

気中降下火砕物濃度の推定の考え方(案) (追記版)

平成29年5月15日
原子力規制庁

設置許可基準規則及びその解釈

＜实用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則＞

第六条（外部からの衝撃による損傷の防止）

安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならない。

＜解釈＞

- 「想定される自然現象」とは、敷地の自然環境を基に、洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象又は森林火災等から適用されるものをいう。
- 「想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないもの」とは、設計上の考慮を要する自然現象又はその組み合わせに遭遇した場合において、自然事象そのものがもたらす環境条件及びその結果として施設で生じ得る環境条件において、その設備が有する安全機能が達成されることをいう。

原子力発電所の火山影響評価ガイド

6. 1 降下火砕物

(2) 降下火砕物による原子力発電所への影響評価

降下火砕物の影響評価では、降下火砕物の堆積物量、堆積速度、堆積期間及び火山灰等の特性などの設定、並びに降雨等の同時期に想定される気象条件が火山灰等特性に及ぼす影響を考慮し、それらの原子炉施設又はその附属設備への影響を評価し、必要な場合には対策がとられ、求められている安全機能が担保されることを評価する。

解説-17. 堆積速度、堆積期間については、類似火山の事象やシミュレーション等に基づいて、原子力発電所への間接的な影響も含めて評価する。

(3) 確認事項

(a) 直接的影響の確認事項

③外気取入口からの降下火砕物の侵入により、換気空調システムのフィルタの目詰まり、非常用ディーゼル発電機の損傷等による系統・機器の機能喪失がなく、加えて中央制御室における居住環境を維持すること。

審査における気中降下火砕物濃度の推定手法とその位置付け

審査において、降下火砕物の侵入による影響に対する対策として、平型フィルタ等の設置や換気空調系の停止により、安全施設の安全機能が損なわれてないようにすることを確認している。

念のため、フィルタが閉塞するまでの時間及びフィルタ交換に必要な時間を試算している。

試算においては、機器への評価を行うための具体的な気中降下火砕物濃度として、原子力発電所での観測値がないため、数少ない観測値（アイスランドのエイヤフィヨルトヨークトル火山の噴火（2011年）、米国セントヘレンズ火山の噴火（1980年）の観測値）を用い、事業者は、これらの気中降下火砕物濃度を用いた場合でもフィルタ交換により機能維持が可能であるとしている。（参考1参照）

なお、建屋等の荷重を考慮する際の降下火砕物の堆積量の想定には、原子力発電所敷地又はその周辺で確認された降下火砕物の層厚*や、運用期間中に推定される噴火規模に基づく数値シミュレーション（Tephra2）が用いられている。

*確認される層厚は、複数回の噴火や二次堆積によって一度の噴火による厚さよりも厚くなっている可能性も有る。

気中降下火砕物濃度の推定手法

原子力発電所の火山影響評価ガイドでは、「降下火砕物の影響評価では、降下火砕物の堆積物量、堆積速度、堆積期間及び火山灰等の特性などの設定、並びに降雨等の同時期に想定される気象条件が火山灰等特性に及ぼす影響を考慮し、それらの原子炉施設又はその付属設備への影響を評価し、必要な場合には対策がとられ、求められている安全機能が担保されることを評価する。」とされている。これに関連する注釈として、解説-17は「堆積速度、堆積期間については、類似火山の事象やシミュレーション等に基づいて、原子力発電所への間接的な影響も含めて評価する。」と補足している。



気中降下火砕物濃度の推定手法としては、以下の3手法が考えられる。

- ①観測値の外挿により推定する手法
- ②降灰継続時間を仮定して堆積量から推定する手法
- ③数値シミュレーションにより推定する手法

①観測値の外挿により推定する手法

①観測値の外挿により推定する手法（対象とする原子力発電所敷地とは異なる地点での観測値を用いて推定する手法）

既存の空中降下火砕物濃度観測値とその地点での堆積量を基に、対象とする原子力発電所敷地での堆積量との単純な比例計算（外挿）で求める。

<単純な比例計算の例>

- セントヘレンズ火山の噴火時のYakimaにおける空中降下火砕物濃度観測値：約 $33\text{mg}/\text{m}^3$ *
* 観測機器の測定限界を超えていたため、実際の濃度は $33\text{mg}/\text{m}^3$ 以上であった可能性も否定できない（参考2参照）。
- 観測地点（Yakima）での堆積量（実測値）：0.8cm
- 降灰15cmに相当する空中降下火砕物濃度 $= 0.033\text{g}/\text{m}^3 \times 15\text{cm} \div 0.8\text{cm} = 0.6\text{g}/\text{m}^3$

