

# 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 研究委託内容報告書)

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

This is a blank page.



## 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.

This is a blank page.

## 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	6
2.4 発生可能性の評価	6
2.5 確率の評価 <sup>(4)</sup>	6
2.6 不確実性	7
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	15
3.2 事象の発生可能性	16
3.3 放射性ソースターム	20
3.4 処分場に対する火山の影響の大きさ	21
3.4.1 タンボラ級 (VEI=6~7) 噴火ケース <sup>(3)</sup>	21
3.4.2 中規模 (VEI=3~5) 噴火ケース	24
4. 評価結果の可視化	42
4.1 リスク評価	42
4.2 他の原因による事故死率との比較	43
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	44
4.4 評価結果の可視化	50
4.4.1 シナリオ影響評価プロセスの概要	50

4.4.2 リスクの可視化システムの開発	53
5. おわりに	55
参考文献	57
付録	61
A. RSAC-5 使用の計算フレームについて	63
B. 火砕流シミュレーションモデル分析事例	64
C. 可視化システム表示例	68

## 表 目 次

	頁
表 3-1(1) 世界の主要火山の特徴	12
表 3-1(2) 日本における最近 2000 年間の火山噴火の規模	13
表 3-2 アイソトープの世界均一容積密度	23
表 3-3(1) 火砕流による死者数	26
表 3-3(2) 過去数世紀における各火山現象での死亡者数とその比率	27
表 3-4 火砕流又は火砕サージの到達範囲	28
表 3-5 RSAC 50 マイル径方向線量計算用の人口	33
表 3-6(1) 中規模火山噴火ケースにおける MAR, DR, ARF 及び RF	36
表 3-6(2) 中規模火山噴火ケースにおける放射性ソースターム	37
表 3-7 対象人口に対する平均 50 年間預託実効線量当量	41
表 4-1(1) リスク算定根拠の概要 — ほとんど起こり得ない事象 —	45
表 4-1(2) リスク算定根拠の概要 — 長期的環境プロセス —	46
表 4-2 HLW 処分場による放射線学的集団リスク増	47
表 4-3 日本におけるほとんど起こり得ない事象、長期的環境 プロセス及び他の事故による期待死亡率	48

This is a blank page.

# 目 次

	頁
図 1-1 世界の主要な構造プレート .....	3
図 3-1(1) 雷放電をともなう桜島の爆発的噴火 .....	9
図 3-1(2) 1993 年 6 月 24 日、雲仙火山の火砕流 .....	10
図 3-1(3) 1943 年のパリクチン火山（メキシコ）の爆発的噴火 .....	10
図 3-2 環太平洋火山帯 .....	11
図 3-3 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 .....	15
図 3-4(1) 日本の活火山 .....	18
図 3-4(2) 日本列島の第四世紀火山の分布 .....	19
図 3-5 噴火事象の規模とその発生頻度との関係 .....	25
図 3-6 過去数世紀における各火山現象での死亡者数の割合 .....	27
図 3-7(1) セントヘレンス火山周辺の惨害状況 .....	29
図 3-7(2) セントヘレンス火山の火砕流 .....	30
図 3-8 雲仙火山の小規模火砕流 .....	31
図 3-9 雲仙火山周辺の航空写真 .....	32
図 3-10(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 ..	40
図 3-10(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 ..	40
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 .....	44
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 .....	49
図 4-3 中規模火山噴火のリスク解析手法のフローチャート .....	51
図 4-4 可視化フロー .....	54
付・図 B-1 ビンガム流体の模式図 .....	65
付・図 B-2 エナジーコーンの模式図（金子・安田，1993） <sup>(20)</sup> .....	65
付・図 B-3 ビンガムフローモデルによる火砕流の到達時間 .....	66
付・図 B-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 .....	67

付・図 C- 1	リスク可視化システムの開始画面	69
付・図 C- 2	平常状態	70
付・図 C- 3	平常状態の拡大図	71
付・図 C- 4	外乱（火山）の火柱（桜島）	72
付・図 C- 5	外乱（火山）の火砕流（雲仙普賢岳）	73
付・図 C- 6	処分場のダメージ	74
付・図 C- 7	放射性廃棄物の放出	75
付・図 C- 8	非放射線学的影響	76
付・図 C- 9	放射線学的影響	77
付・図 C- 10	火砕流による風下方向の放射線線量分布	78
付・図 C- 11	火柱放出による風下方向の放射線線量分布	79
付・図 C- 12	中規模火山噴火による死亡率と他の死亡原因との比較	80
付・図 C- 13	ほとんど起こり得ない事象の期待死亡率	81



## 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<sup>(1)</sup>。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<sup>(2)</sup>。過去数千年の文化を振り返ってみれば、今後数千年の間に文化、政治、人口に大きな変動が起こり、人々が処分場の記憶を喪失し、それを破壊することは十分に考えられる。

本評価で検討する他の安全性関連事項として、不連続な初期事象に加え、長期

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

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。

中規模の火山噴火を被る HLW 地層処分場から受けるリスクを評価するために、日本の火山活動の回想録を手短かにまとめて示す。特に本研究で重要な点は、通常、環太平洋火山帯として知られる地球上の特に活動的な地域である。環太平洋火山帯は、太平洋の下にある構造プレートの外側境界により形成される。“環太平洋火山帯”という名称は、世界の火山の半数以上がこの地域周辺に集まっていることから付けられたものである。日本と仮想的 HLW 処分場は、環太平洋火山

帯に沿った位置にある。

“環太平洋火山帯”での地質活動は、構造プレートの動きから生じた結果である。構造プレートの動きは、プレートが地球の中心からの熱い溶融物質上を浮動することによって生じ得る。太平洋構造プレートは、図 1-1 に示すように、日本の方向に移動し、年間 10cm の速度で、他のプレートの下にもぐり込み、地震や火山活動を引き起こしている。

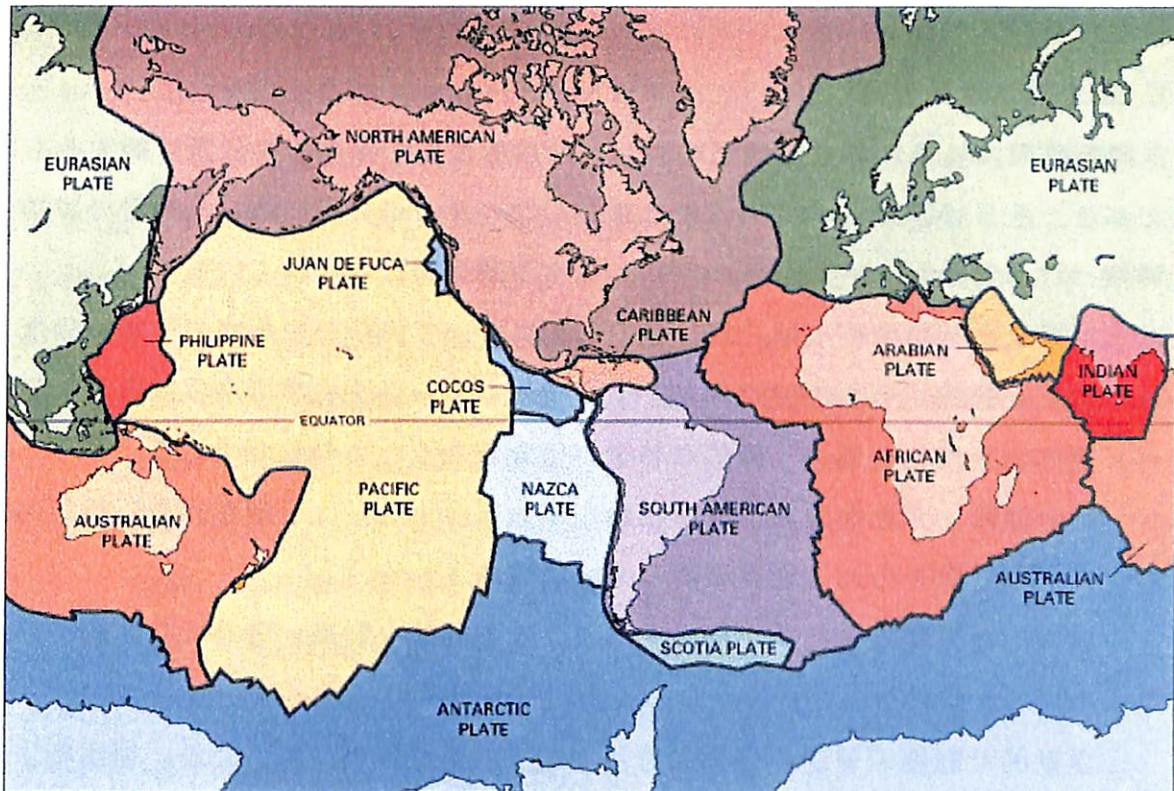


図 1-1 世界の主要な構造プレート

出典：(30)

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。

## 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。そういう処分場は実際には存在しないが、処分場に適した地層の詳細な特徴づけが行なわれ、処分場の形状に関する調査が行なわれている<sup>(5)</sup>。

以下に概説する想定事項は、処分場の形状について何らかの最終的決定が行なわれたことを意味するものではない。そうではなく、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溶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<sup>(5)</sup>。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<sup>(3)(4)</sup>。

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

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

MAR = 危険にさらされる物質

DR = ダメージを受ける割合

ARF = 空気中に放出される割合

LPF = 漏出経路係数

大気放出における連続的放出の場合、この式は下記のようなになる<sup>(3)(4)</sup>。

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

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

MAR = 危険にさらされる物質

DR = ダメージを受ける割合

ARR = 空気中に放出される率

LPF = 漏出経路係数

放射性核種の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<sup>(6)</sup>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<sup>(5)</sup>が用いられる。外部被曝線量率の算定には、MicroShield コンピュータプログラム<sup>(7)</sup>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<sup>(4)</sup>。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<sup>(4)</sup>。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<sup>(4)</sup>。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<sup>(1)</sup>。

### 2.5 確率の評価<sup>(4)</sup>

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

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

## 2.6 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

過去数十年の地質調査によって世界的に多くの知識が得られている<sup>(3)</sup>。この知識により、技術系の人々は地球規模の地殻プレート運動の動的プロセスをよりよく理解しただけでなく、この運動が日本など特定の地域の火山活動にどのような影響を与えるかも理解できるようになった（図 3-1 参照）。日本の火山は岩石圏プレート運動の産物であり、「環太平洋火山帯」（図 3-2 参照）の特徴的な火山である。弧状列島（日本やアリューシャン列島など）や大陸縁辺部（アンデス山脈など）の火山帯は海洋プレートがもぐり込む上に形成される。主要な火山軸は、もぐり込むプレートが地表から約 125 km の深さになる地点の内陸側にある乗り上げプレートの上に生成されるのが普通である。この傾向を利用して、特定の地域における火山活動の可能性を特徴づけることができる。

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（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(1) に示す。また、日本における最近 2000 年間の火山噴火の規模を表 3-1(2) に、これを 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 3-3 にそれぞれ示す。

噴火のしかたは主としてマグマに含まれるシリカ、水、ガスによって決まり、それらの含有量は部分的に溶岩供給源の地球物理学的特性と関係がある。例えば、もぐり込みプレートの火山の噴火特性（最近の雲仙やピナツボの噴火など）を比較的流れやすい溶岩を噴出する「ホットスポット」火山（ハワイの代表的な火山群など）や海底に広がる火山（アイスランドの火山など）と比較してみるとわかる。シリカと水を多く含む造山性マグマはもぐり込みプレートの火山から噴出する場合が多く、シリカと水の含有量が少ないクラトン性マグマは「ホットスポット」または海底に広がる火山から噴出する場合が多い。

本調査研究で行なう分析は、火山／地質調査から得られた知識に負う所が多く、それを HLW 地層処分場に関連づけている。地層処分場は火山活動が妥当に予見



できる地域に意図的に設置されることはない。日本やその他の国では地層処分場の安全な立地を確保する方法を立案するために多くの協力的作業が行なわれている（例えば、文献(8)を参照）。これらの方法は世界規模の火山調査から得られた知識を利用しており、可能性あるサイトの地質に関する厳密な特性把握に基づいている。多くの知識が得られているが、地球の上層マントルの外側におけるマグマの生成と火山へのマグマの移動に関する一部物理的・化学的特性については、まだよく理解されていない。

サイト特性で重要なのは、火山特性の特定と特徴づけである。地層処分場と火山活動の関係に関する調査のほとんどは、マグマの貫入または火山活動に起因する地下水流の変化による放射性核種の漏洩の可能性に焦点を当てている（文献(9)を参照）。漏洩の影響はある種の大気圏への直接放出に比べて可能性が大きい。大気圏への直接放出はほとんど起こり得ない事象の一つと判断されるので、平成8年度の調査研究では火山活動に起因する大気圏への直接放出の可能性と影響の大きさに焦点を当てている<sup>(3)</sup>。

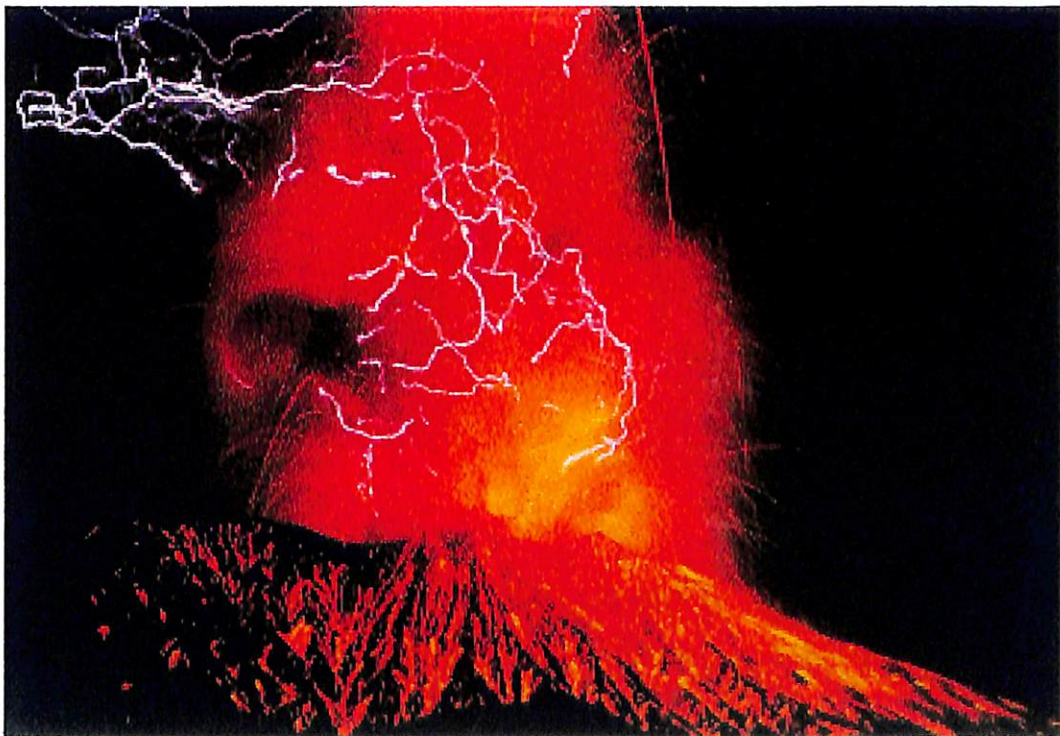


図 3-1(1) 雷放電をともなう桜島の爆発的噴火  
出典：桜島火山観測所（SVO）



図 3-1(2) 1993 年 6 月 24 日、雲仙火山の火砕流 (写真提供は S. Nakada)



図 3-1(3) 1943 年のパリクチン火山 (メキシコ) の爆発的噴火  
(写真は United States Geological Survey の K. Segerstrom による)



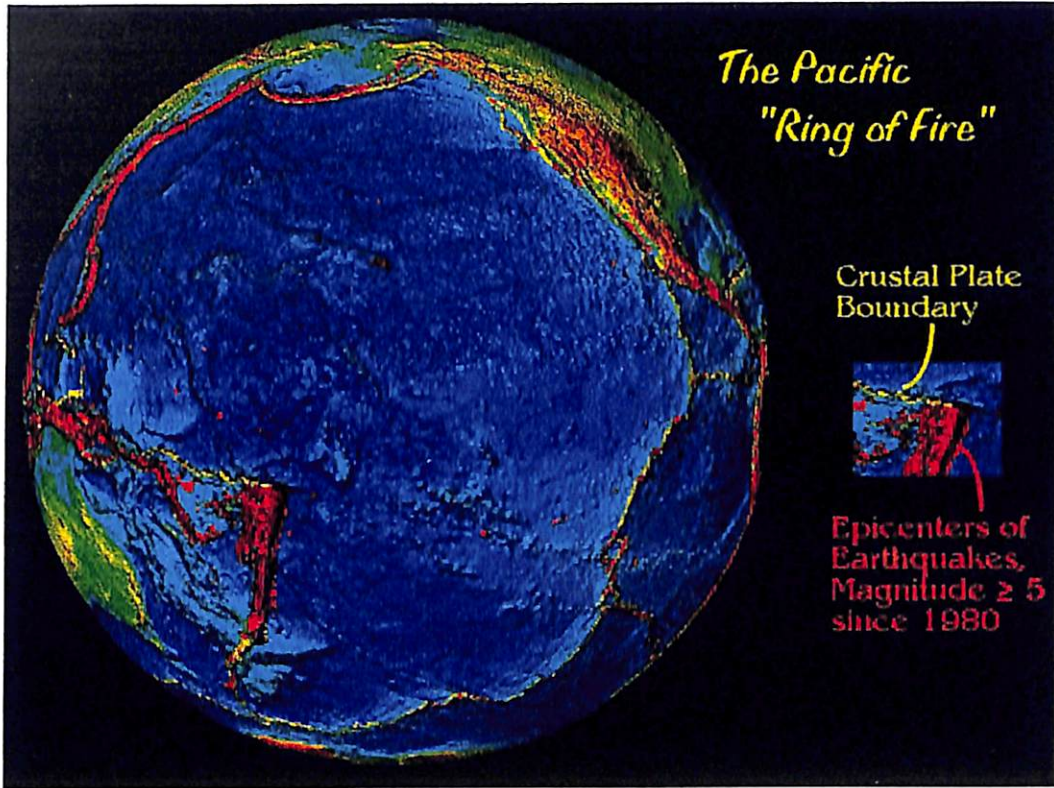


图 3-2 環太平洋火山帶

(出典：U.S.National Oceanic and Atmospheric Administration)

表 3-1(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	
ベスピオス火山	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。

表 3-1(2) 日本における最近 2000 年間の火山噴火の規模

(規模の大きな順)

