike Inggs, Radar Remote Sensing Group, University of Cape Town, <http://rrsg.ee.uct.ac.za/~jpl/DATA/LOCATION/ASIAMIDE/UNZEN/UNZEN.HTM>, Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, South Africa, 26 February (1999).
- (19) Lyn Topinka : 「Cascades Volcano Observatory」 http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/WestIndies/Pelee/description_1902_eruption.html, United States Geological Survey, Reston, VA, February 24 (1999).

- (20) netsurf.geo.mtu.edu/eos/education/slide_set2/slides.captions.html
- (21) Kathie Fraser and John Watson : 「Major Tectonic Plates of the World」
<http://geology.er.usgs.gov/eastern/plates.html>, United States Geological Survey,
Reston, VA, October 3 (1997).
- (22) David Alt and Donald W. Hyndman : 「Roadside Geology of Idaho」 Mountain
Press Publishing Co., Missoula, MT (1989).
- (23) 「The World Almanac and Book of Facts」 World Almanac, p773 (1992).
- (24) Gari C. Mayberry : 「Volcanic Ash Clouds and Aircraft Safety」 <http://www.geo.mtu.edu/department/classes/ge404/gcmayber/historic.html>, Department
of Geological Engineering and Sciences, Michigan Technological University,
Houghton, MI, USA, April 20 (1998).
- (25) Statistics Bureau & Statistics Center, Management and Coordination Agency of
Japan, Data for 1997, <http://www.stat.go.jp/1602.htm#jf02-09>, <http://www.stat.go.jp/1624.htm#jf24-02>, <http://www.stat.go.jp/1602.htm#jf02-01>, <http://www.stat.go.jp/1620.htm#jf20-03> (1999).