留意点

- ①対象とする原子力発電所と想定する火山との位置関係等が異なる地点での値である。
- ②観測機器の性能を超えた観測値であり、不確かさが大きい。
- ③Yakimaにおける観測濃度と堆積量との関係が一般化できるか不明。

②a降灰継続時間を仮定して堆積量(実測値)から推定する手法

②a 降灰継続時間を仮定して原子力発電所敷地での堆積量から推定する手法

原子力発電所敷地又はその周辺で確認される火山灰層から求まる堆積量、堆積物の粒径分布(実測値)を基に、降灰継続時間を仮定した上で気中降下火砕物濃度を算出する。

降灰継続時間については、同程度の噴火規模での噴火継続時間を参照して設定し、各粒径の終端速度は、実験的に求められた値を用いる。(参考3、4参照)

なお、降灰継続時間については、一定風を仮定するケースでは、噴出時間 \div 降灰継続時間(堆積量に支配的な主要な降灰)とみなすことが可能であり、同程度の噴火規模での噴火継続時間(参考5)を参照して設定する。

留意点

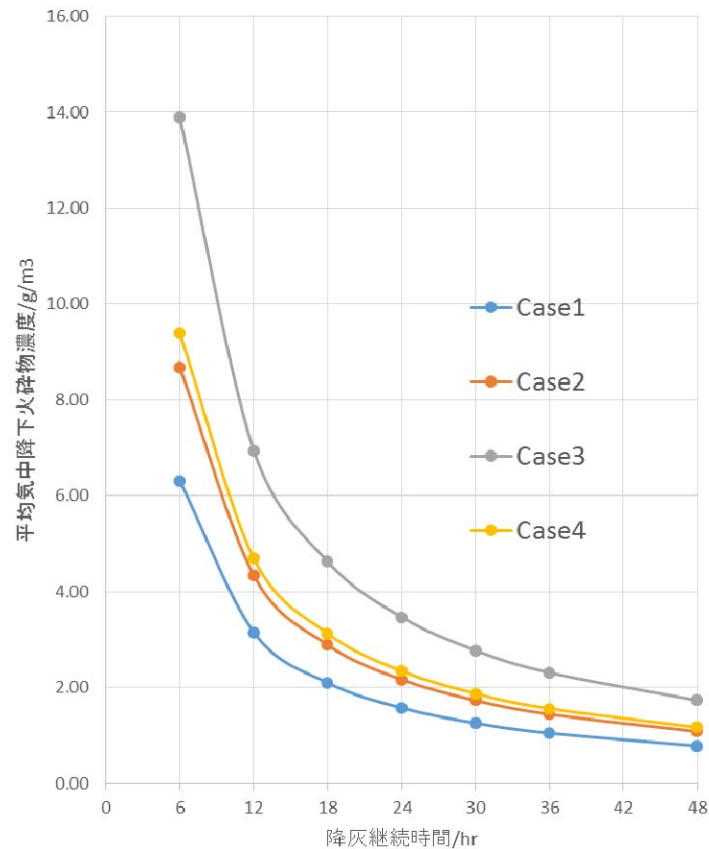
- ①得られる濃度は降灰中の平均濃度であり、ピーク濃度等の濃度の時間変化は計算できない。
- ②堆積している降下火砕物の粒径分布が得られるサイトはほとんどなく、仮定として設定することになる。
- ③敷地へ向かう一定風を仮定することは、降灰継続時間が短くなり、時間当たりの降灰量は多くなる。他方、風向による影響は降灰当時の風向きに依存する。

計算結果の一例

<計算例>

- 堆積量：15cm
- 粒径分布（以下の4つのCase）
Case1：0.070cm（100%）、Case2：0.050cm（100%）、Case3：0.025cm（100%）
Case4：0.070cm（25%）、0.050cm（50%）、0.025cm（25%）
- 終端速度：1.1m/s（0.070cm）、0.8m/s（0.050cm）、0.5m/s（0.025cm）

平均空中降下火砕物濃度と降灰継続時間の関係



※参考とした粒径分布

樽前山起源の火山噴出物（Ta-a）
火口から約100kmの地点（占冠付近）での中央粒径
（実測値）は、 $2\sim 3\phi$ （0.0250cm \sim 0.0125cm）