Towada	5.7	Oshima (Izu)	4.3	Oshima (Izu)	3.4
Aira.Sakurajima	5.6	Oshima (Izu)	4.3	Kirishima	3.4
Aira.Sakurajima	5.5	Yakedake (Kamikochi)	4.3	Oshima (Izu)	3.4
Shikotsu.Tarumai	5.4	Toya.Usu	4.2	Oshima (Izu)	3.4
Toya.Usu	5.4	Komagatake (Hokkaido)	4.2	Fuji	3.4
Komagatake (Hokkaido)	5.4	Kirishima	4.2	Miyakejima	3.3
Kutcharo	5.3	Oshima (Izu)	4.2	Miyakejima	3.3
Shikotsu.Tarumai	5.2	Suwanose	4.1	Toya.Usu	3.3
Fuji	5.2	Oshima (Oshima)	4.1	Miyakejima	3.3
Niijima Nihon	5.2	Rausu (Shiretoko)	4.1	Kirishima	3.3
Kozushima	5.2	Tia Tia	4	Fuji	3.3
Asama	5.1	Kuchinoerabu	4	Fuji	3.3
Yakeyama (Niigata)	5.1	Fukutokuoka no Ba	4	Fuji	3.3
Aira.Sakurajima	5	Aogashima	4	Aso	3.2
Yakeyama (Niigata)	4.9	Kutcharo	4	Miyakejima	3.2
Aso	4.9	Toya.Usu	3.9	Miyakejima	3.2
Haruna	4.9	Oshima (Izu)	3.9	Iwate	3.2
Asama	4.8	Oshima (Izu)	3.9	Fuji	3.2
Suwanose	4.8	Oshima (Izu)	3.8	Beyonesu Rock.Myojinsho	3.1
Oshima (Izu)	4.8	Fuji	3.8	Oshima (Izu)	3.1
Haruna	4.8	Tokachi	3.7	Hakusan Yashi	3.1
Asama	4.8	Oshima (Izu)	3.7	Miyakejima	3.1
Unzen	4.6	Toya.Usu	3.7	Fukutokuoka no Ba	3
Aira.Sakurajima	4.6	Oshima (Izu)	3.7	Nishinoshima	3
Oshima (Izu)	4.6	Kirishima	3.7	Miyakejima	3
Kirishima	4.6	Oshima (Izu)	3.6	Torishima (Io)	3
Ata.Kaimon	4.6	Toya.Usu	3.6	Aso	3
Beppu.Yufu	4.6	Shikotsu.Tarumai	3.6	Aso	3
Komagatake (Hokkaido)	4.5	Torishima (Izu)	3.6	Beyonesu Rock	3
Ata.Kaimon	4.5	Unzen	3.6	Funka Asane	3
Beppu.Tsurumi	4.5	Yakeyama (Niigata)	3.6	Tokachi	3
Oshima (Izu)	4.4	Fuji	3.6	Iriomote NNE	3
Oshima (Izu)	4.4	Kikai	3.6	Beyonesu Rock	3
Oshima (Izu)	4.4	Oshima (Izu)	3.6	Suwanose	3
Ata.Kaimon	4.4	Fuji	3.6	Smith Rock	3
Oshima (Izu)	4.4	Kikai	3.6	Zao	3
Fuji	4.4	Yakeyama (Niigata)	3.6	Zao	3
Oshima (Izu)	4.4	Ata.Kaimon	3.6	Zao	3
Aso	4.4	Toya.Usu	3.5	Iozan (Shiretoko)	3
Aira.Sakurajima	4.3	Tokachi	3.5	Zao	3
Torishima (Izu)	4.3	Fuji	3.5	Unzen	3
Oshima (Izu)	4.3	Bandai	3.4	Zao	3
Niijina	4.3	Oshima (Izu)	3.4	Asama	3
Aira.Sakurajima	4.3	Chokai	3.4	Miyakejima	3
Zao	4.3	Miyakejima	3.4	Zao	3
Kozushima	4.3	Oshima (Izu)	3.4	Bandai	3

Oshima (Izu)	3	Tia Tia	2	Asama	1.2
Oshima (Izu)	3	Yakedake (Kamikochi)	2	Akan	1
Oshima (Izu)	3	Maruyama	2	Higashi Izu	1
Oshima (Izu)	3	Miyakejima	2	Akan	1
Oshima (Izu)	3	Kuju	2	Shirane (Kusatsu)	1
Oshima (Izu)	3	Shikotsu.Eniwa	2	Asama	1
Oshima (Izu)	2.9	Hachijojima	2	Chokai	1
Kirishima	2.8	Beppu.Garan	2	Iojima	1
Shirane (Nikko)	2.8	Miyakejima	2	Asama	1
Tateshina	2.8	Miyakejima	2	Moyorodake	1
Shirane (Kusatsu)	2.7	Hachijojima	2	Oshima (Izu)	1
Shirane (Kusatsu)	2.7	Hachijojima	2	Sashiusudake	1
Kirishima	2.7	Nasu	2	Asama	1
Miyakejima	2.7	Nasu	2	Asama	1
Fuji	2.7	Taisetsu	2	Kurikoma	1
Fuji	2.7	Miyakejima	2	Asama	1
Aso	2.6	Maruyama	2	Zao	1
Kirishima	2.6	Komagatake(Akita)	2	Asama	1
Kaitoku Seamount	2.5	Fuji	2	Asama	1
Komagatake (Akita)	2.5	Fuji	1.9	Asama	1
Kirishima	2.5	Yakeyama (Niigata)	1.8	Asama	1
Iwate	2.5	Shirane (Kusatsu)	1.8	Kirishima	1
Hachijojima	2.5	Tokachi	1.7	Nakanoshima	1
Hachijojima	2.5	Shirane (Kusatsu)	1.7	Asama	1
Miyakejima	2.5	Azuma	1.7	Asama	1
Shirane (Kusatsu)	2.4	Kuttara	1.7	Asama	1
Oshima (Izu)	2.4	Shikotsu.Tarumai	1.6	Kirishima	1
Yakeyama (Akita)	2.4	Asama	1.6	Kirishima	1
Hiuchi	2.4	Yakeyama (Etorofu)	1.5	Kirishima	1
Oshima (Izu)	2.4	Yakedake (Kamikochi)	1.5	Rausu (Kunashiri)	1
Fuji	2.4	Yakeyama (Akita)	1.5	Iwaki	1
Adatara	2.3	Zao	1.5	Chirippu	1
Fuji	2.3	Nasu	1.5	Tomari	1
Fuji	2.3	Esan	1.5	Atosanupuri (Etorofu)	1
Fuji	2.3	Kurikoma	1.5	Berutarube	1
Kikai	2.2	Ontake	1.3	Asama	1
Miyakejima	2.2	Asama	1.3	Naruko	1
Oshima (Izu)	2.2	Asama	1.3	Komagatake (Hokkaido)	0.5
Oshima (Izu)	2.1	Iozan (Shiretoko)	1.3	Kuju	0.4
Oshima (Izu)	2.1	Iozan (Shiretoko)	1.3		

出典 : (22)

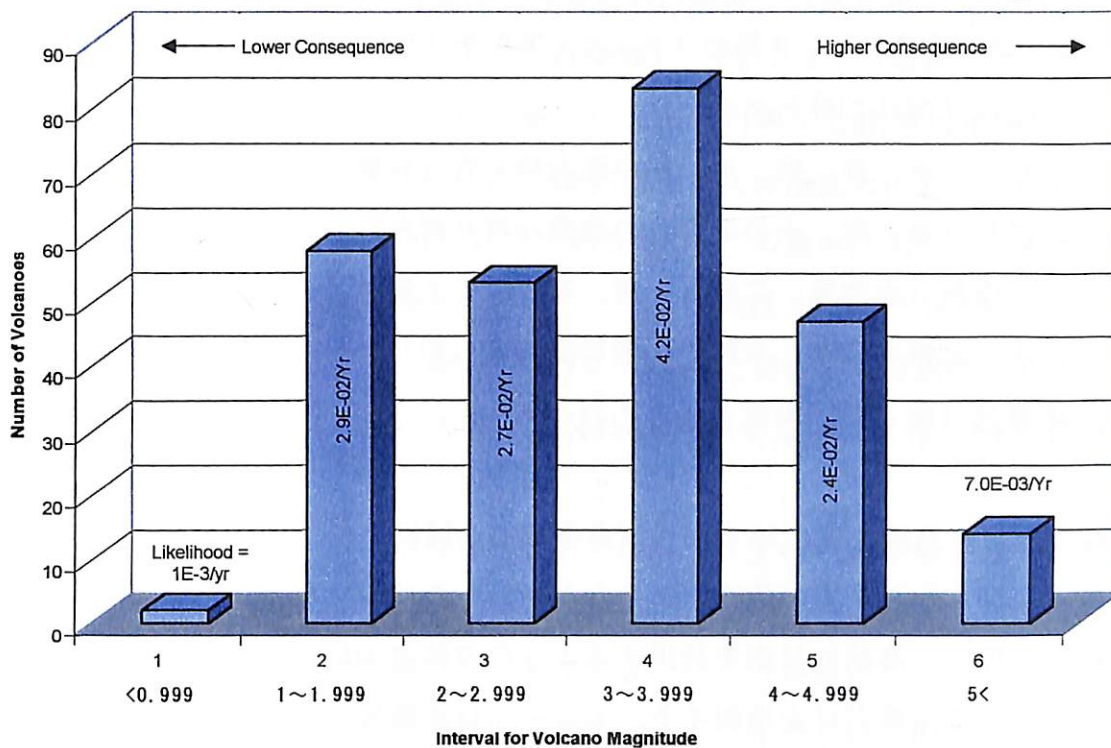


図 3-3 過去 2000 年間における日本の火山噴火の規模とその発生頻度  
出典：(22)

### 3.1 火山活動によるシナリオ

この分析の目的は、仮想的 HLW 地層処分場の中または近くで火山活動に起因する放射線学的並びに非放射線学的影響の可能性を評価することにある。従って真実性は度外視して、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。地層処分場の破壊をもたらす保守的なまたは限界的ケースを評価するために、一般的な火山の危険性を検討する。

火山の危険性は、火山の物理的特徴に基づいていくつかの種類に分類されている。最も普遍的な危険には下記が含まれる。

- ① 噴火の火柱 (広範囲に拡散するテフラ)  
(テフラは溶岩、固形岩屑、灰、ガスの混合物)
- ② 火山性爆風 (地下圧力の爆発的放出。テフラを伴う)  
(極端な場合はカルデラが生まれる)

- ③ 火砕流（高温の灰、岩屑、ガスが高速でなだれ落ちる。もくもくと成長する雲を意味するフランス語の「ニュエ・アルダント」（熱雲）も使用される）
- ④ 溶岩流（溶けた岩とマグマ）
- ⑤ ラハー（水、岩、砂、氷、泥の混合物を含む岩屑流）
- ⑥ 地滑り（岩、雪、氷の混合物の急激な滑り落ち）
- ⑦ ガス爆発（水蒸気、二酸化炭素、亜硫酸ガス等）
- ⑧ 洪水（氷雪の溶解、水路の決壊に関するもの）
- ⑨ 衝撃波（強力な圧縮波と過大圧力）

これら火山の危険性は、いずれも損害や死傷の原因となっているが、必ずしも個々の火山がこれら全ての危険性をはらんでいるわけではない。本調査研究の評価では、大気中へ直接放射能を放出するような方法で HLW 地層処分場を破壊する可能性のある危険だけを検討する。おそらくは衝撃波を除くいずれかの危険性の結果として放射能が放出される各種のシナリオを想定することができる。しかし、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

地下処分場で火山活動に起因する損傷が発生する可能性を評価するには、処分場が立地する特定の場所に関するデータが必要である。そういう処分場は実際にはないので、可能性に影響を与えるいくつかの要素に基づいて推定するしかない。

HLW 地層処分場のサイト選定では、当該地域の火山活動の可能性が慎重に検討される。火山活動が妥当に予見できる地域は、可能性評価でリスクが受容可能と判定されないかぎり、処分場候補地から除外される。従って火山活動シナリオの可能性は、火山地帯でないとされている地域に新しい火山が出現する場合に発生する。このような出現可能性を正確に把握するためには、処分場周辺地域のもっと詳細な地球物理学的評価を必要とする。本調査研究の評価では、事象の発生可



能性に関する諸要素の基本的理解を得るために単純な方法を用いる。

日本には約 80 の活火山があり（図 3-4(1)参照）、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  $3 \times 10^{-3}$ （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  $50 \text{ km}^2$ ）を日本の面積（約  $380,000 \text{ km}^2$ ）で割ったもの、即ち約  $1.3 \times 10^{-4}$  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（例えば図 3-4(2)に示されるように、火山前線から遠くにある火山ほど噴火記録のないものが多い）。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<sup>(31)</sup>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： $1/300 \text{ y}^{(3)}$ )

$\times (\text{日本の面積} : 38 \text{ 万 km}^2) / (\text{地球の面積} : 5 \times 10^8 \text{ km}^2) \approx 2.5 \times 10^{-6}$  と計算される。火山が直径 8 km 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  $3 \times 10^{-10}$ （百億年に三つ）、また、図 3-3 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  $4.7 \times 10^{-9}$  に満たないと推定される。

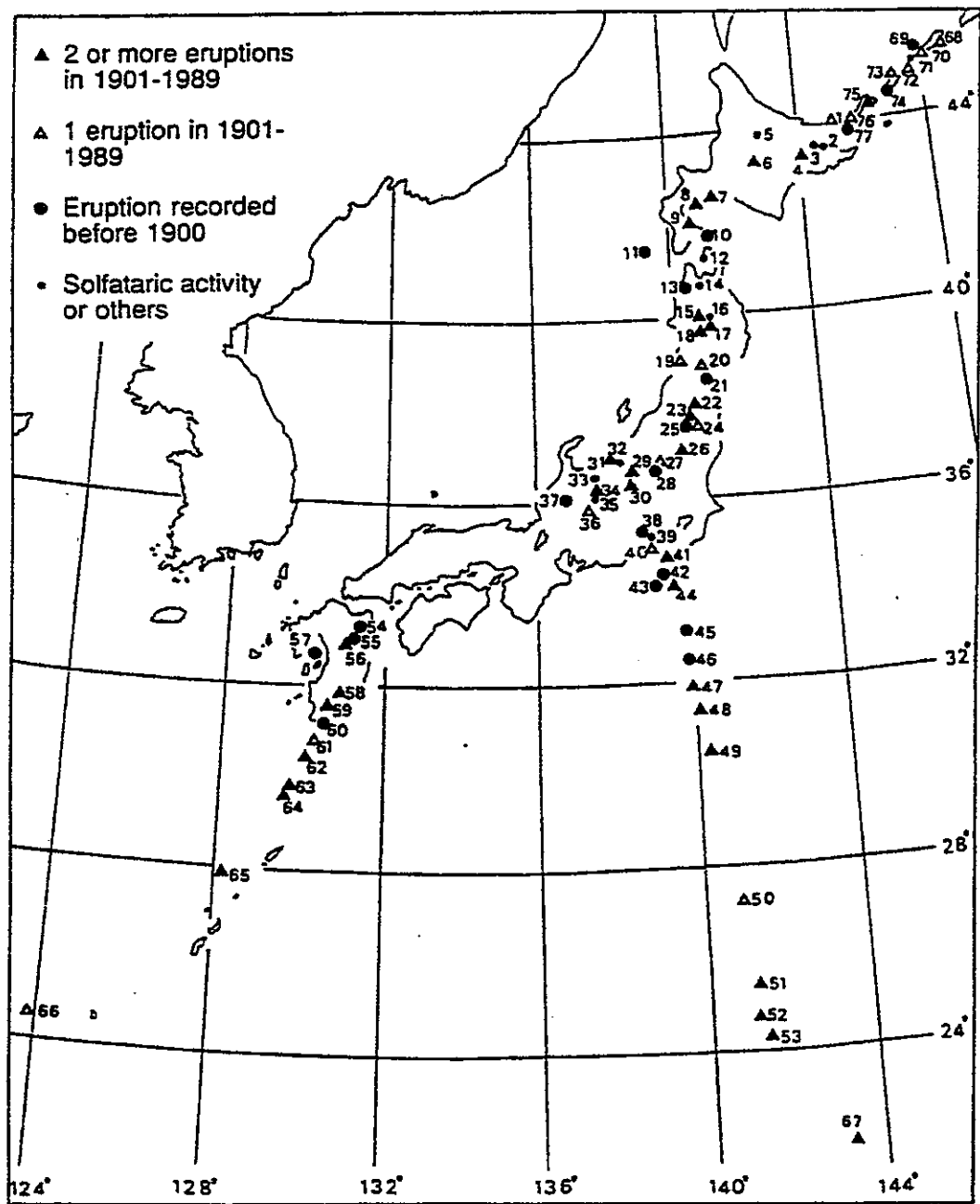


図 3-4(1) 日本の活火山 (Active volcanoes of Japan. Localities and numbers are after JMA (1984))

出典： (10)

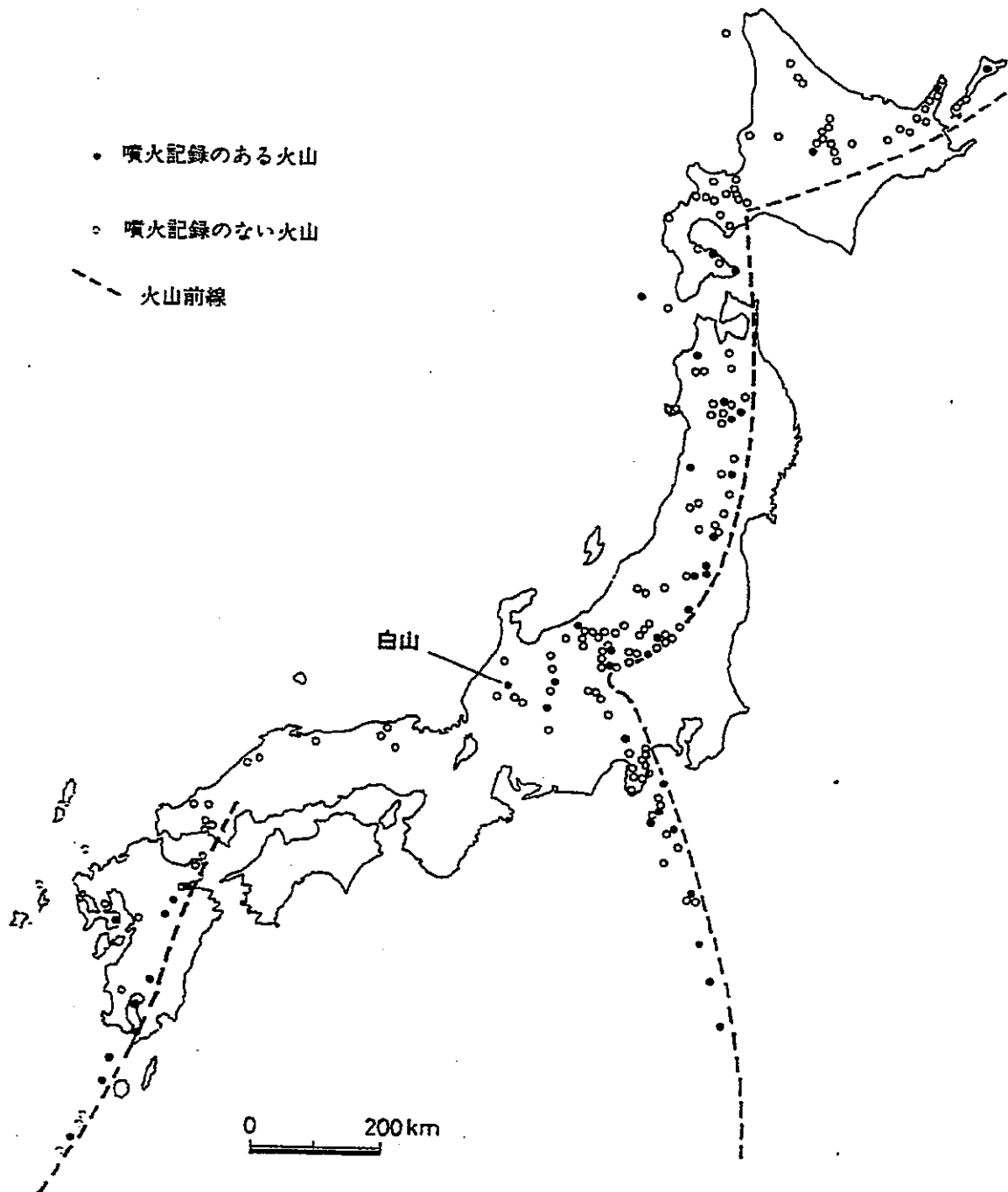


図 3-4(2) 日本列島の第四世紀火山の分布 (大森ほか、1988 をもとに作成、  
一部 改変) おおよそ 160 万年前以降に誕生した火山  
出典：(11)

### 3.3 放射性ソースターム

「ソースターム」は、危険にさらされる全ての物質（処分場の放射性核種のインベントリ）、インベントリのうちダメージを受ける割合、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部分の比率、を検討することによって求められる。第2章で述べたように、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、 $S$  = 処分場限界線から空気中へ放出されるソースターム

$\text{MAR}$  = 危険にさらされる物質

$\text{DR}$  = ダメージを受ける割合

$\text{ARF}$  = 空気中に放出される割合

$\text{LPF}$  = 漏出経路係数

放射性核種の吸入に起因する放射能被曝については、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の割合を考慮に入れた係数を含める。この式を当てはめる前に、以下に論ずるように可能性ある放出のメカニズムを評価する必要がある。

HLW 地層処分場を貫通する火山の噴火は下記の一または複数の原因となる。即ち、(1)マグマが埋設した廃棄物パッケージと接触する、(2)廃棄物パッケージが噴火口から排出される、(3)廃棄物パッケージが完全に分解されて、火山から広い範囲に散乱する。以下のパラグラフでは、これらのメカニズムのそれぞれについてもっと詳しく論ずる。

マグマが廃棄物パッケージと接触しても炭素鋼のオーバーパックが無傷であれば、放射性物質はほとんどまたは全く放出されない。融点は、炭素鋼オーバーパック（約 1350℃）とガラス固化体（約 1550℃）の方がマグマ（マグマは上部マントルで約 1100℃の温度で形成され、地表面では通常 1000℃以下になる）より高いからである。炭素鋼オーバーパックが長い年月の間に劣化して腐食し（例えば、埋設から 1000 年以上たって）もはや役に立たず、マグマが廃棄物パッケージと直接接触する場合、ガラス固化体は熱応力のために破碎されるが、それでも廃棄物の破片は溶解しないと予想される。一部の破片は激しい反応を起こすことなくマ

グマに飛沫同伴する可能性がある。上記のシナリオで想定したように火山が噴火すれば、これら破片は火山噴出物（テフラ、灰、火砕流、溶岩）の一部となり、噴出物が冷却し固化するにつれてこれら破片のほとんどが他の火山性物質と結合すると思われる。

次のメカニズムは廃棄物パッケージ全体が噴火口から排出される場合である。炭素鋼オーバーパックがまだ健全な状態なら、放射性物質の散乱はほとんどまたは全く起こらない。廃棄物パッケージは質量が大きいので、噴火口の縁の上または近くに落下し、かなり腐食性環境下で他の噴出物に覆われ、このため炭素鋼オーバーパックの劣化率が加速する。炭素鋼オーバーパックがもはや役に立たない時に火山活動が起こると、ガラス固化体が破片となって、上述のようにこれら破片が固化した火山噴出物（テフラ、灰、火砕流、溶岩）の一部となる可能性がある。

最後のメカニズムは廃棄物パッケージが完全に分解されて、火山から広い範囲に散乱するという想定である。このシナリオは、廃棄物パッケージの炭素鋼オーバーパックが長い年月の間の劣化と腐食のために役に立たない場合にのみ発生する。強力な火山性爆風はガラス固化体の一部を粉々にする可能性がある。その後、粉々になった廃棄物は固化した火山噴出物（テフラ、灰、火砕流、溶岩）の一部となる可能性がある。

### 3.4 処分場に対する火山の影響の大きさ

#### 3.4.1 タンボラ級（VEI=6~7）噴火ケース<sup>(3)</sup>

火山の噴火で損傷を受ける廃棄物パッケージの数は、処分場に埋設する廃棄物パッケージの合計数、処分場の形状、および処分場に対する火山の位置と特徴に左右される。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）。放射線学的影響はダメージを受ける廃棄物パッケージの数に正比例するので、ダメージを受ける廃棄物パッケージの数が多いか少ないかによる影響は容易に求めることができる。

造山性マグマ（水分とシリカの含有率が高い）の貫入を伴う大規模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、噴火の火柱および火砕流と関係してくる。爆風と火砕流はガラス固化体の放射能を帯びたガラスの破片を含み、これら破片は火山が生成する岩屑地帯の一部となる。爆風による放射線学的影響は、噴気孔の周辺 3 km 以内に膨大な量の物質を堆積させる爆風そのものの影響に比べれば比較的小さいと想定される。同様に、火砕流或いは火砕波は高温と火によってその通り道沿い（噴気孔から 10 km 以上）の全ての生物を破滅させる。人間は火山の周辺から避難しているであろうから、岩屑地帯に含まれる放射性物質は、人間の活動或いは環境に与える直接的影響はほとんどまたは全くないであろう。その後の噴火と溶岩流は、それが新しい放射性物質または以前に排出した放射性物質を再び地表へ押し出さなければ、当初の放射性堆積物を覆って封じ込めることになる。従って、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<sup>(3)</sup>。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。

処分場の形状にも、処分場が受ける損害の種類にも不確実性があるため、空气中放出係数と吸入される部分に当てはまる数値にも非常に大きな不確実性がある。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。放射性物質のほとんどは比重が重いため、火山のすぐ近くに重い粒子の噴出物として落下する。放射性物質のごく一部が直径 10 ミクロン未満の微粒子（吸入可能な粒子）として存在すると予想される。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<sup>(12)</sup>より 10 倍も大きい。放射能被曝は吸入可能な空中浮遊物質の放出係数に正比例するので、別の浮遊物質放出係数を想定した場合の影響への感度は明白となろう。それぞれの放射性核種のパフ・ソースタームを表 3-2 の「空中浮遊物吸入可能グラム」の欄に示す。

表 3-2 アイソトープの世界均一容積密度

アイソトープ	キャニスター 当たりグラム	個 数	合計グラム	空中浮遊物 吸入可能グラム	容積密度* (g/m <sup>3</sup> )
Se-79	7.99E+00	1000	7.99E+03	7.99E+01	1.56E-17
Zr-93	1.00E+03	1000	1.00E+06	1.00E+04	1.96E-15
Tc-99	1.06E+03	1000	1.06E+06	1.06E+04	2.07E-15
Pd-107	2.75E+02	1000	2.75E+05	2.75E+03	5.38E-16
Sn-126	3.58E+01	1000	3.58E+04	3.58E+02	7.00E-17
Cs-135	4.96E+02	1000	4.96E+05	4.96E+03	9.70E-16
Th-230	5.44E-03	1000	5.44E+00	5.44E-02	1.06E-20
Th-232	1.25E-03	1000	1.25E+00	1.25E-02	2.44E-21
U-233	2.46E-01	1000	2.46E+02	2.46E+00	4.81E-19
U-234	2.35E+00	1000	2.35E+03	2.35E+01	4.60E-18
U-235	2.08E+01	1000	2.08E+04	2.08E+02	4.07E-17
U-236	1.29E+01	1000	1.29E+04	1.29E+02	2.52E-17
U-238	1.94E+03	1000	1.94E+06	1.94E+04	3.79E-15
Np-237	8.36E+02	1000	8.36E+05	8.36E+03	1.63E-15
Pu-239	5.34E+01	1000	5.34E+04	5.34E+02	1.04E-16
Pu-240	3.76E+01	1000	3.76E+04	3.76E+02	7.35E-17
Am-241	5.54E+01	1000	5.54E+04	5.54E+02	1.08E-16
Am-243	8.71E+01	1000	8.71E+04	8.71E+02	1.70E-16

\* 対流圏の体積 (=  $5.101 \times 10^8 \text{ km}^2 \times 10 \text{ km} = 5.1 \times 10^{18} \text{ m}^3$ )

出典：(5)をもとに算出。

以上の想定のもとに、地層処分場に埋設した廃棄物パッケージからの放射性同位元素の空気中への放出に関する影響は以下の通りである。

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(表3-2の「容積密度」の欄を参照のこと)。

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。対流圏(地表から上空10kmまで)では、北半球から南半球への粒子の拡散は

熱帯内収束帯で自然に発生する上昇気流によって抑えられるが、火山の噴火によって放射性粉塵の一部が運ばれる成層圏にはそういう障壁はない。成層圏から対流圏への微粒子の対流圏への微粒子の降下は、粒子の大きさや、放射性／非放射性構成物質の化学反応と凝集などその他の要素の影響を受ける。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。この限界的計算から、放射性物質の局地的降下が大気圏への物質の移動を少なくするケースの影響を判定することができる。

表 3-2 に示す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<sup>(6)</sup>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）。

### 3.4.2 中規模（VEI=3~5）噴火ケース

#### (1) 事例調査に基づく評価対象とすべき事象

3.4.1 項で述べたような巨大火砕噴火（たとえば VEI=6 かそれ以上）は、活動頻度あるいは噴火確率が低くても、大型の噴火が歴史上あるいは地質学的事実として存在している以上、それを考慮する必要がある。例えば、確率と災害の大きさとの積などの評価によって、小規模で確率の高い噴火から大規模で確率の低い噴火まで、合理的で一貫した扱いがなされることが望ましいと考えられている<sup>(10)</sup>。

そこで、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。

表 3-1 に示すように、日本では 1707 年の富士山噴火（VEI=5）以来、これ以上大きな規模の噴火は生じていない。しかし、一般に噴火規模が小さくなると、そ



のような噴火事象の発生頻度は大きくなると考えられる（図 3-5 のベズビオス火山等の例では、VEI=6~7 から 3~5 になると発生頻度は約 1~2 桁増加している。このことは、図 3-3 に示す日本のケースでもおよそあてはまる。）

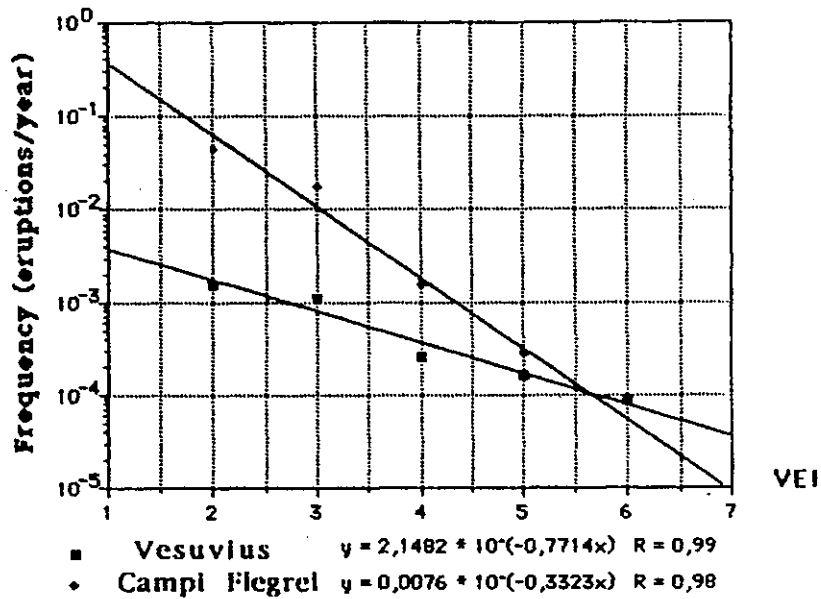


図 3-5 噴火事象の規模とその発生頻度との関係  
出典：(13)

火山噴火災害は地震災害に匹敵する大きな災害を引き起こすことが予想されるにも関わらず、火山噴火によってどのくらいの人的被害や物的被害が出て、経済的損失がどの程度になるかなどの火山噴火に伴う被害想定の研究はほとんどなされていない<sup>(14)</sup>。

大規模な降下火砕物を生成する噴火はプリニー式噴火と呼ばれ、巨大な噴煙柱が火口の上に生じる。火口から 2~3000m 上空までは、火口から噴出するガスの力によって火砕物も押し上げられるが、それ以上は高温の火山灰によって加熱された大気の浮力による上昇力によって成層圏まで押し上げられる<sup>(14)</sup>。

火砕流の流走モデルはあまりよく理解されていないが、過去に発生した火砕流の例についての個別的な記載が詳しくなされ、堆積物の構造、粒度などから流動モデルが提出されている（付録 B 参照）。

直接的に死傷するケースが少ないと言われている降下火砕物（降下火山灰や噴出岩塊）に対し、火砕流の流下域では、特別な場合を除いて、人間は死亡するが、死亡の原因は火砕流そのものの衝撃による場合、火砕流の熱による場合、火砕流や火砕サージの中の有毒ガスによる場合などがある。火砕流の流下速度は 10m/s から 100m/s にも及ぶため、火砕流の危険区域にあつては避難の早さと避難方向の正しさが生死を分けると言っても過言ではない<sup>(14)</sup>。表 3-3(1)に火砕流による死者数を示す。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。（表 3-3(2)及び図 3-6 参照）

表 3-3(1) 火砕流による死者数 (Blong, 1984 に加筆)

火山名, 噴火年	火砕流による死者数	総死者数	出典
ベスビオ, AD 79	670	3,360	VRF
ストロンボリ, 1930	4	4	Rittman, 1962:38
ラミントン, 1951	2,942	2,942	Taylor, 1958:48-49
パパンダヤン, 1772	2,957	2,957	CIRV, 1979:793
ガルングン, 1882	~ 400	4,011	Anon., 1832:415
アグン, 1963	820	1,148	Surjo, 1965:26;VRF
ヒボックヒボック, 1950 1951	68 500	68 500	Time, Dec.17, 1951:36 Macdonald & Alcaraz, 1956:173
マヨン, 1853 1897	34 350	34 350	VRF Sapper, 1917, 153
タール, 1911 1965	1,335 150	1,335 150	Sapper, 1917, 152 Tolentino, 1973
口永良部島, 1933	26	26	CAVW, 11:16
雲仙岳, 1792	10,000	14,300	CAVW, 11:43
浅間山, 1783	820	1,377	VRF
磐梯山, 1883	461	461	Sekiya & Kikuchi, 1889
十勝岳, 1926	144	144	Tanakadate, 1927:786
キラウエア, 1790	80	80	Stearns, 1925:11-12; Sapper, 1917:101
エルチチョン, 1982	34	188	VRF
サンタマリア, 1929	23	23	CAVW, 6:44
アレナル, 1968	78	78	Bull. Volc., 8, Supp.
ドナジュアナ, 1899	55	55	Bull. Volc., 8, Supp.
プレー, 1902, May8 August30	28,000 1,000	28,000 1,000	CAVW, 20:35-36 CAVW, 20:35-36
スフリエール, 1902	1,680	1,680	HMSO, 1903:10-11
セントヘレンズ, 1980	~ 50	57	Eisele et al., 1981
雲仙岳, 1991~	44	44	島原市, 1994

出典：(14)

表 3-3(2) 過去数世紀における各火山現象での死亡者数とその比率

現象	死亡者数	比率 (%)
溶岩流	85	0.11
航空機墜落	3019	3.98
火砕流及び火砕サージ	36787	48.55
火山泥流	28438	37.53
地震活動	32	0.04
津波	407	0.54
ガス及び酸性雨	1710	2.26
伝染病	3163	4.17
原因不明	2133	2.82
計	75774	100

出典：(13)

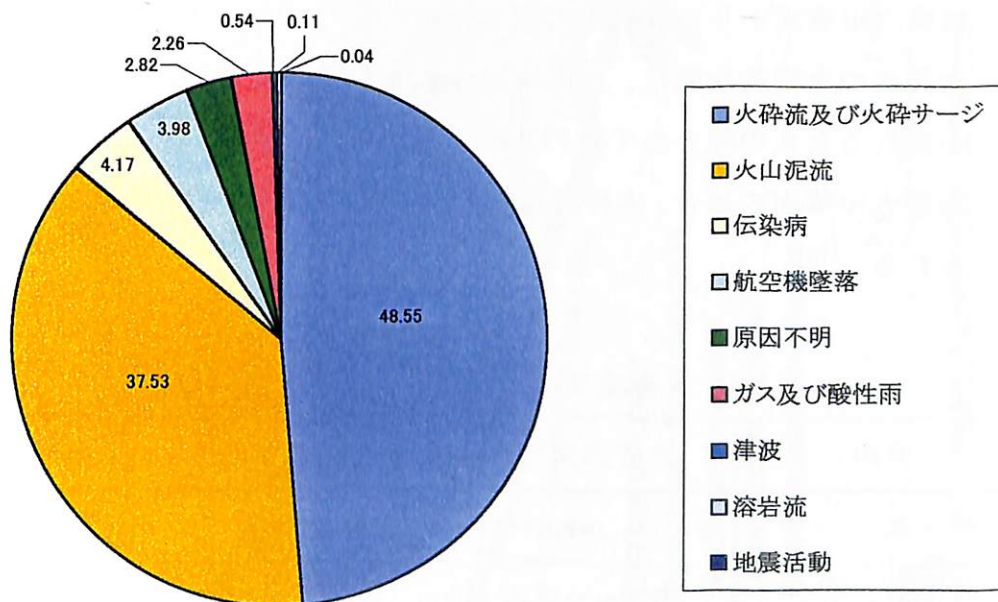


図 3-6 過去数世紀における各火山現象での死亡者数の割合

出典：(13)

## (2) 解析ケースの設定

以上のように、火砕流による死亡は、火山噴火による非放射線学的影響を評価する上で重要と考えられる。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 3-3 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 (例えば付録 B に示す文献<sup>(14)</sup>) は参考とする。)

表 3-4 及び 50km 以上まで到達し得るとする他の報告<sup>(25)</sup>に基づく、火砕流の典型的な到達距離は、およそ 2km~50km である。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<sup>(27)</sup>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 (図 3-9 参照)、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。

表 3-4 火砕流又は火砕サージの到達範囲

火山	火砕流又は火砕サージの到達範囲	出典
ピナツボ	4km~16km (火砕流)	(23)
セントヘレンス	数 km~ほぼ 20km (火砕サージ) (図 3-7 参照)	(24)(25)
雲仙	5.5km (火砕流) 1991 年~1994 年の間に、約 1 万回の 火砕流が発生 (図 3-8 参照)	(26)(27)
モントペレー	10km 程度	(28)

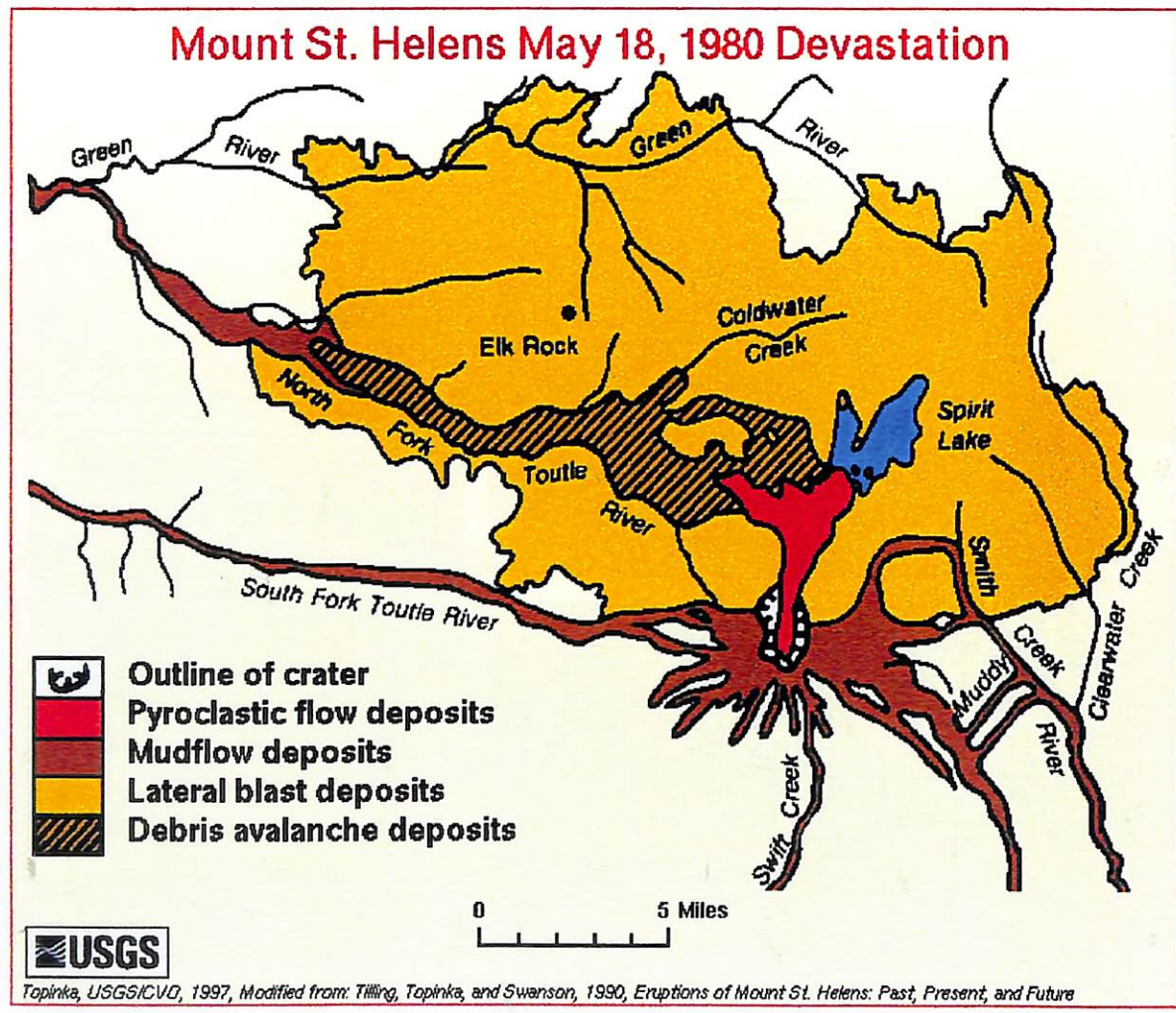


図 3-7(1) セントヘレンス火山周辺の惨害状況

出典：(25)





図 3-7(2) セントヘレンス火山の火砕流

出典：(25)からの引用文献：

<http://vulcan.wr.usgs.gov/Photo/PyroFlows/images.html>



図 3-8 雲仙火山の小規模火砕流  
出典：(26)