降灰継続時間を12～24時間と考えると、
降灰継続時間が12時間の場合の平均濃度は、 $3\sim 7\text{g/m}^3$
降灰継続時間が24時間の場合の平均濃度は、 $2\sim 4\text{g/m}^3$

②b降灰継続時間を仮定して堆積量(シミュレーション値)から推定する手法

②b 降灰継続時間を仮定して堆積量から推定する手法

数値シミュレーション（Tephra2：参考6参照）で求まる原子力発電所敷地での堆積量、堆積物の粒径分布を基に、降灰継続時間を仮定した上で降下火砕物濃度を算出する。

降灰継続時間については、同程度の噴火規模での噴火継続時間を参照して設定し、各粒径の終端速度は、実験的に求められた値を用いる。（参考3、4参照）

なお、降灰継続時間については、一定風を仮定するケースでは、噴出時間 \div 降灰継続時間（堆積量に支配的な主要な降灰）とみなすことが可能であり、同程度の噴火規模での噴火継続時間（参考5）を参照して設定する。

留意点

- ①シミュレーションの際に、多くのパラメータを入力しなければならないが、観測値等のデータが少なく、工学的判断により設定しなければいけない。
- ②得られる濃度は降灰中の平均濃度であり、ピーク濃度等の濃度の時間変化は計算できない。
- ③敷地へ向かう一定風を想定することは、降灰継続時間が短くなり、時間あたりの降灰量は多くなる。
- ④Tephra2により得られる原子力発電所敷地での粒径分布の不確かさがある。
- ⑤Tephra2では初期粒径分布の参考値（堆積状況が再現された事例）があるが、審査で考慮すべき火山噴火の初期粒径分布ではない。

③数値シミュレーションにより推定する手法

③数値シミュレーションにより推定する手法

3次元の大気拡散シミュレーションFALL3Dにより設定座標点で粒径ごとに降下火砕物濃度の時間変化を算出する。（参考6参照）

<FALL3Dで入力するパラメータ>

a 噴火継続時間

b 初期粒径（噴出物の全量における粒径分布）

- 粒径分布
- 粒径階級の数
- 粒径の平均と標準偏差（ ϕ ）
- 最大・最小粒径の ϕ 値
- 最小・最大密度(kg/m³)
- 最小・最大球形度

c 給源モデル → 4モデルから選択、モデルによって入力パラメータの選択が異なる（参考7）

噴出率

噴煙柱高度 係数A、係数 λ （SUZUKIモデル）

マグマの噴出速度(m/s)

マグマの噴出温度(K)

マグマの揮発成分(Wt%)

再浮遊可能な最大粒径(μ m)

再浮遊可能な堆積量(kg/m²)

再浮遊可能最大高度(m)

放出係数

摩擦速度の閾値

d 凝集モデル → 4モデルから選択、モデルによって入力パラメータの選択が異なる

凝集粒径(ϕ)

凝集密度

落下速度補正係数

凝集粒径の割合

フラクタル指数

③数値シミュレーションにより推定する手法(続き)

e エアロゾル輸送

エアロゾル輸送の有無

総噴出量に対するSO₂の割合(%)

f 重力流モデル

重力流モデルのon/off

体積流量の経験定数

重力流モデルの経験定数

重力流モデルの” re-entainment” 係数

ブラント・ヴァイサラ振動数

g 移流・拡散モデル → 4モデルから選択、モデルによって入力パラメータの選択が異なる

定数による垂直拡散モデル

onin-Obhkhov相似則に基づく垂直拡散

垂直方向の拡散係数(m²/s)

定数による水平拡散モデル

RAMSの水平拡散モデル

CMAQの水平拡散モデル

水平方向の拡散係数(m²/s)

RAMSモデルのCs値

降水量による湿性沈着モデル

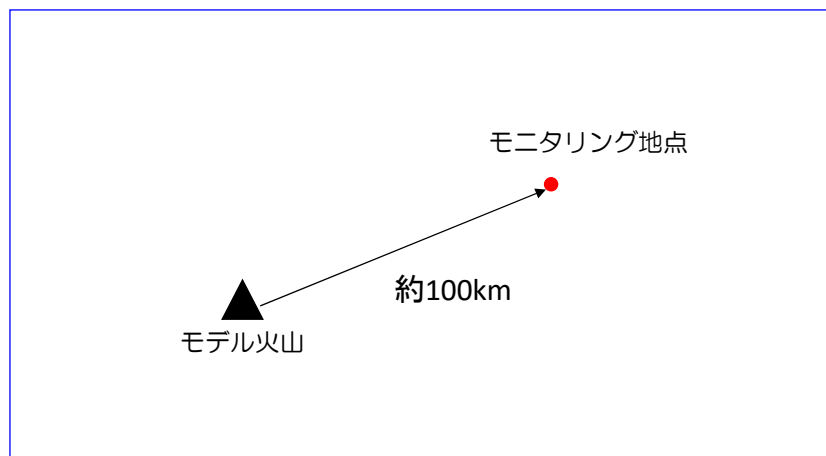
上記パラメータに加えて気象データ(風向、風速)があるが、②と同様に一定風を仮定することは可能である。

留意点

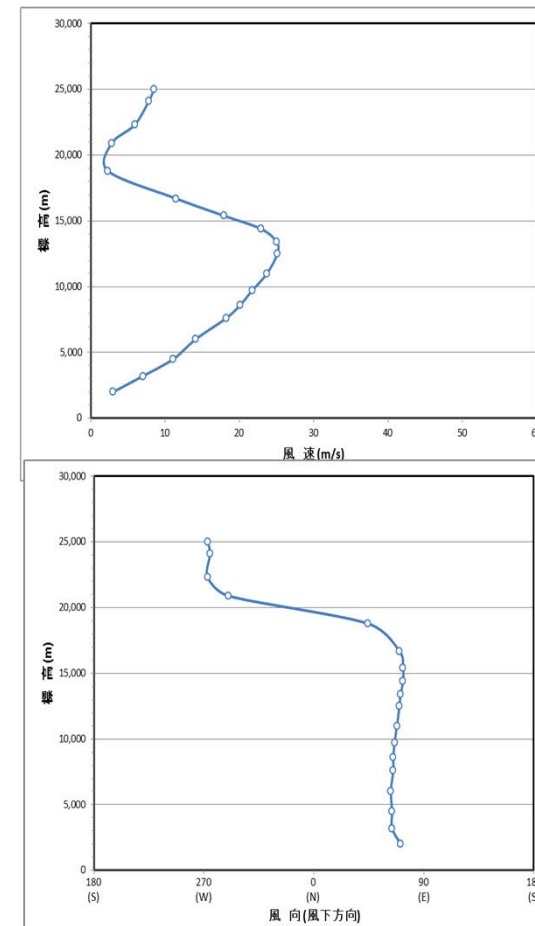
- ①シミュレーションの際に、多くのパラメータを入力しなければならないが、観測値等のデータが少なく、工学的判断により設定しなければいけない。
- ②計算結果に大きく影響すると考えられるパラメータとして、初期粒径、給源モデル、移流・拡散モデル等が挙げられる。
- ③初期粒径については、適正な入力値に関する情報がない(Tephra2では参考値が設定されている)
- ④計算結果として、任意の地点の堆積量、降灰継続時間、降灰濃度等が得られるが、現時点では堆積量(実測値)との検証は困難である。

③の手法を用いたモデル計算

- モデル計算の対象とする火山は、火山から100km程度の離れた地点で15cm程度の降灰を想定。
- モデル噴火として、VEI5クラスの噴火（噴出量：6.2km³）相当規模の降灰）を想定。
- モデル計算に用いる高度別の風速・風向は、モデル火山からモニタリング地点方向へ吹く右図の風を使用した。また、解析範囲内はすべて一定の風向・風速条件とした。



左図 モデル火山とモニタリング地点の位置関係



右図 風向・風速データ

③の手法を用いたモデル計算

＜モデル計算に用いるパラメータ設定の考え方＞

- 総噴出量 (M : kg)

⇒密度は1000 kg/m³とし、噴出体積 (6.2km³) を重量に変換し、6.2×10¹²kgとした。

- 噴煙柱高度 (H : km)

⇒VEI5クラスの噴煙柱高度 (25km< ; 下鶴ほか編,2008) を参考に25kmとした。

- 噴出率 (Q : kg/s)