図 3-9 雲仙火山周辺の航空写真  
出典：(27)



④ 融雪による洪水（火山泥流）の潜在的影響も表 3-3(2)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/km<sup>2</sup> (32) 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（表 3-5 参照）。

表 3-5 RSAC 50 マイル径方向線量計算用の人口

RSAC-5 径方向間隔 (mi)	RSAC-5 径方向間隔 (km)	径間隔面積 (km <sup>2</sup> )	各セクター の面積 (km <sup>2</sup> )	各セクター の人口 (人)
0-10	0-16	814	51	16,626
10-20	16-32	3,255	153	49,878
20-30	32-48	7,323	254	82,804
30-40	48-64	13,019	356	116,056
40-50	64-80	20,342	458	149,308

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 ( $=3.14 \times (10\text{km})^2 \times 60^\circ / 360^\circ \times 326 \text{ 人/km}^2$ ) 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。

- 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。マグマ又は火砕流の温度は、オーバーパック又はガラスの融点以下であるため、又、ガラス固化体の寿命を考慮すると、本解析では、オーバーパックは、腐食により取り去られているが、ガラスは熔融しないものと想定される。従って、放射性物質の分散は、力学的に破碎したガラス固化体からのみ生ずると考えられる。

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（空气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<sup>(5)</sup>とし、火山噴火に対するDRは、3.4.1項同様（表3-2参照） $1000/40000=0.025$ 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、 $0.1\text{km}^3$ 以上の物質を放出する<sup>(24)</sup>。中規模の火山では、 $0.1\text{km}^3$ 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、 $5.4\text{km}^2$ 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<sup>(21)</sup>。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。

処分場形状や処分場ダメージの種類の不確実性のため、ARF と RF に適当な値を設定する上でも非常に大きな不確実性が存在する。ARF は、火山が処分場並びに埋設廃棄物パッケージ寿命にどのような影響を与えるかに依存する。大部分の放射性物質は重いため、重い粒子状の噴出物として火山のすぐ近くに降下する。非常にわずかの放射性物質だけが、直径 10 ミクロン以下の（吸入可能な）粒子として依存すると考えられる。また、本解析では、火山性爆風と噴火の火柱に対する  $ARF \times RF$  は、3.4.1 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、 $RF=0.7^{(21)}$  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<sup>(21)</sup>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  $2 \times 10^{-11}$  [ $\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}^2)$ ]

P : 標本密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

v : 速度 [ $\text{cm}/\text{s}$ ]

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。

火砕流の速度は、物質の粘性や流下勾配に依存するが、最大 450mi/h（又は 725km/h）と成り得る<sup>(25)</sup>。中規模火山噴火からの火砕流の典型的な速度は、100mi/h 又は 160km/h である<sup>(28)</sup>。

今、速度を 160km/h（=4444cm/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 3-6(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 3-6(2)のようになる。ここで、

$$\begin{aligned} \text{ソースターム (噴火の火柱)} &= \text{MAR} \times \text{DR} \times [\text{ARF} \times \text{RF}(\text{噴火の火柱})] \\ &\quad + \text{MAR} \times \text{DR}(\text{粉塵}) \times [\text{ARF} \times \text{RF}(\text{粉塵})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ソースターム (火砕流)} &= \text{MAR} \times \text{DR} \times [\text{ARF} \times \text{RF}(\text{火砕流})] \\ &\quad + \text{MAR} \times \text{DR}(\text{粉塵}) \times [\text{ARF} \times \text{RF}(\text{粉塵})] \end{aligned}$$

で計算される。これらのソースターム（グラム数）に比放射能を乗じて、それぞれの放射能（キュリー数）を求める（表 3-6(2)参照）。キュリー数で表されたソースタームは、大気拡散と摂取体に対する線量計算を行うために、RSAC-5 コードへ入力される。

表 3-6(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 3-6(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 湿った沈殿による放射能流の減衰効果は考慮していないが、乾燥した沈殿による放射能雲の減衰効果は含まれる。穀物が汚染土壌で成長するのにかかる年数を摂取年間中の線量を算出するために1年と設定した点と、穀物が成長する季節の間、汚染を被る期間として8時間の放出時間を計算するために0.33日と設定した点とを除くと、他はRSAC-5コードのデフォルト値を用いている。

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<sup>(29)</sup>）。放出高度が増加するとともに、線量への影響は、全ての摂取体、特に、放出地点により近い摂取体に対して、低減される。従って、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の放出モデルには、ジェット放射能流上昇成分も含まれている。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<sup>(15)</sup>。

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 (22.5° の扇形) 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。

### (3) 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。

(2)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 3-10(1) (火砕流) と図 3-10(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 3-7 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  $5 \times 10^{-2}$  死/Sv<sup>(18)</sup>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は、ガラス固化体から生じた放射性的のガラス破片が含まれており、これらの破片は、噴火で形成される破片くず山の一部となろう。しかし、火山性爆風の放射線学的影響は、爆風自体の影響に比べて小さい。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、(2)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、文献(3)でも用いているが、日本並びに他国での公称死者数に基づき、爆風により 1000 人が死亡するものとする。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<sup>(33)</sup>。

(2)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  $60^\circ$  の扇状内の 107,000 人が死亡することとなろう。

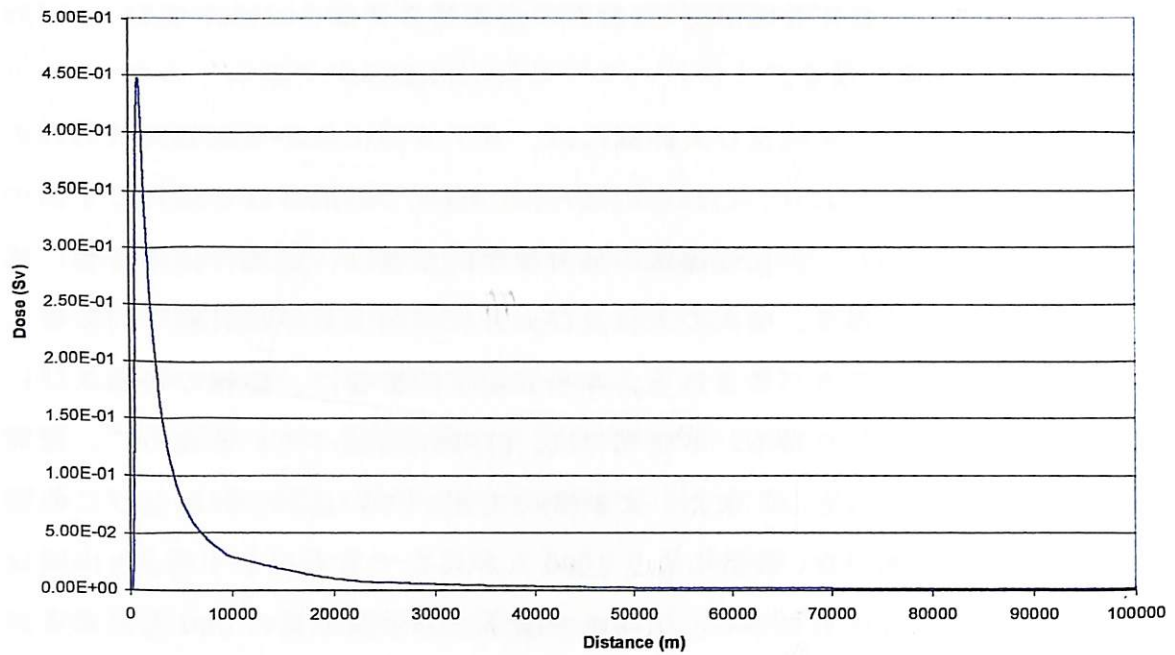


図 3-10(1) 火砕流放出による風下方向への距離での 50 年間預託放射線線量

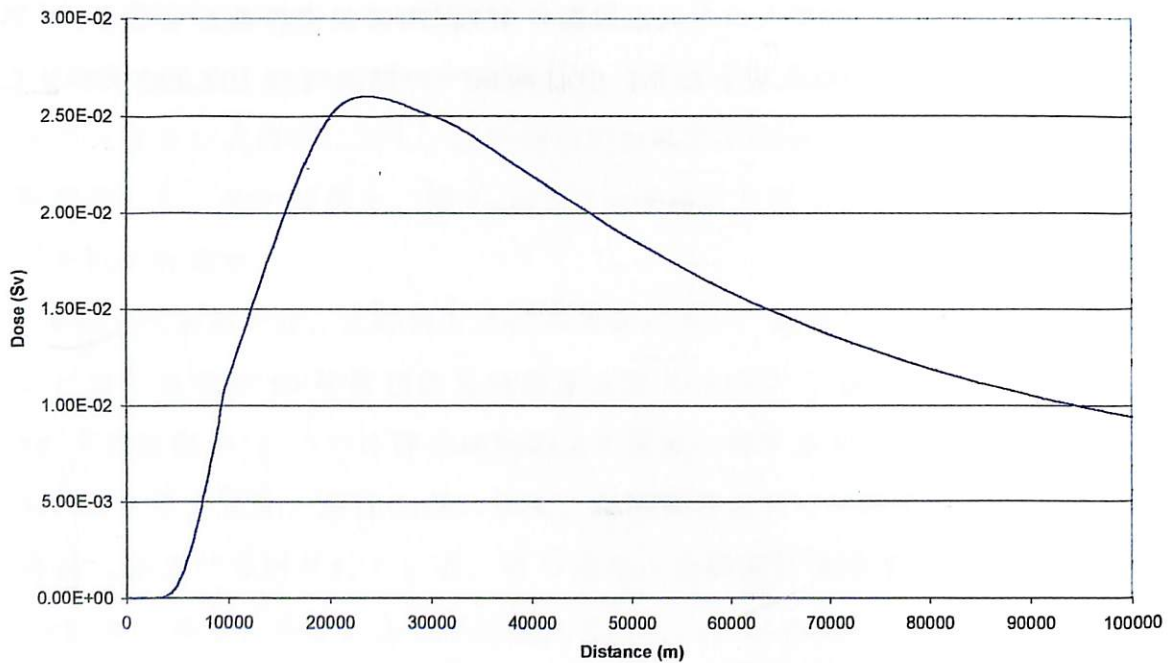


図 3-10(2) 火柱放出による風下方向への距離での 50 年間預託放射線線量



表 3-7 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

もし1つの事故が想定され、評価結果として、その事故による影響がないということがわかれば、リスクはゼロということになる。同様に、もし、想定事故の発生可能性がゼロと評価されれば、リスクはゼロである。本研究で検討された中規模火山噴火ケースでは、平成8年度に検討した大規模火山噴火ケース<sup>(3)</sup>に比べ、発生可能性と影響のいずれもが大きいと考えられる。結果として、中規模火山噴火ケースのリスクは、大規模火山噴火ケースのリスクよりも大きくなる。

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。火山灰の吸入による晩発性の死者がこれに追加し得るが、即死の死者数に比べて少ないと考えられるため、本解析では含めなかった。非放射線学的影響による個人の死亡確率は、 $4.42 \times 10^{-2}$  ( $=18,300/414,298$ ) 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、 $8.6 \times 10^{-5}$  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、 $1.45 \times 10^{-3}$  ( $=600/414,298$ ) 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、 $2.82 \times 10^{-6}$  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 ( $4.42 \times 10^{-2}$ ) 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  $2.08 \times 10^{-5}$  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  $6.82 \times 10^{-7} (=4.7 \times 10^{-9} \times 1.45 \times 10^{-3} \times 100,000)$  となる。

#### 4.2 他の原因による事故死率との比較

先進国における事故死の比率は年度によっても国によっても変動する。例えば 1993 年に報告された死亡率は、英国の 10 万人につき約 23 人から、フィンランドの 10 万人につき 55 人までの範囲にある<sup>(16)</sup>。同じ年に日本で報告された事故死の比率は 10 万人につき 27 人と比較的少なく、米国の場合は 10 万人につき約 38 人であった。

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と、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  $1.3 \times 10^6$  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。これらは日本全体の死亡者の約 7 割を占めている。このようなよく知られている死亡原因の統計的死亡率と本研究で検討した中規模火山噴火による死亡リスクとを比較することによって相対的リスクの大きさの見通しがよくなる。

中規模火山噴火による 10 万人当りの期待死亡者数は、 $2.08 \times 10^{-5}/y$  であり、火山が処分場の真下で噴火したとしても、 $6.82 \times 10^{-7}/y$  という非常にわずかの死亡者増しかもたらさない。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。

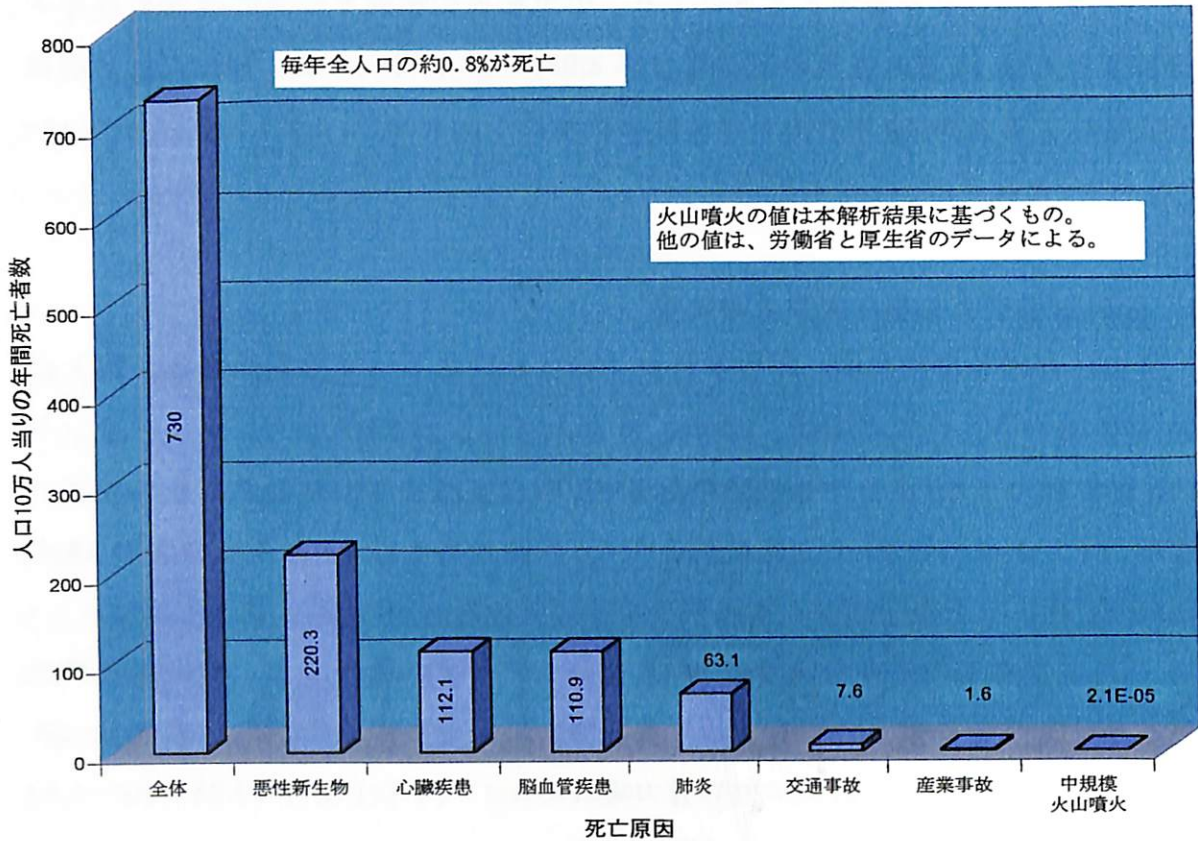


図 4-1 仮想的処分場真下の中規模火山噴火による死亡リスクと  
1997年の日本の他の死亡原因との比較

出典：(34)

注) 前年度算出した平常時処分場及び自然放射能<sup>(17)</sup>による人口10万人当りの年間死亡者数はそれぞれ0.02, 15である<sup>(4)</sup>。

#### 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

平成8,9年度の分析結果<sup>(3)(4)</sup>及び第3章で紹介したHLW地層処分場に対する火山活動の影響に関する分析結果に基づき、日本におけるほとんど起こり得ない事象又は長期的環境プロセスの各シナリオによる死亡率を表4-1のように設定・算出し、放射線学的年平均死亡リスクを表4-2にまとめた。

また、表4-3(及び図4-2)において、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。表の最後の欄は、日本人が、本調査研究で検討したほとんど起こり得ない事象又は長期的環境プロセスで死亡する率よりも「普通の」事故で死亡する率がかなり多いことを示している。

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

表 4-1(1) リスク算定根拠の概要 — ほとんど起こり得ない事象 —

事象		A.発生頻度 [y]	B.影響を受け る人口[人]	C.非放射線 学的死者 数[人]	D.放射線学 的死者数 [人]
活断層*1		1.E-06	1.0E+06	1.00E+03	3.6E+01
火山噴火	大規模ケース*1	3.E-10	5.9E+09	8.10E+04	3.5E+03
	中規模ケース*4	4.7E-9	4.1E+05	1.83E+04	6.0E+02
天体衝突*1		3.E-13	5.9E+09	1.48E+09	1.8E+06
人間侵入 —杭柱掘削活動		5.E-11	1.4E+04	4.50E-05*2	1.1E+03
人間侵入 —採鉱		5.E-11	4.1E+05	5.00E-01*3	4.2E+01

\*1 平成8年度報告書<sup>(3)</sup>参照。

\*2 International Association of Drilling Contractors(IADC)より、1997年での死亡率は、60,428,515マン・アワー当たり4人である。1人当たり年間マンアワーは2080、また、作業者は1000m掘削するのに6人で20日かかると想定すると、非放射線学的死亡者数は、 $(6 \times 20 / 365) \times \{4 / (60428515 / 2080)\}$ で求められる。

\*3 NSCのAccident Factsより、死亡率は10万マン・y当たり25人である。また、Kennecottより、採鉱作業量は2000マン・yなので、非放射線学的死亡数は、 $2000 \times (25 / 10^5)$ で求められる。

\*4 本解析より。

表 4-1(2) リスク算定根拠の概要 —長期的環境プロセス—

環境プロセス	A. 処分場への影響確率 [/処分場寿命年]	B. 影響を受ける人口[人]	C. 非放射線学的死者数[人]	D. 放射線学的死者数[人]
隆起・侵食 —食物採取	8.0E-05	1.4E+06	N/A <sup>(a)</sup>	3.9E+03
隆起・侵食 —吸入	8.0E-05	4.1E+05	N/A <sup>(a)</sup>	1.0E-01
隆起・侵食 —外部被曝	8.0E-05	1.8E+03	N/A <sup>(a)</sup>	7.5E-19
気候変動 —海水準低下	5.0E-11 <sup>*3</sup>	1.4E+04	N/A <sup>(b)</sup>	死者は発生し得ない
気候変動 —海水準上昇	1.5E-09 <sup>*3</sup>	1.4E+04	N/A <sup>(b)</sup>	5.6E-01 <sup>*4</sup>
気候変動— 浸水量増加 <sup>*1</sup>	1.0E-09 <sup>*3</sup>	1.4E+06	N/A <sup>(b)</sup>	3.5E-02 <sup>*5</sup>
気候変動— 浸水量減少 <sup>*2</sup>	2.5E-10 <sup>*3</sup>	1.4E+02	N/A <sup>(b)</sup>	3.5E-02 <sup>*5</sup>

\*1 井戸からの給水人口が  $10^2$  倍に増加。

\*2 井戸からの給水人口が  $10^{-2}$  倍に減少。

\*3 前年度報告書<sup>(4)</sup>第5章で述べたプロセス発生確率 × 飲料水用井戸掘削確率  
(前年度報告書<sup>(4)</sup>第3章(又は付録 A.3.1)で求めた  $5.0 \times 10^{-9}$ ) より。

\*4  $8 \times 10^{-3}$  mSv/y より。

\*5  $5 \times 10^{-6}$  mSv/y (浸水量増加)、 $5 \times 10^{-2}$  mSv/y (浸水量減少) より。

以上、前年度報告書<sup>(4)</sup>第4章、第5章での検討内容参照。

- (a) 隆起・侵食は、緩慢に進展する環境プロセスである。活断層や火山活動による隆起・侵食事象に起因した非放射線学的の死亡者が発生し得るが、活断層や火山活動による非放射線学的の死者数は表 4-1(1)に記載されている。
- (b) 気候変動は、気象の変化と異なり、緩慢に変化し得るプロセスである。暴風雨等の悪天候によって死者は発生し得るが、人間には適応能力があるため、平均気温や降水量の変化をもたらす気候変動への対策をとることができるだろう。

表 4-2 HLW 処分場による放射線学的集団リスク増

事象又はプロセス		平均リスク(死/年)
隆起・侵食－食物摂取 <sup>*1,*2</sup>		2.E-02
平常状態の処分場からの影響 <sup>*0</sup>		3.E-03
活断層 <sup>*0</sup>		4.E-05
気候変動－海水準上昇 <sup>*1,*3</sup>		3.E-06
火山噴火 <sup>*0</sup>	大規模ケース	1.E-06
	中規模ケース	3.E-06
天体衝突 <sup>*0</sup>		5.E-07
隆起・侵食－吸入 <sup>*1,*2</sup>		5.E-07
気候変動－浸水量増加 <sup>*1,*4</sup>		2.E-07
気候変動－浸水量減少 <sup>*1,*4</sup>		2.E-07
人間侵入－杭柱掘削活動 <sup>*0</sup>		5.E-08
人間侵入－採鉱 <sup>*0</sup>		2.E-09
隆起・侵食－外部被曝 <sup>*1,*2</sup>		4.E-24
気候変動－海水準低下 <sup>*1,*5</sup>		0.E+00

\*0 平常状態の処分場では、14000人 × 0.004mSv/y より。

活断層、火山噴火、天体衝突、人間侵入は、表 4-1(1)の A×D より。

\*1 影響の最大値を 20 万年間に亘って平均化する (表 4-1(2)の D/2×10<sup>5</sup>) 。

\*2 隆起・侵食の進展による処分場露出までに 200 万年を要する。

\*3 立地の検討を行えば海水が処分場に浸入することは考えられない。次の 1000 万年間で線量が 5%低下する。

\*4 これらの現象 (の進展) には長期間 (>1000 年) を要し、人口の増減に関わらず同じ影響をもたらす傾向にある。

\*5 この現象はむしろ影響及びリスクを低減する。

表 4-3 日本におけるほとんど起こり得ない事象、長期的環境  
プロセス及び他の事故による期待死亡率

事象又はプロセス	非放射線学的影響による10万人当りの期待死亡率 <sup>*2</sup>	放射線学的影響による10万人当りの期待死亡率 <sup>*3</sup>	日本で事故により死亡する可能性の最も高い回数 <sup>*4</sup>
隆起・侵食－食物摂取	N/A	2.2E-04	1.2E+05
活断層	1.0E-04	3.6E-06	2.6E+05
火山噴火－中規模ケース	2.1E-05	6.8E-07	1.3E+06
隆起・侵食－吸入	N/A	1.9E-06	1.4E+07
人間侵入－杭柱掘削活動 <sup>*1</sup>	6.9E-10	3.8E-07	7.1E+07
天体衝突	7.5E-09	8.9E-12	3.6E+09
人間侵入－採鉱	1.3E-09	5.1E-10	1.5E+10
火山噴火－大規模ケース	4.1E-10	1.8E-11	6.3E+10
気候変動－浸水量減少 <sup>*1</sup>	N/A	6.3E-11	4.3E+11
気候変動－海水準上昇 <sup>*1</sup>	N/A	6.0E-11	4.5E+11
気候変動－浸水量増加	N/A	2.5E-14	1.1E+15
隆起・侵食－外部被曝 <sup>*1</sup>	N/A	3.4E-23	7.9E+23
気候変動－海水準低下 <sup>*1</sup>	N/A	死者は発生し得ない	死者は発生し得ない
その他事故	27	ほぼ0	－

\*1 影響を受ける人口は10万人以下。死亡リスクは比較のため10万人当りに合わせている。

\*2 表 4-1 の A～D に対し、

$$(A \times C') \times 10^5 (\equiv E)$$

ここで、

$$C' = \begin{cases} C/B & \dots\dots\dots \text{活断層、火山噴火、天体衝突} \\ 4/(60428515/2080) \dots\dots & \text{人間侵入－杭柱掘削活動} \\ 25/10^5 & \dots\dots\dots \text{人間侵入－採鉱} \end{cases}$$

\*3 表 4-1 の A～D に対し、

$$(A \times D') \times 10^5 (\equiv F)$$

ここで、

$$D' = \begin{cases} D/B & \dots\dots\dots \text{下記以外} \\ (D/B)/10^2 & \dots\dots\dots \text{隆起・侵食（除・吸入）、気候変動} \end{cases}$$

\*4 上記 E,F より、 $27/(E+F)$

N/A 定量化せず。



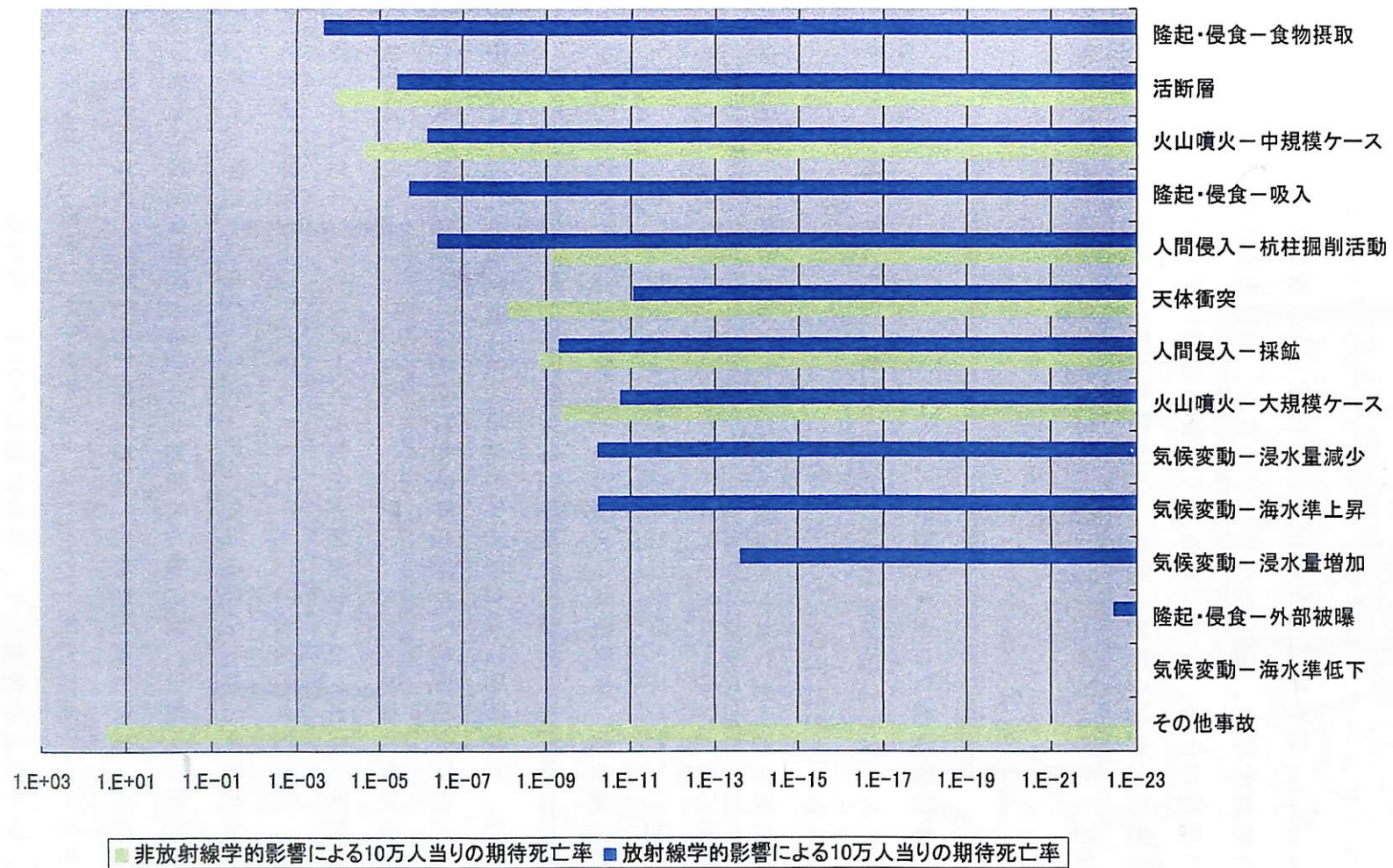


図 4-2 日本におけるほとんど起こり得ない事象，長期的環境プロセスによる期待死亡率

#### 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。資料の内容は、地層処分場に関連した稀頻度事象、確率及びリスクの基本、解析方法の概要、及び結果の一般公衆への適用の仕方、などである。この資料を用いて、コンピュータ・スクリーン上で自動的に内容を展開したり、OHP 等でプリント表示可能となった<sup>(4)</sup>。

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。

##### 4.4.1 シナリオ影響評価プロセスの概要

可視化システムで表示する内容を明らかにするため、まず、本年度のシナリオ解析評価プロセス全体像を以下のようにまとめた。

本解析評価結果を導いたプロセスを図 4-3 に示す。プロセスは、中規模火山噴火のリスク評価に対して用いるためのシナリオの定義から始まる。シナリオは、火山性爆風と続いて起こる火砕流による影響を含んで定義される。

シナリオの定義の後、中規模及び大規模な火山噴火による相対的リスクが定性的に検討される。中規模火山噴火の影響が局地的なものであるのに対して、大規模な火山噴火は、地球規模にわたるものとなる。3.2 節で述べたように、中規模火山噴火は、大規模火山噴火より発生可能性が大きい。中規模火山噴火ケースでは、影響を被る対象人口は大規模火山噴火ケースより少ないものの、影響はより大きい。その結果、リスクは、中規模火山噴火ケースの方が、より大きくなる。

図 4-3 には、次のプロセスとして、シナリオの発生可能性と影響の推定が示されているが、中規模火山噴火の発生可能性は、まず、日本の火山噴火の歴史的記録に基づいて推定し、次に、処分場が日本全土に占める面積が非常に小さいことに基づき減じられ、また、火山活動は、ある領域（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 125km 上にある在来の火山地帯）においてより発生しやすいということを考慮して、さらに減じられる。処分場は、非在来的火山地帯に適切に設置されるであろうから、処分場を貫通する火山噴火の発生可能性

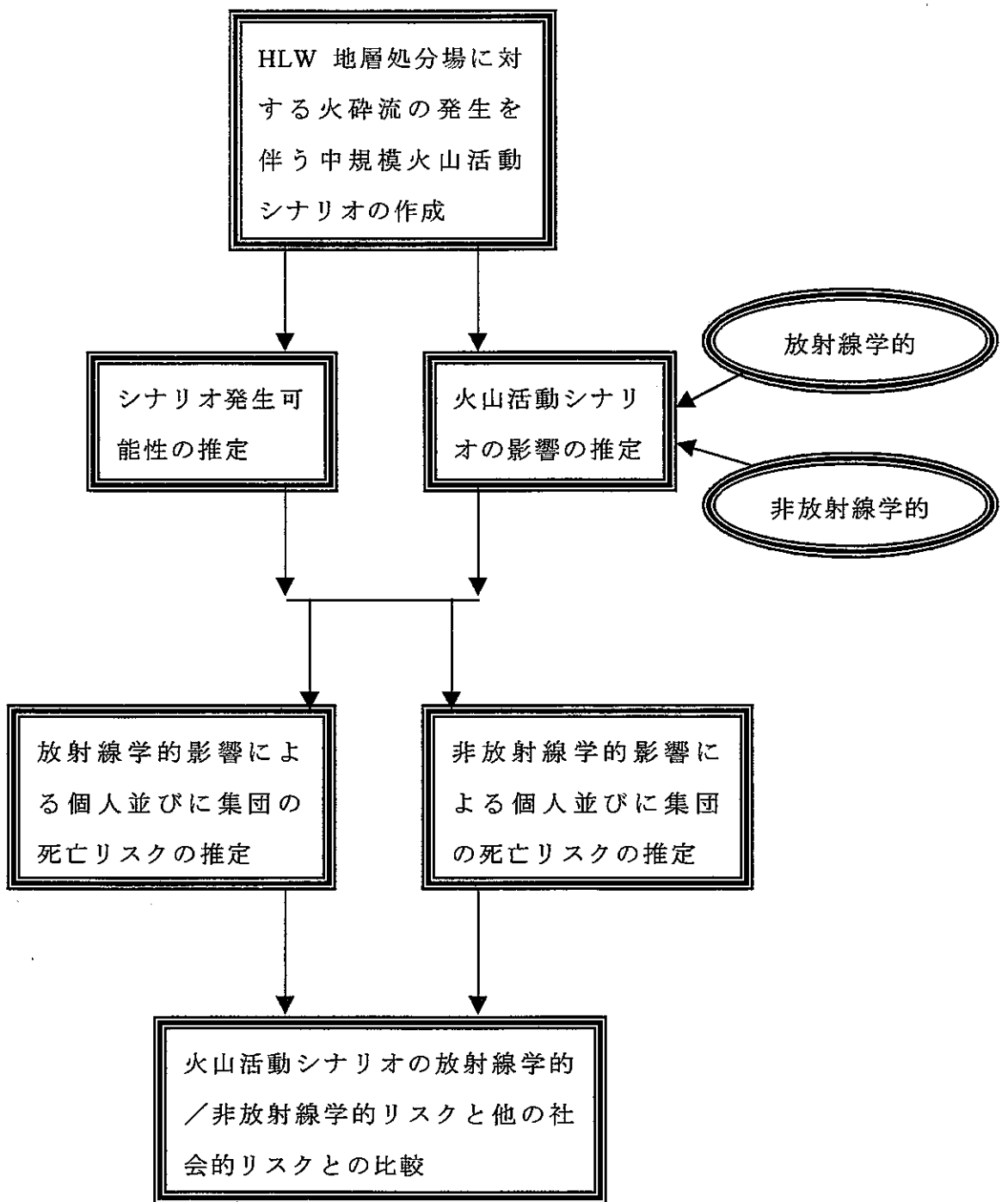


図 4-3 中規模火山噴火のリスク解析手法のフローチャート

は、火山噴火が非在来的地域で生ずる可能性がより小さくなることを反映して、減じられる。

中規模火山噴火の影響は、放射線学的及び非放射線学的要因の両方に対して評価される。火山性爆風による非放射線学的影響により 1000 人の死者が生ずるとする。非放射線学的影響の推定は、このような事象における日本並びに他国でかつて生じた公称死亡者数に基づく。その値は文献(3)で設定したものである。また、民間航空機が火山噴火の火柱の灰雲を回避できず乗客全員死亡の事故を引き起こす場合に生ずる死者数として 300 人がさらに加わり得る。さらに非放射線学的死者として火砕流によるものが加わる。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の軌跡と、人口密度 326 人/km<sup>2</sup>に基づくと、火砕流による死者数は 17,000 人となる。以上より、非放射線学的影響による全死者数はこれら 3 要因を加え、18,300 人となる。さらに晩発性の死亡として、非放射線学的な降灰の吸入によるものも考えられるが、その数は即死に比べて小さいと考えられるので、本解析では考慮していない。

噴火の放射線学的影響を計算するため、環境に放出し得る放射性物質の量が決定され、コンピュータプログラムを用いて、放射性物質の風下方向への分散状況が計算され、また、放射性物質を運ぶ風の通り道上の人々に与える放射性物質の影響が評価される。計算結果によると、放射性物質からの被曝により、生涯に亘る癌死者数として 600 人（噴火の火柱（含、粉塵）480 人＋火砕流（含、粉塵）120 人）が発生することとなる。

これらの中規模火山噴火による死者数は、個人死亡確率に変換され、事象発生可能性と結合されて、リスク値の計算が行われる。ここで、リスク値は、人々が日常生活で接する他の事象のリスクに対して通常用いられる統計値と比較できるようにし、これらの他の事象のリスク値との比較を通じ、個人が処分場から受けるかもしれない相対的有害度が示される。その結果、処分場は、火山噴火や他の事象に比べて、個人の生涯に亘る潜在的危険度を増加させないことが示される。

#### 4.4.2 リスクの可視化システムの開発

前項で述べたような火山活動による影響の評価から計算される汚染状況のイメージやインパクトの大きさなどを、他の汚染物質によるものと比較したり、コンピュータグラフィックスのようなツールで可視化するためのシステムを作成した。

##### (1) 開発用アプリケーション

本システムの作成には、画像や音等のマルチメディア対応の開発アプリケーションが必要となる。

Windows 版の PC の場合、開発言語としては Visual Basic 言語または Visual C 言語等が該当する。また、画像データファイルの種類は次に示すような種類があるため、これらの編集やファイル変換を行うためのツールが必要となる。

- ・ GIF ファイル(拡張子 GIF)
- ・ ビットマップファイル (拡張子 BMP)
- ・ JPEG ファイル (拡張子 JPG)
- ・ Tagged Image File Format(拡張子 TIF)
- ・ Portable Network Graphics (拡張子 PNG)
- ・ PC Paintbrush (拡張子 PCX)

これらのファイルの違いは、画像の圧縮方法である。

画像作成のアプリケーションとしては、Microsoft の Office に添付されている Microsoft Photo Editor や Windows の標準ツールであるペイント等がある。その他に市販されているツール (Paint Shop Pro5J 等) もある。

##### (2) リスクの可視化システムの試行

ここでは、4.4.1 項のシナリオリスク評価プロセスに基づいて、図 4-4 に示す内容の図に集約作成された可視化資料を用い、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。その結果を付録 C に示す。

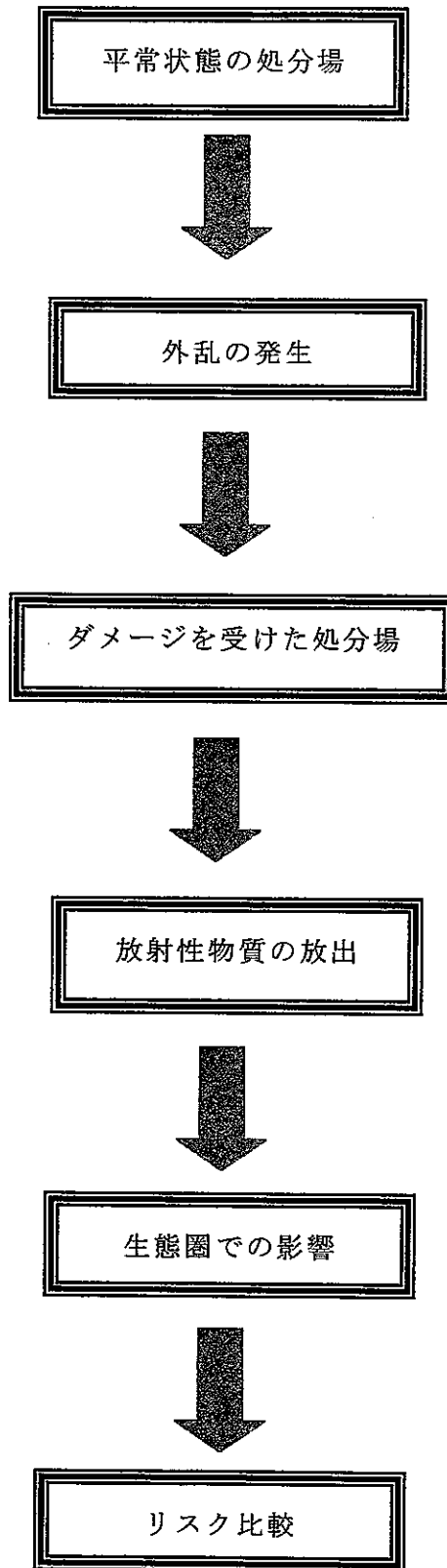


図 4-4 可視化フロー

## 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。

This is a blank page.



## 参 考 文 献

- (1) 憫三菱総合研究所：「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) 憫三菱総合研究所：「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) 憫三菱総合研究所：「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) 憫三菱総合研究所：「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) C. A. Negin and G. Worku：「MicroShield Version 4 User's Manual」Grove Engineering, Inc., Grove 92-2, Rockville, MD, May 1(1992).
- (8) CRWMS M&O:「Probabilistic Volcanic Hazard Analysis for Yucca Mountain, Nevada」Technical Report BA0000000-01717-2200-00082,Rev.0,June (1996) .
- (9) M.J. Apted et al.：「Process System Modeling of Volcanism, Fault-Activation, and Uplift and Erosion Scenarios」QSI-9524-1,February (1996) .
- (10) 小野：「火山噴火の長期的予測」火山, Vol.34, No.特別号, pp201-214 (1990).
- (11) 石川県白山自然保護センター：「白山火山 白山の自然誌 12」白山の自然誌, No.12 (1992).
- (12) O.B. Toon, et al.：「Environmental Perturbations caused by the Impacts of Asteroids and Comets」Reviews of Geophysics, February (1997) .
- (13) 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).