⇒噴煙柱高度から噴出率が算出可能なMastinモデルを採用した。Mastinモデルでは噴煙柱高度 (H : km) と噴出率には (式1) に示す関係があるとしており、この式から、噴出率を求めた結果、8.8×10⁷kg/sとなる。

$$Q = \left(\frac{H}{0.304} \right)^{\left(\frac{1}{0.241} \right)} \quad (\text{式1})$$

- 噴火継続時間 (t : s)

⇒総噴出量 (M : kg) 及び噴出率 (Q : kg/s) は (式2) に示す関係が成立していることから、約19.5時間とした。

$$M=Q \times t \quad (\text{式2})$$

なお、噴煙柱高度25kmの場合、噴出率は10⁷~10⁹kg/s程度の幅が見込まれる (図参照) ことから、噴火継続時間を約3~48時間とした。

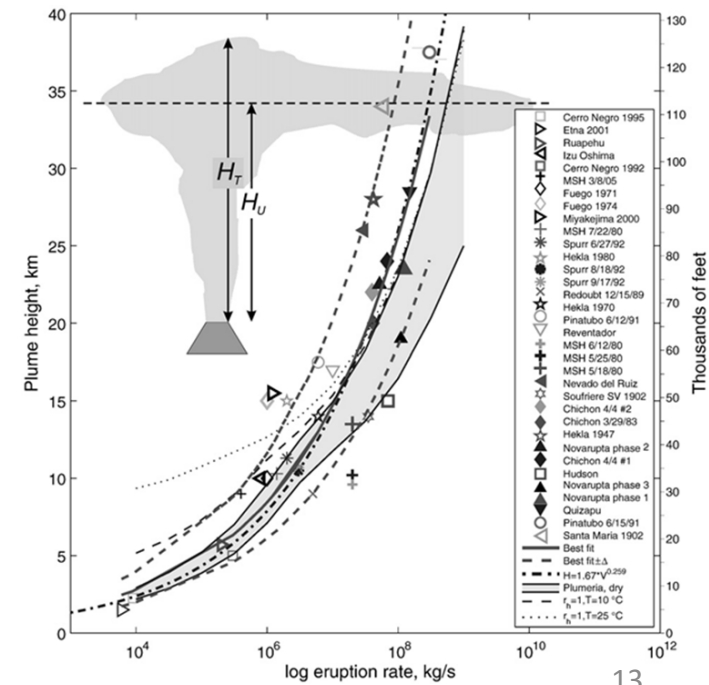


図 噴煙柱高度と噴出率の関係 (Mastinほか2009)

- 粒径分布

⇒Tephra2においてVEI5クラスの噴火の参照値として掲載されている値（セントヘレンズ1980年噴火；中央粒径：4.5φ、標準偏差：3.0φ）とした。Fall3Dでは粒径階級が最大20区分であるので、最大及び最小粒径をそれぞれ9φ、10φとした。最大密度は岩片の一般値から2500kg/m³、最小密度は軽石の一般値から1000kg/m³とした。

- 給源モデル

⇒噴煙柱からの粒子離脱量が考慮されるSUZUKIモデルを採用し、係数はFall3D初期値を採用した。

- 凝集モデル、エアロゾル輸送、重力流モデル

⇒参照できる具体値が少なく、今回のモデル計算ではTephra2の条件と近似するためOFFとした。

- 終端速度モデル（Vs：m/s）

⇒ARSTOOPURモデルを採用した。

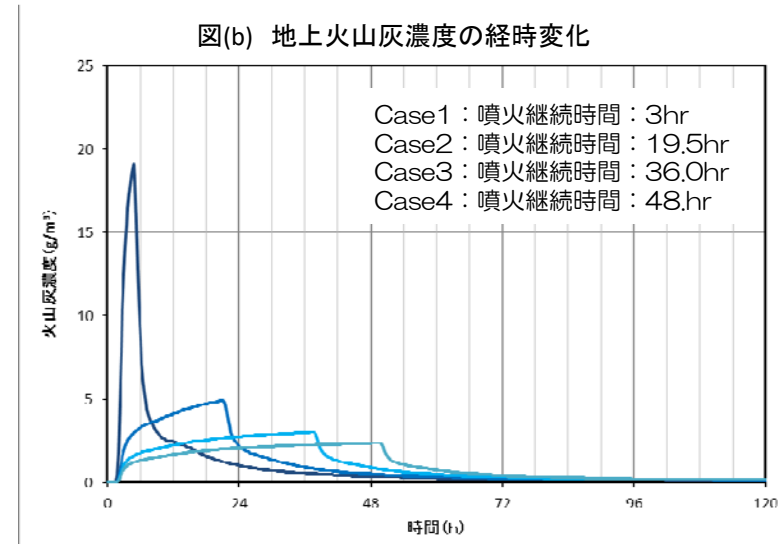
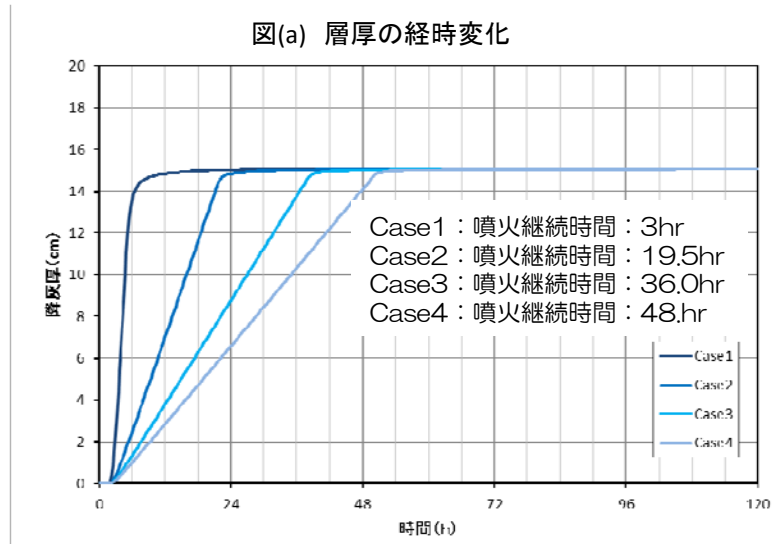
$$V_s = \sqrt{(4g * (\rho_p - \rho_a) * d) / (3Cd * \rho_a)} \quad g: \text{重力加速度、} \rho_a: \text{大気密度、} \rho_p: \text{粒子密度、} d: \text{粒子径}$$

$$\text{※} Re > 988.947 \text{ の場合、} Cd = 0.44, \quad Re \leq 988.947 \text{ の場合、} Cd = \frac{24}{Re} * (1 + 0.15Re^{0.687})$$

- 拡散係数

⇒水平方向拡散係数はFolch（2009）でのFall3Dを用いたエトナ1998年噴火での再現結果を参考に5000m²/s、鉛直方向については考慮せず0m²/sとした。

③の手法を用いたモデル計算



<計算結果>

- 噴火継続時間と降灰時間は同等。
- 噴火継続時間が長くなるほど、降灰継続時間は長くなり、最大濃度も希薄になる。
- 最大濃度以降は急速に濃度が低下し、その後、緩やかに濃度は減少する。ただし、気中濃度は長時間低下しない（細粒の遅延降下）。
- いずれの条件においても、気中濃度は1~2日程度数 g/m^3 が継続する。

計算に用いた入力値と実現象で考慮すべき点の比較

第1回会合
資料3追記

	入力値	実現象としては…	入力値の保守性
風向・風速	モニタリング地点へ向かう一定風	一定ではない	軸上が最も保守的*
噴出量	6.2km ³ と仮定	正確な噴出量の予測は困難	サイトにおける過去の最大噴出量
噴煙柱高度	25kmと仮定	条件等で幅がある	—
噴火継続時間 (※噴出率にも相当)	3、19.5、36、48時間の4ケースを仮定	噴火条件等である程度の幅がある	高濃度が短時間継続するケース or 低濃度が長時間継続するケース
粒径分布	中央粒径4.5φ 標準偏差3φと仮定	どのような粒径分布になるか不明	—
密度	岩片2500kg/m ³ 軽石1000kg/m ³ と仮定	どのような密度になるか不明	一般的な岩片・軽石の密度の範囲内の値である
拡散係数	水平方向拡散係数 5000m ² /sと仮定	—	—
各種モデルの選択	適宜選択	—	すべてのモデルを組み合わせて計算