- (14) 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).
- (15) 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).
- (16) NSC: 「Accident Facts,1993 Edition」 National Safety Council, 1993 Edition, Itasca, IL, USA(1993).
- (17) T.Rockwell : 「What's Wrong with being Cautious?」 Nuclear News, ANS, LaGrange Park, IL, June (1997).
- (18) 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).
- (19) M. J. Brown : 「Extreme Scenarios for Nuclear Waste Repositories」 Health Physics, Vol. 43, No. 3, pp345-354 (1982).
- (20) 金子, 安田: 「Energy cone モデルによるピナツボ火山 1991 火砕流の解析 : Frothing 型噴火の可能性とマルチフローユニット型火砕流の Mobility」 日本火山学会講演予稿集, 2 (1993).
- (21) J.Mishima et al. : 「Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for NonReactor Nuclear Facilities」 DOE Handbook, DOE-HDBK-3010-94, December(1994).
- (22) Hayakawa's one million-year tephra catalog, <http://www.edu.gunma-u.ac.jp/~hayakawa/catalog/2000J>, Hayakawa Paleovolcanology Laboratory, Gunma University (1996).
- (23) Pinatubo Volcano, <http://www.expo.edu.ph/pinatubo/page4.html>, ABS-CBN Broadcasting Corporation, Philippine Network Foundation, Inc. (1996).
- (24) Lyn Topinka : 「Cascades Volcano Observatory」 [http://vulcan.wr.usgs.gov/Hazards/NRC\\_Report/nrc\\_volcanoes.html](http://vulcan.wr.usgs.gov/Hazards/NRC_Report/nrc_volcanoes.html), United States Geological Survey, Reston, VA, February 24 (1999).

- (25) Lyn Topinka : 「Cascades Volcano Observatory」 [http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/MSH/Publications/MSHPPF/PPF\\_pyro\\_flows.html](http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/MSH/Publications/MSHPPF/PPF_pyro_flows.html), United States Geological Survey, Reston, VA, February 24 (1999).
- (26) [volcano.und.edu/vwdocs/volc\\_images/img\\_unzen2.html](http://volcano.und.edu/vwdocs/volc_images/img_unzen2.html)
- (27) 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).
- (28) Lyn Topinka : 「Cascades Volcano Observatory」 [http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/WestIndies/Pelee/description\\_1902\\_eruption.html](http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/WestIndies/Pelee/description_1902_eruption.html), United States Geological Survey, Reston, VA, February 24 (1999).
- (29) [netsurf.geo.mtu.edu/eos/education/slide\\_set2/slides.captions.html](http://netsurf.geo.mtu.edu/eos/education/slide_set2/slides.captions.html)
- (30) 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).
- (31) David Alt and Donald W. Hyndman : 「Roadside Geology of Idaho」 Mountain Press Publishing Co., Missoula, MT (1989).
- (32) 「The World Almanac and Book of Facts」 World Almanac, p773 (1992).
- (33) Gari C. Mayberry : 「Volcanic Ash Clouds and Aircraft Safety」 <http://www.geo.mtu.edu/departement/classes/ge404/gcmayber/historic.html>, Department of Geological Engineering and Sciences, Michigan Technological University, Houghton, MI, USA, April 20 (1998).
- (34) 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).

This is a blank page.

付 録

This is a blank page.

## A. RSAC-5 使用の計算フレームについて

本研究では、シナリオの発生による“リスク”を、数学的には、発生頻度と影響による死亡期待数との積、従って、例えば、単年度当りの死亡数として、他のシナリオや日常的リスクとの比較を統一的に行うことを考えている。ここで、一般に、リスクは、経時的に変化し得る性質のものであり、実際、火山噴火シナリオによる被曝線量評価事例<sup>(19)</sup>や人間侵入シナリオリスク評価事例<sup>(2)</sup>に示すように、癌死亡線量率は、時間の関数として算出し得るが、平成 8 年度付録 B<sup>(3)</sup>でも論じているように、本研究では、データ情報の不確実性、並びにサイト特性に影響されない一般的解析評価を目的としていることから、廃棄物埋設後 1000 年経過して事故が発生し、その時点で、ステンレス鋼製キャニスターと厚肉の炭素鋼製容器は、閉じ込め機能が全くないものと保守的に想定した。放射性崩壊が最小で、放出される割合が最大のときに、影響は最大となる。事故リスクの 1 つの測度は事故の発生頻度と事故の影響の積であるから、もし放射性物質が 1000 年間だけ崩壊した間に放出される割合も実際には経年効果を受けている可能性があるならば、リスクは、1000 年後の時点でピーク値に近くなるだろう。

いずれにせよ、RSAC コードは、時間依存効果を考慮するケースでも、稀頻度事象に起因する放出被曝線量の計算に用いることができる。RSAC コードへの要求としては、時間依存効果の考慮に合わせて入力ソースターム又は入力気象条件を調整させればよい。

なお、RSAC-5 の大気拡散式は有風時ブルーム式を用い、拡散パラメータは Pasqill-Gifford 線図を使用している。これは一般の環境アセスメントの大気シミュレーションで用いられている手法（短時間平均拡散濃度計算手法）と同様である。

## B. 火砕流シミュレーションモデル分析事例

火砕流の被害は、範囲は限定されるが到達範囲内では全てが破壊され、また、極めて短時間に被害が発生するという特徴がある。その被害量を浅間山の天仁・天明噴火様式（プリニー式噴火）のもとにモデル解析している事例<sup>(14)</sup>がある。

そこでは、火砕流の流下シミュレーションを、ビンガム流体（付・図 B-1）とエネルギーコーンモデル（付・図 B-2）を用い、

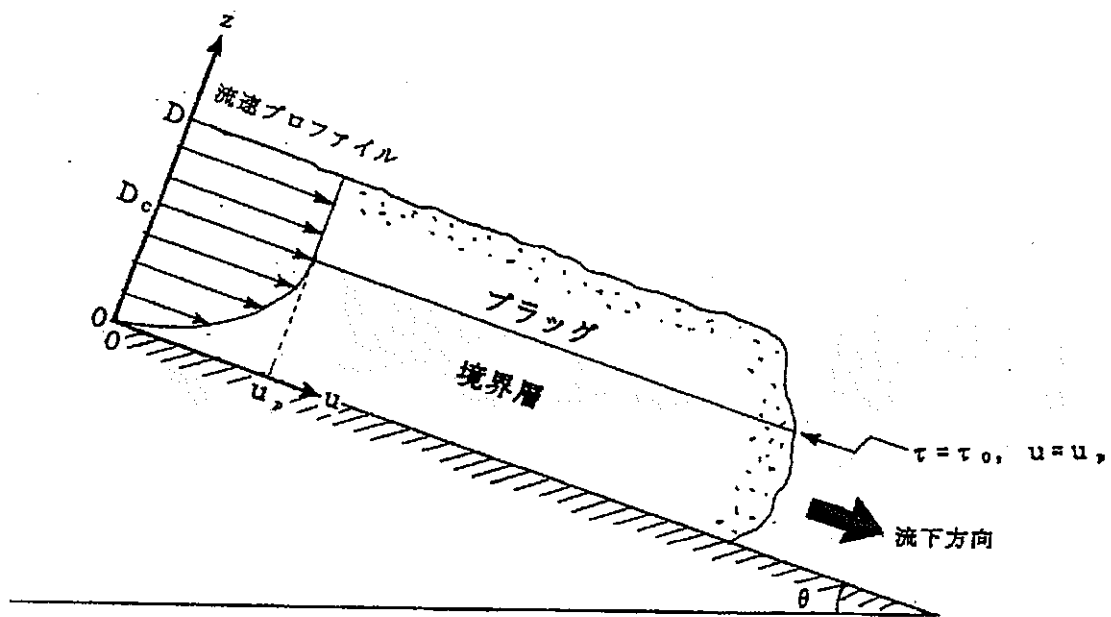
その結果、

- ・ 火砕流が発生してから5分～10分で急速に到達範囲が拡大し、30分後には移動がほぼ終了すること（付・図 B-3）
- ・ 火砕流は火山身体周辺のかなり広範囲に到達する可能性があること（付・図 B-4）

が示されている。

このような動態的モデルは具体的な火山周辺の災害対策用には有効と考えられる。他方、今回検討する非放射線学的リスク評価用にも、火砕流被害のイメージの可視化などに間接的に参照した。



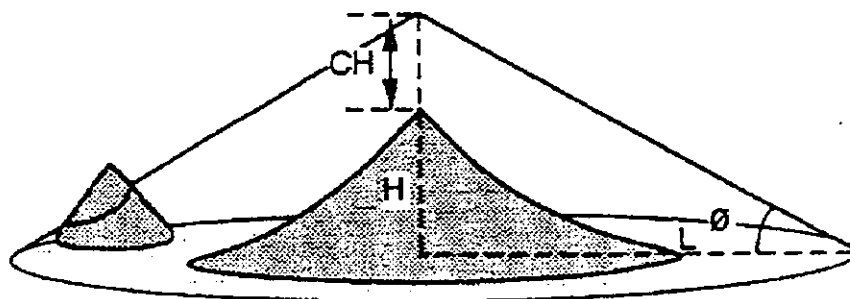


付・図 B-1 ビンガム流体の模式図

出典：(14)

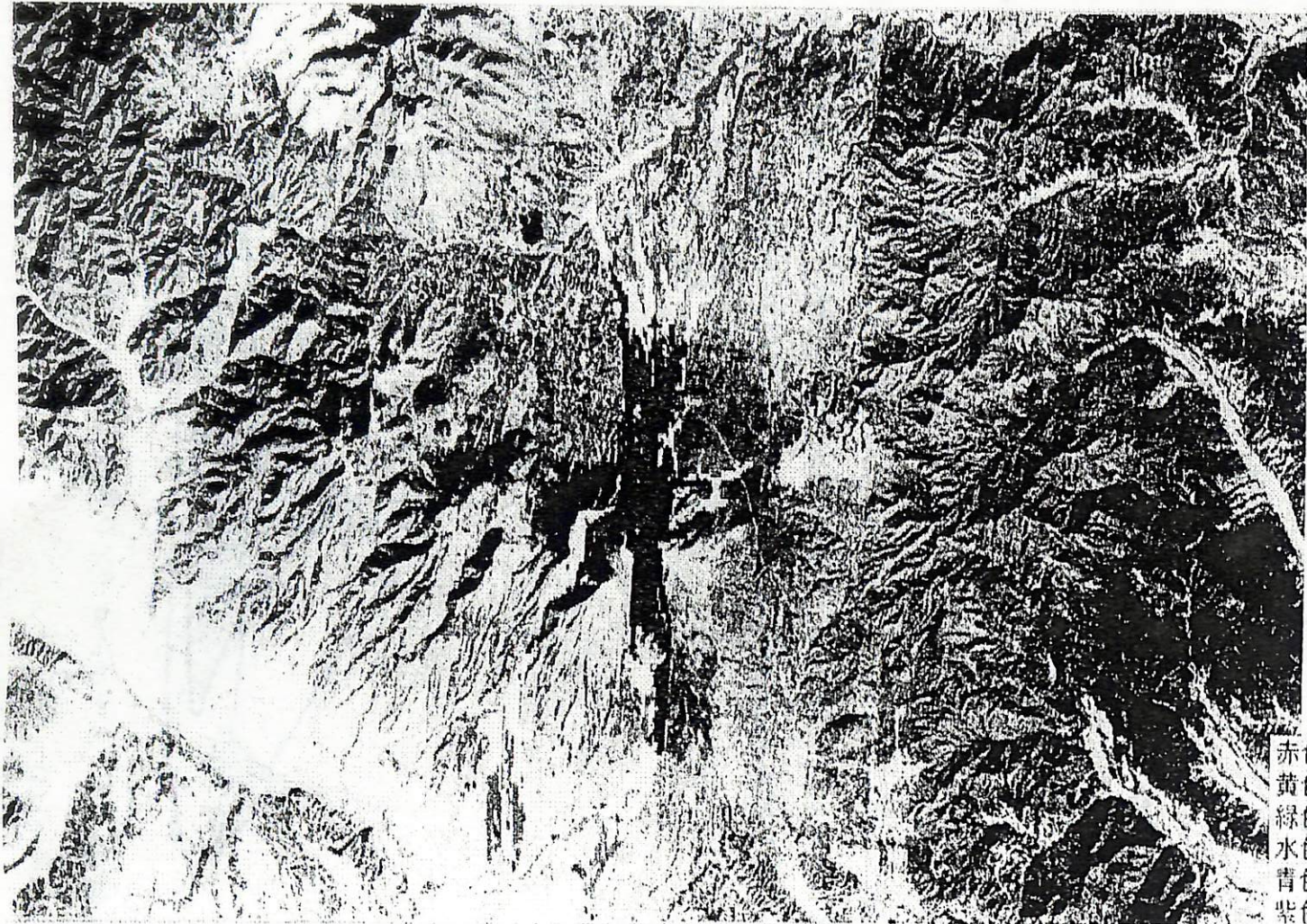
CH = 500m (ピナツボ火砕流分布パターン)

$\phi = 7.5^\circ$



付・図 B-2 エナジーコーンの模式図 (金子・安田, 1993) (20)

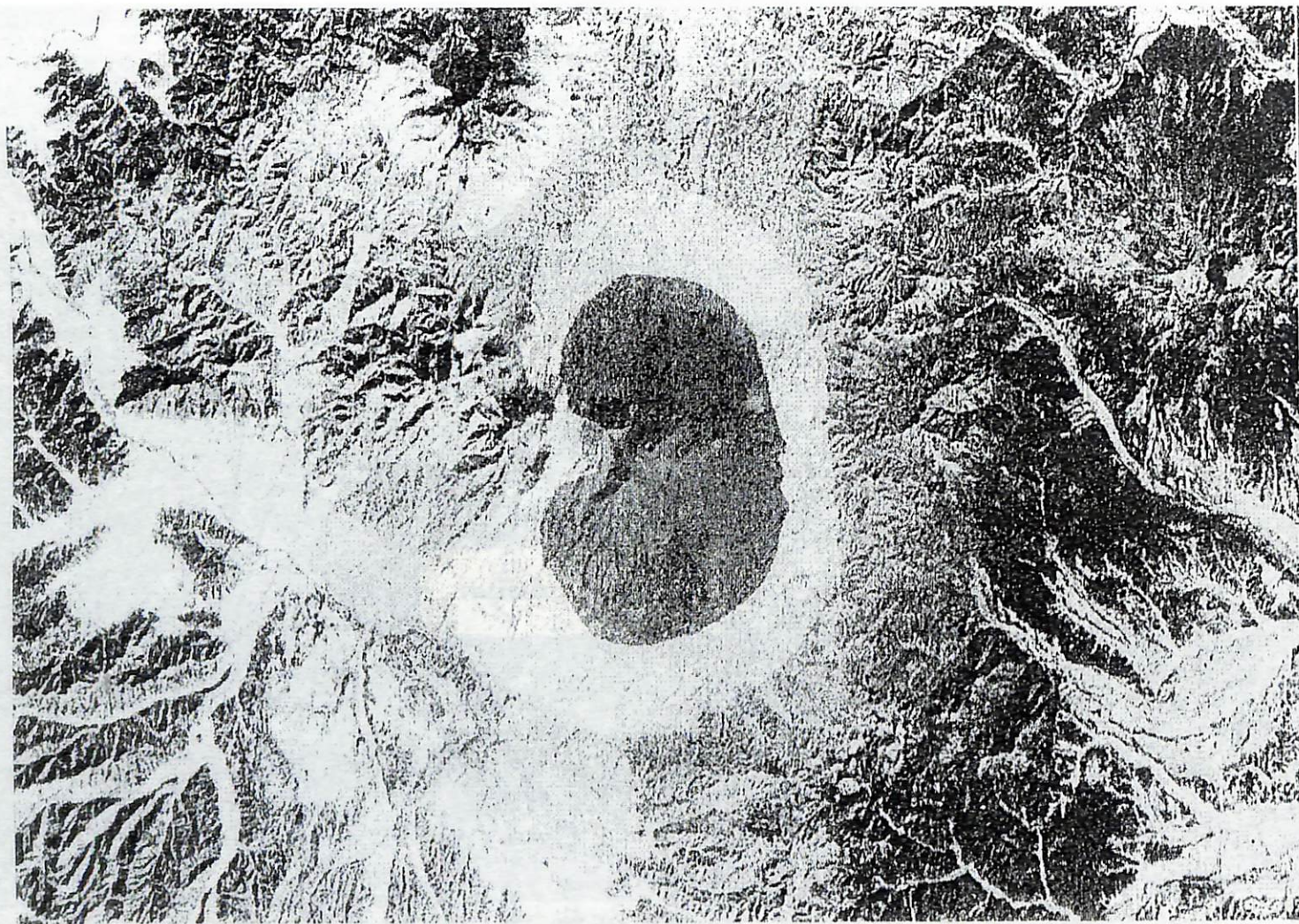
出典：(14)



付・図 B-3 ビンガムフローモデルによる火砕流の到達時間

出典：(14)





付・図 B-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

出典：(14)



### C. 可視化システム表示例

付・図 C-1 に作成したシステムの開始画面を示す。この画面の上部のメニューには、本文 図 4-4 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。

「シナリオ開始」メニューをクリックすると、「平常状態」→「外乱（火山）」→「処分場ダメージ」→「放射性物質の放出」→「影響」→「リスク評価」の画面を3秒間隔で連続的に表示する。

「平常状態」メニューをクリックすると、平常状態の地層処分場イメージを表示する。また、この画面では「拡大」ボタンが用意されており、このボタンをクリックすると拡大図が表示される。（付・図 C-2、C-3）

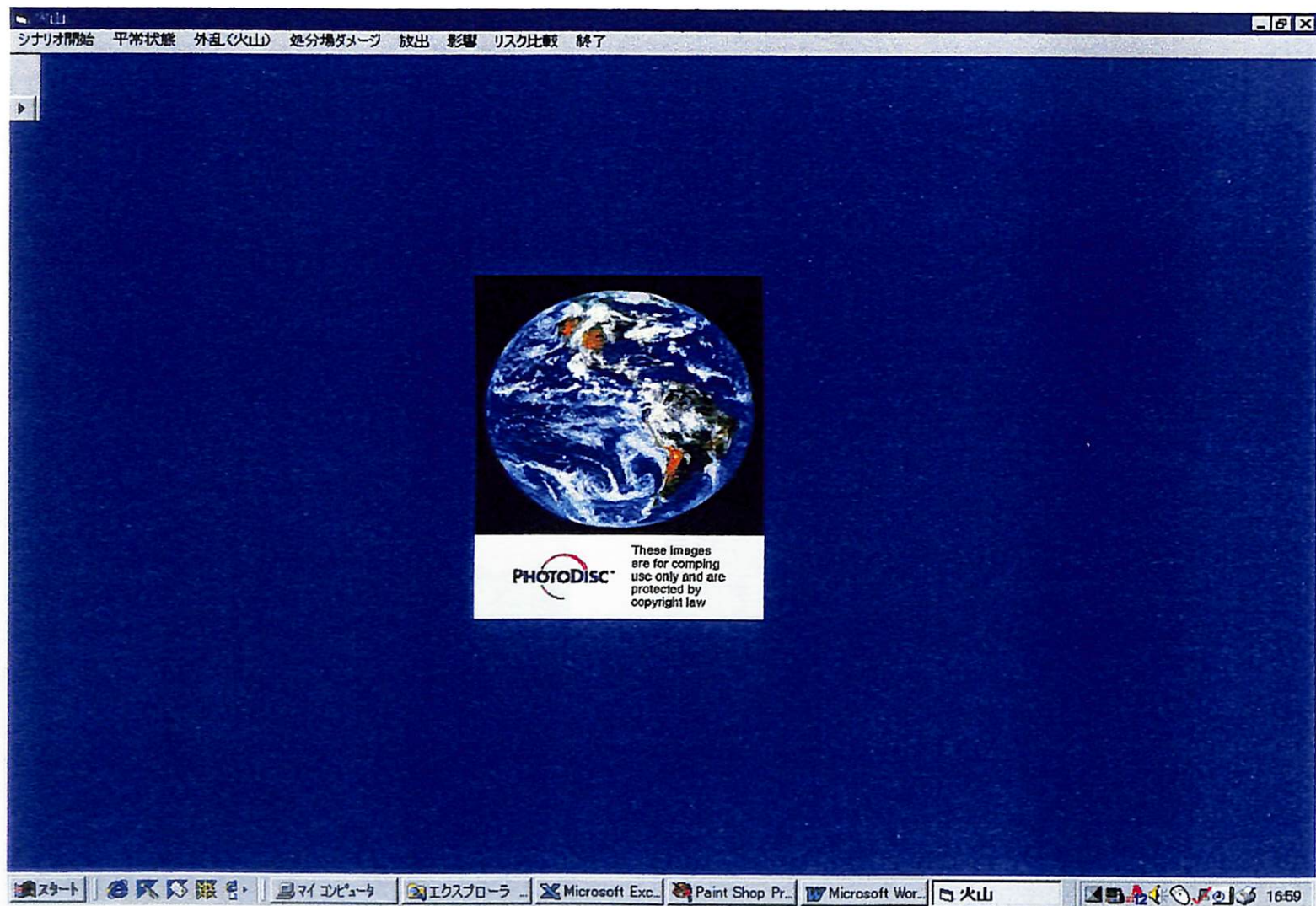
「外乱（火山）」メニューをクリックすると、火柱を伴う火山（桜島）と火砕流（雲仙普賢岳）の画面が5秒の間隔で連続的に表示される。（付・図 C-4、C-5）

「処分場ダメージ」メニューをクリックすると、地下処分場にマグマが貫入する画面が表示される。また、この画面では「連続図」ボタンが用意されており、このボタンをクリックすると火山の貫入の様子が連続的に表示される。（付・図 C-6）

「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。（付・図 C-7）

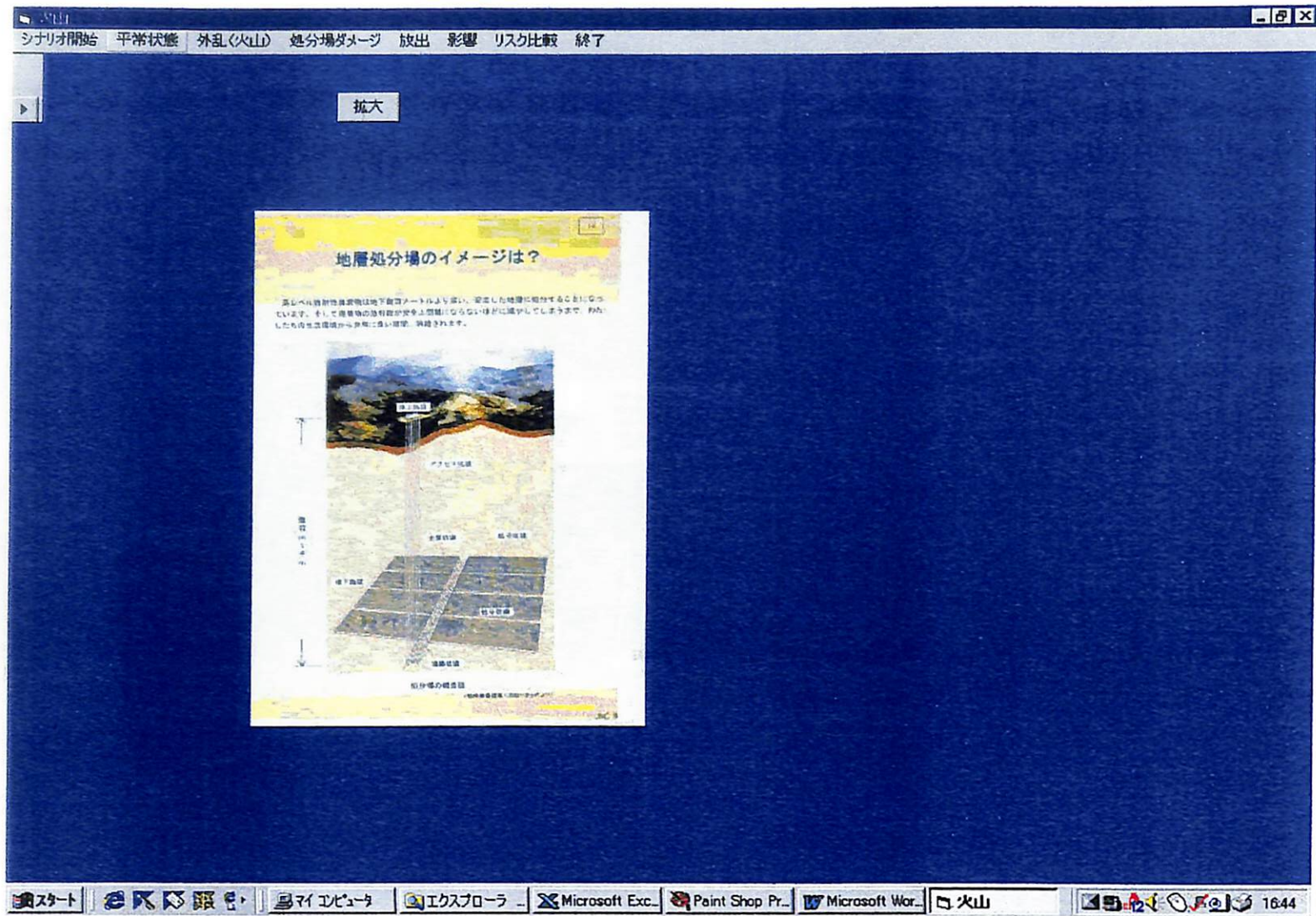
「影響」メニューをクリックすると、非放射線学的影響の画面、放射線学的影響の画面、火砕流の放出による風下方向への放射線線量の分布画面、火柱放出による風下方向への放射線線量の分布画面がそれぞれ5秒の間隔で連続的に表示される。（付・図 C-8、C-9、C-10、C-11）

「リスク比較」メニューをクリックすると、中規模火山噴火による死亡リスクと他の死亡原因との比較図、ほとんど起こり得ない事象での期待死亡率の図が5秒の間隔で連続的に表示される。（付・図 C-12、C-13）



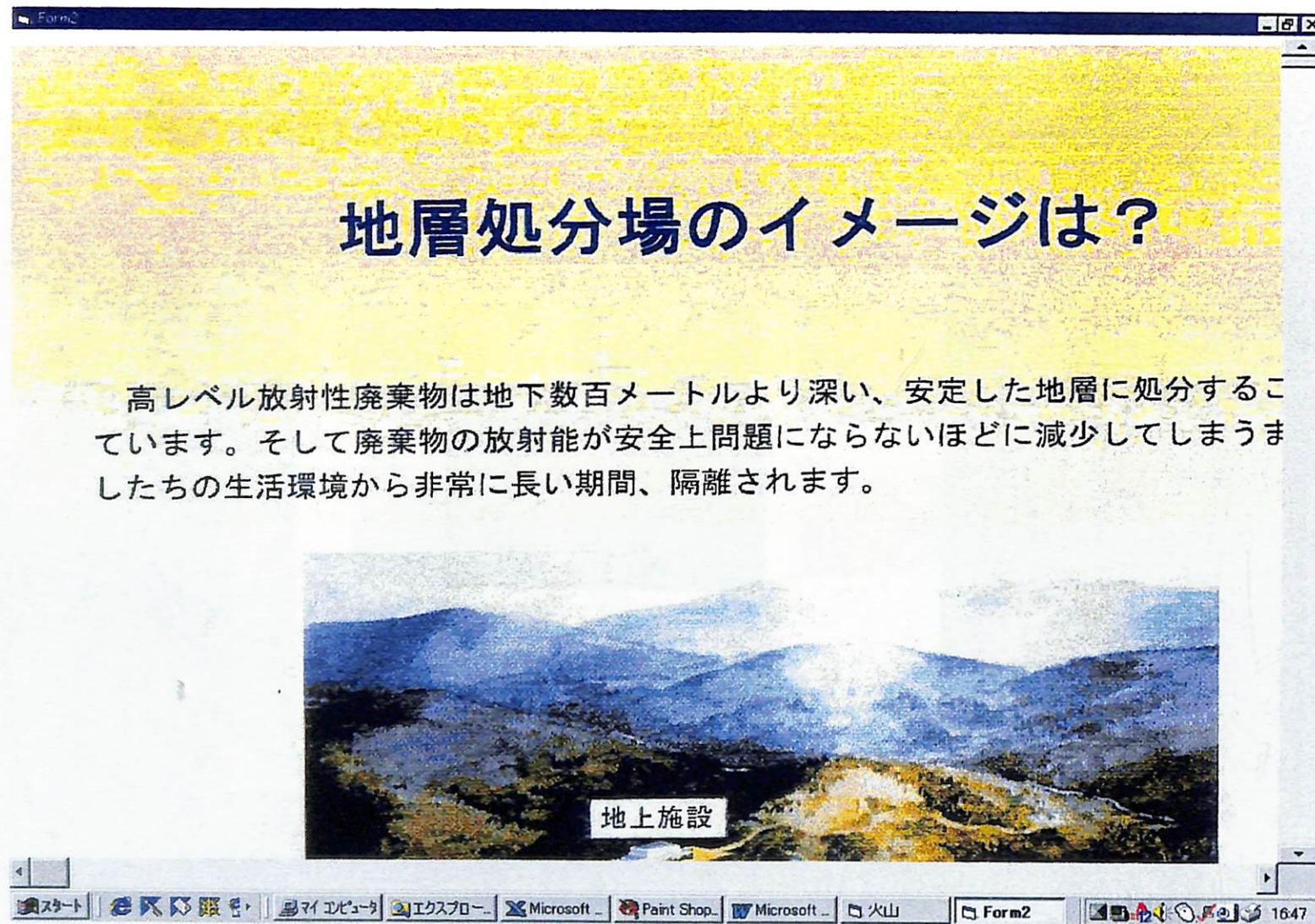
付・図 C-1 リスク可視化システムの開始画面



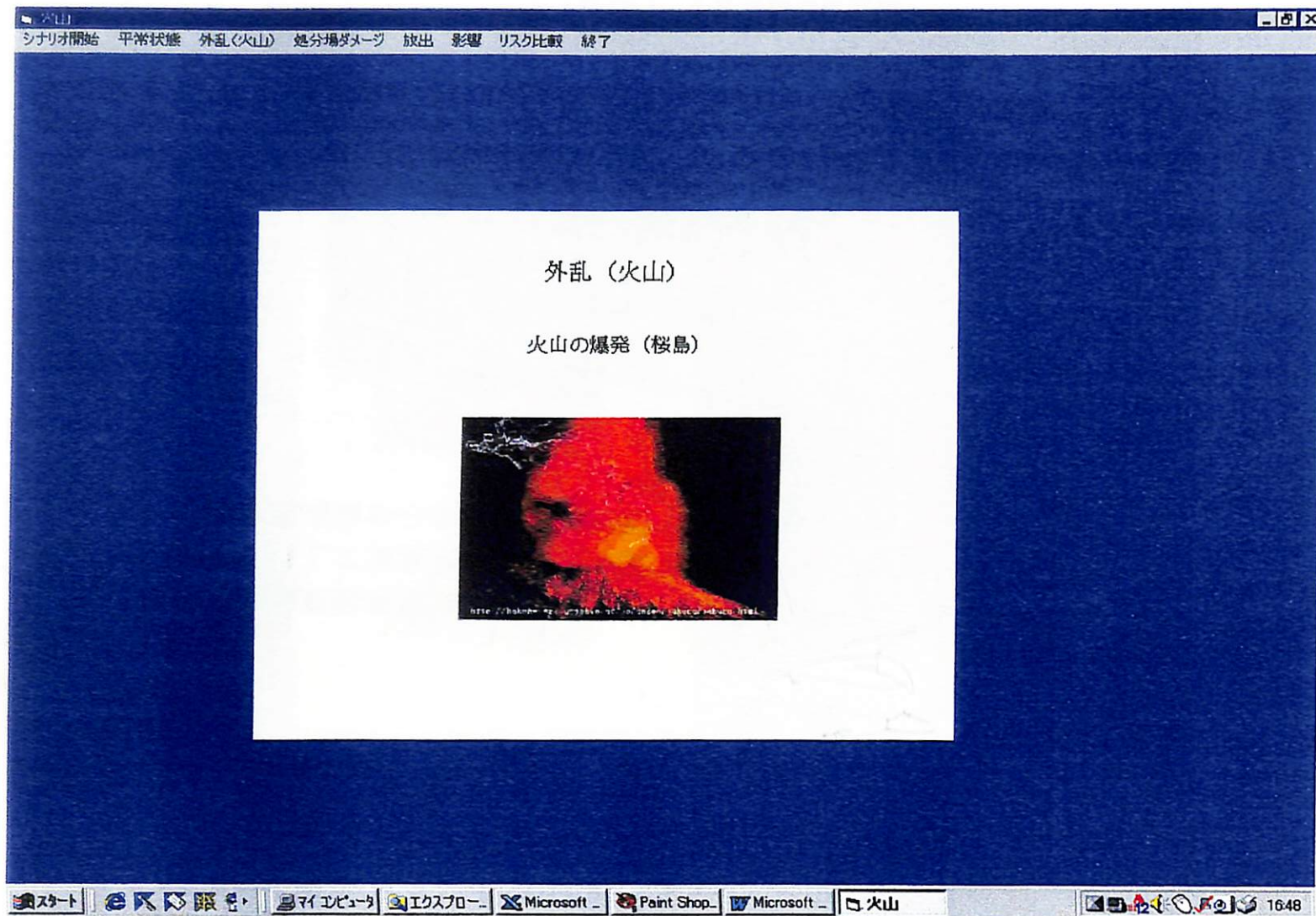


付・図 C-2 平常状態





付・図 C-3 平常状態の拡大図



付・図 C-4 外乱 (火山) の火柱 (桜島)





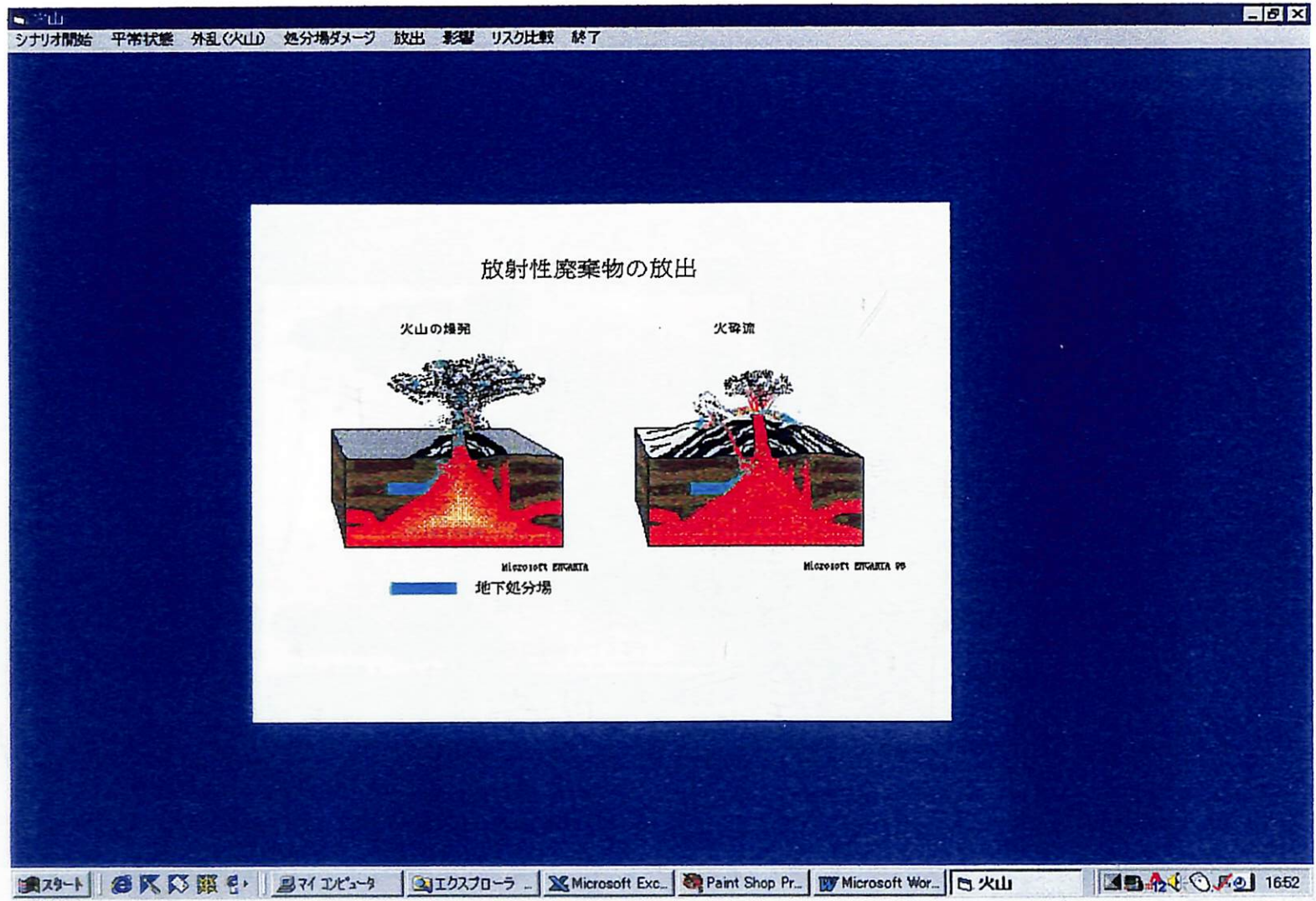
付・図 C-5 外乱 (火山) の火砕流 (雲仙普賢岳)



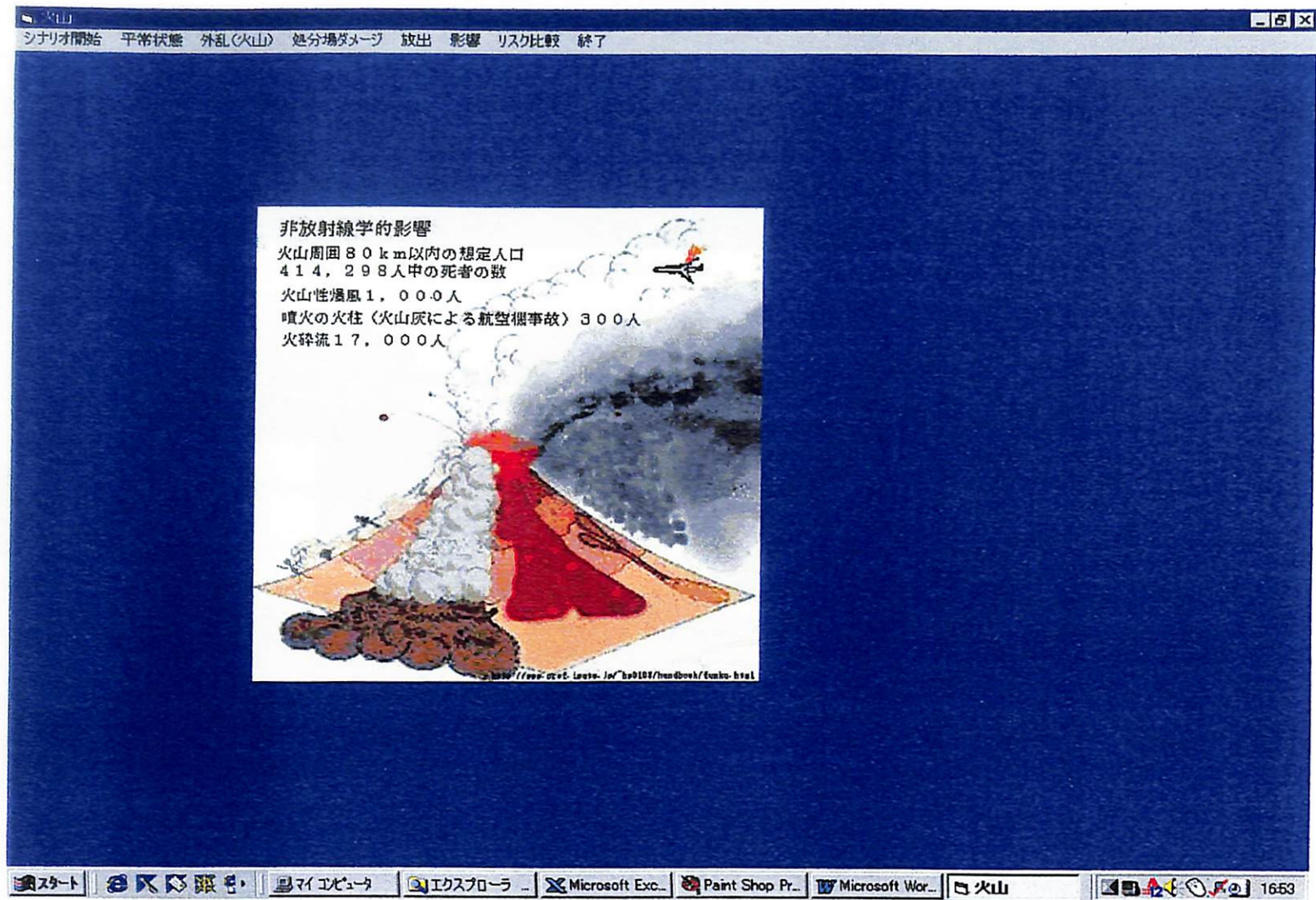
- 付-14(74) -

付・図 C-6 処分場のダメージ



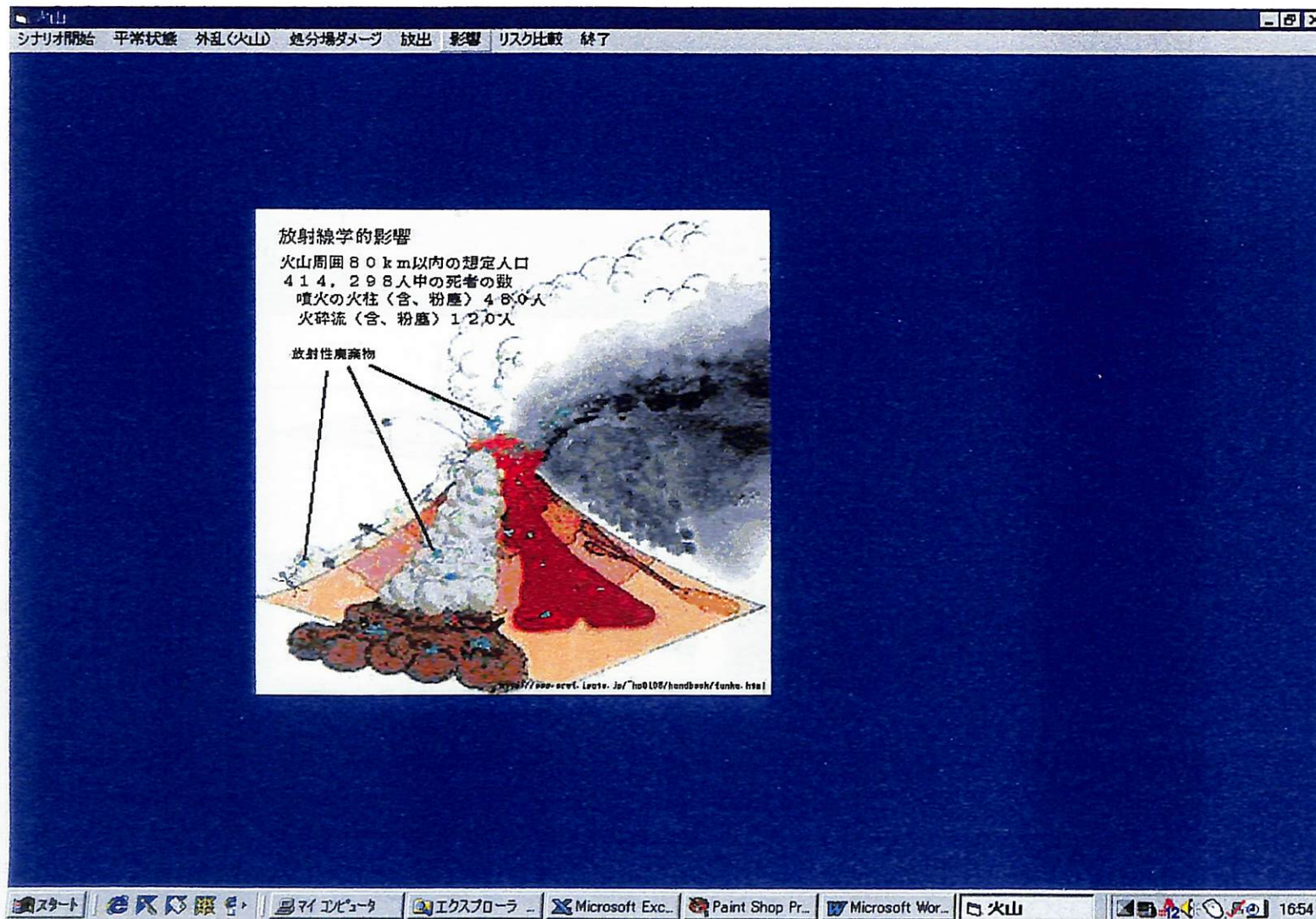


付・図 C-7 放射性廃棄物の放出

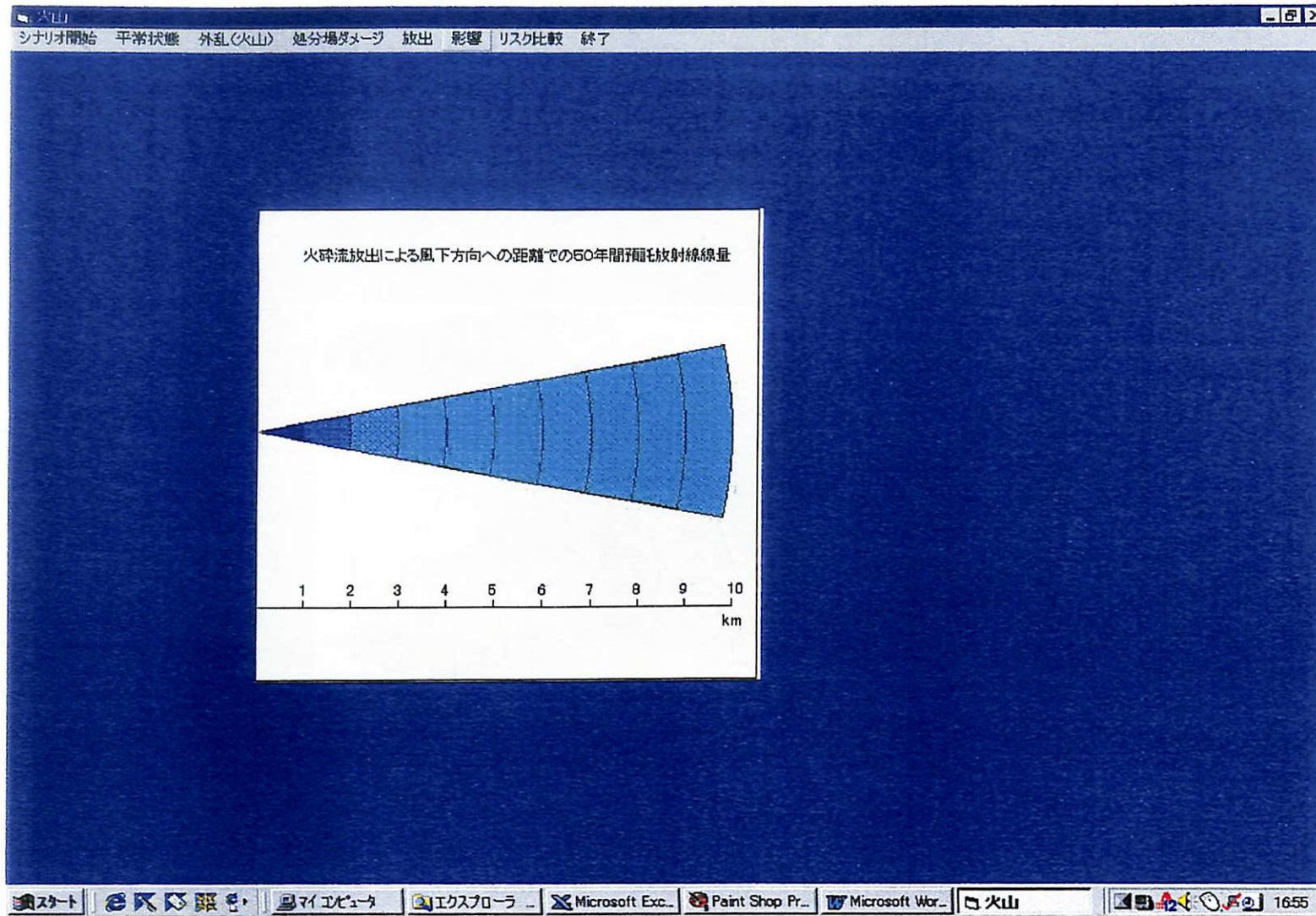


付・図 C-8 非放射線学的影響



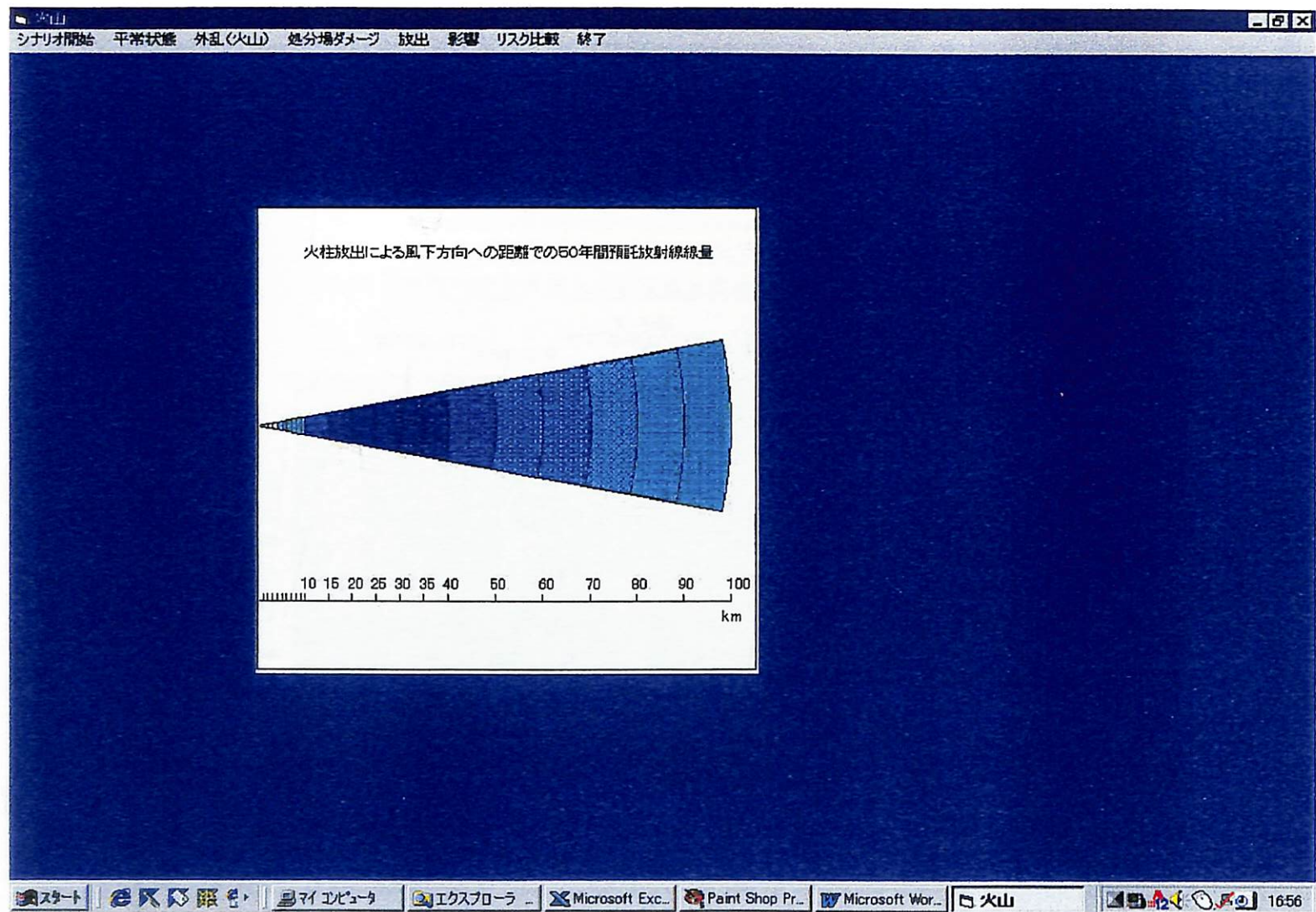


付・図 C-9 放射線学的影響

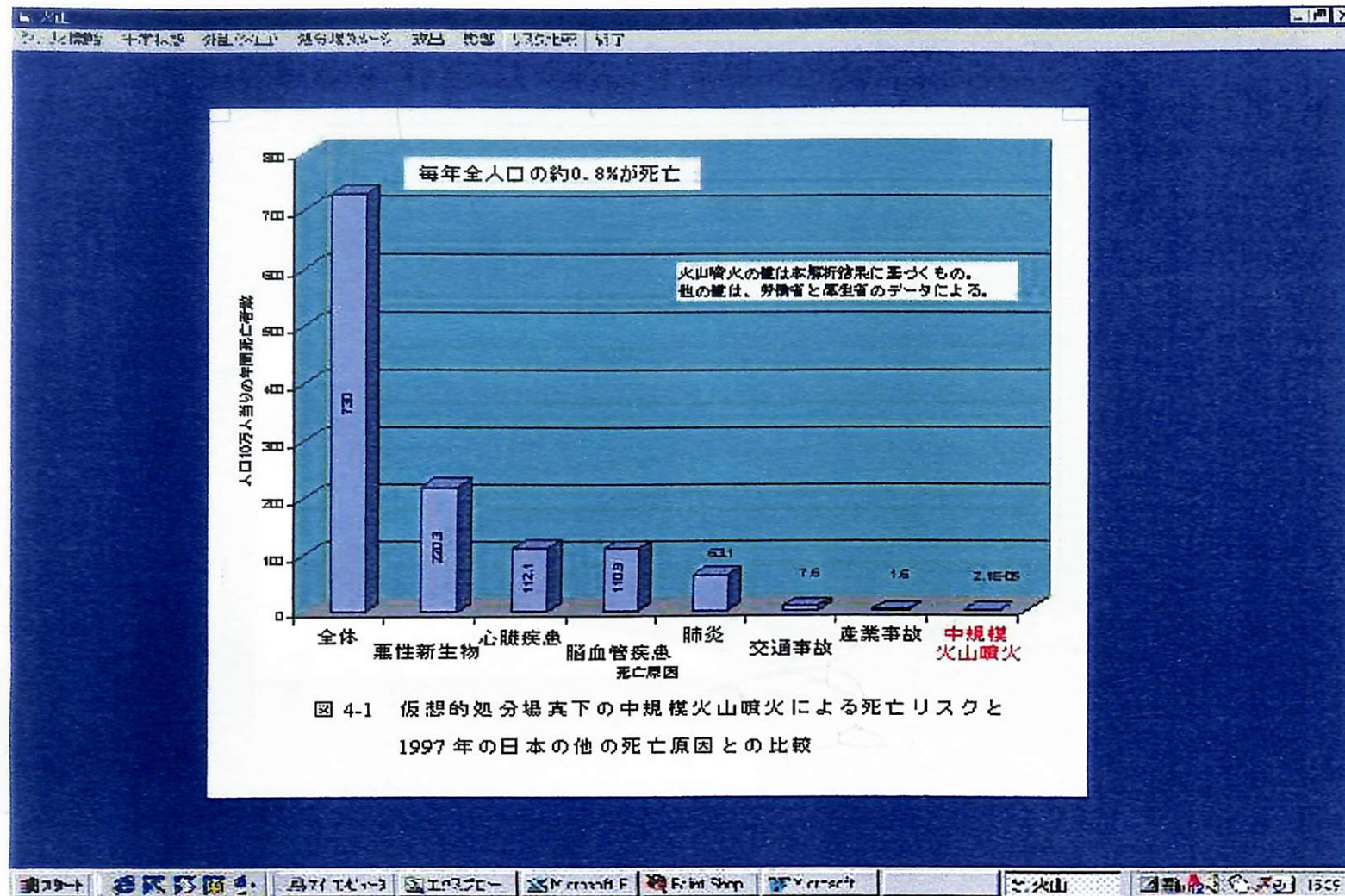


付・図 C-10 火砕流による風下方向の放射線線量分布



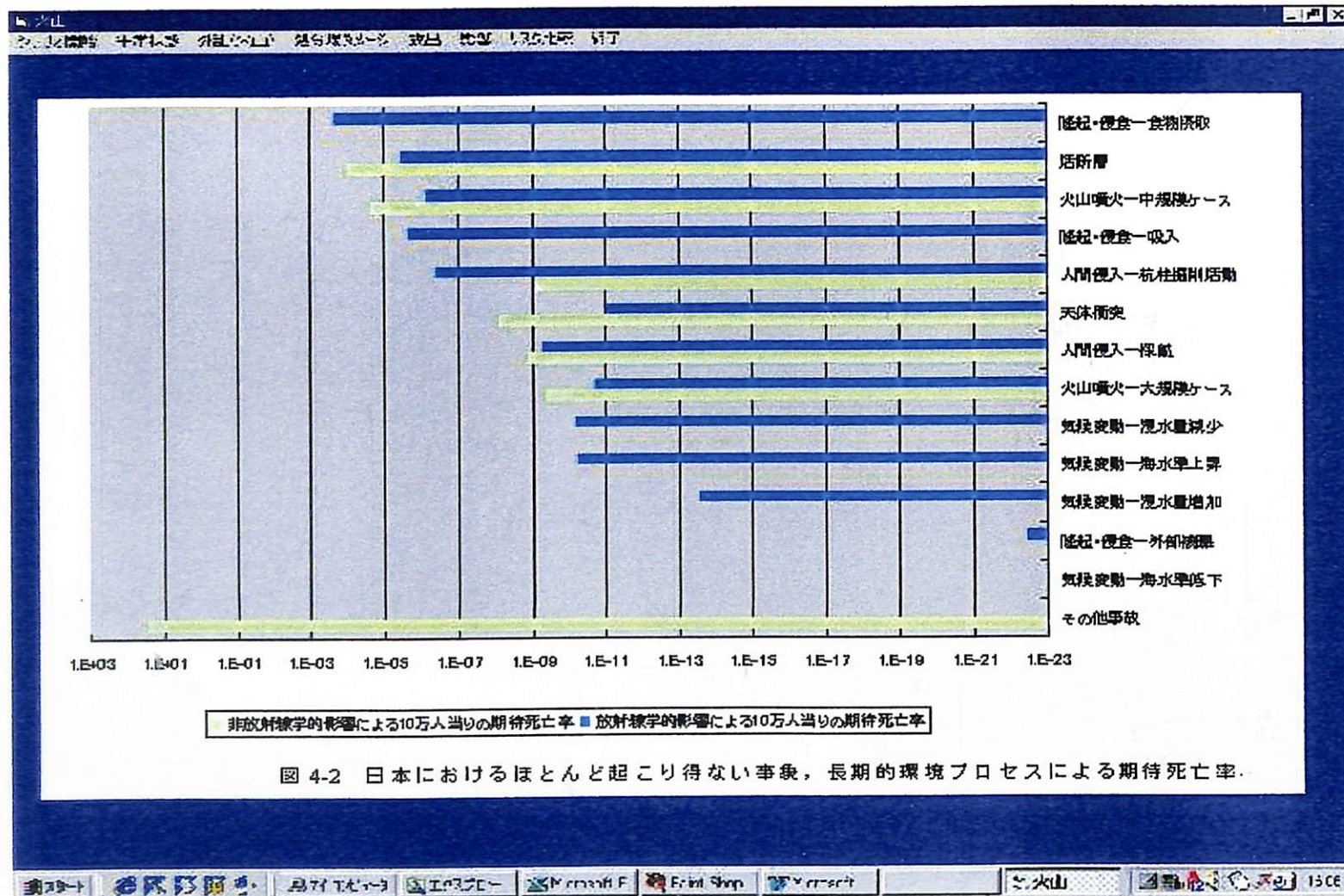


付・図 C-11 火柱放出による風下方向の放射線線量分布



付・図 C-12 中規模火山噴火による死亡率と他の死亡原因との比較





付・図 C-13 ほとんど起こり得ない事象の期待死亡率