* 今回のモデル計算では、気中濃度は軸から1/16変化（例：東北東→東）すると約1/10になる。

1. 現在得られている科学的知見では、①～③の手法はいずれも大きな不確実さを含んでいる。
2. 手法①では、観測値に不確実さがあり用いることは難しい。
3. 手法②aの適用は、敷地又はその周辺で火山灰の堆積が確認できる場所に限られる。
4. 手法②b及び手法③では、多くの入力パラメータを設定しなければならないが、設定の根拠となる実測データが少ない。
5. 比較的多くの実測データが得られる他の自然現象とは異なり、気中降下火砕物濃度の設計基準を設定することは困難である。現時点では、VEI5規模*の噴火による降下火砕物濃度の観測値が十分に得られていないことから、手法②～③による推定値を考慮し、フィルタ交換等による機能維持を評価するための気中降下火砕物濃度及び継続時間を、総合的、工学的判断により設定する。

*：VEIは火山爆発指数（Volcanic Explosivity Index）の略。

VEI5は噴出量1～10km³オーダーの噴火を指す。

参考1(フィルタ交換頻度の目安)

2. 閉塞までに要する時間について

吸気フィルタの閉塞時間は、以下の条件に基づいて試算した結果、約 24 時間である。

①ディーゼル発電機 吸気フィルタ灰捕集容量 (g/ m ²)	1,000
②ディーゼル発電機 吸気フィルタ表面積 (m ²)	3.66
③ディーゼル発電機 吸気フィルタでのダスト捕集量 (g) =①×②	3,660
④降下火砕物の大気中濃度 (μg/m ³)	3,241
⑤ディーゼル発電機吸気流量 (m ³ /h)	45,533
⑥閉塞までの時間 (h) =③/④/⑤×10 ⁶	24.8

なお、噴火口からの観測地点の距離が 135km であるセントヘレンズ火山噴火の観測データ（観測濃度 33,400 μg/m³。測定高さレベルは不明。）を用いて試算した場合、「2. 閉塞までに要する時間について」に記載の表中④降下火砕物の大気中濃度 (μg/m³) が「33,400」となり、ディーゼル発電機吸気消音器のフィルタで閉塞するまで約 2.4 時間となるが、フィルタを交換することが可能である。

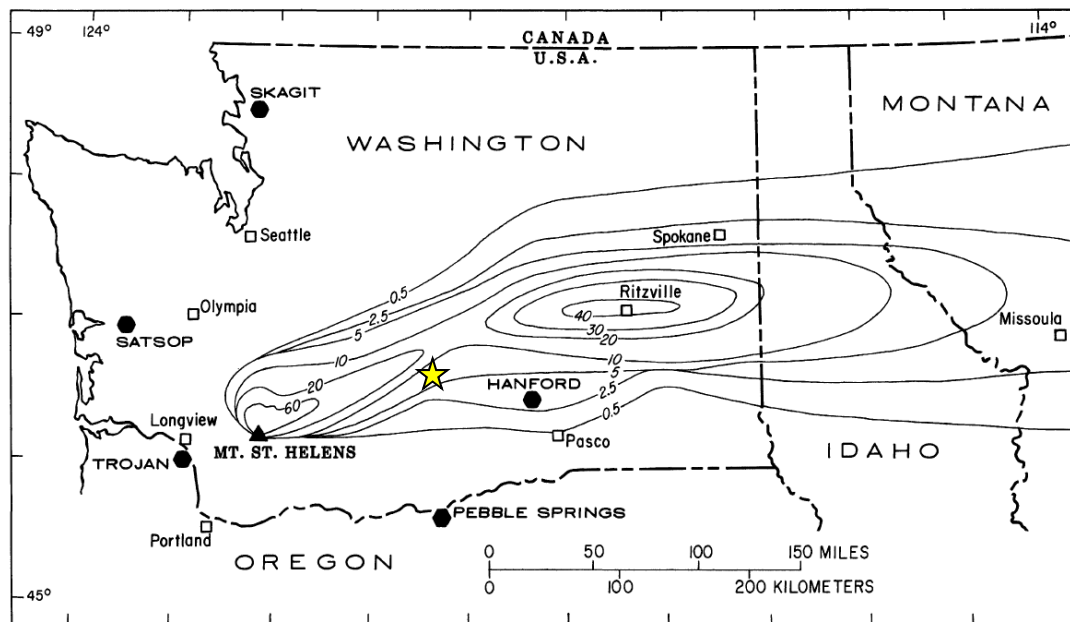
(玄海発電所審査資料から抜粋)

参考2(セントヘレンズ噴火(1980年)における火山灰濃度)

火山灰濃度観測の実例として「Mount St. Helens eruption: The acute respiratory effects of volcanic ash in a north American community」が1983年にArchives of Environmental Healthに公表された。

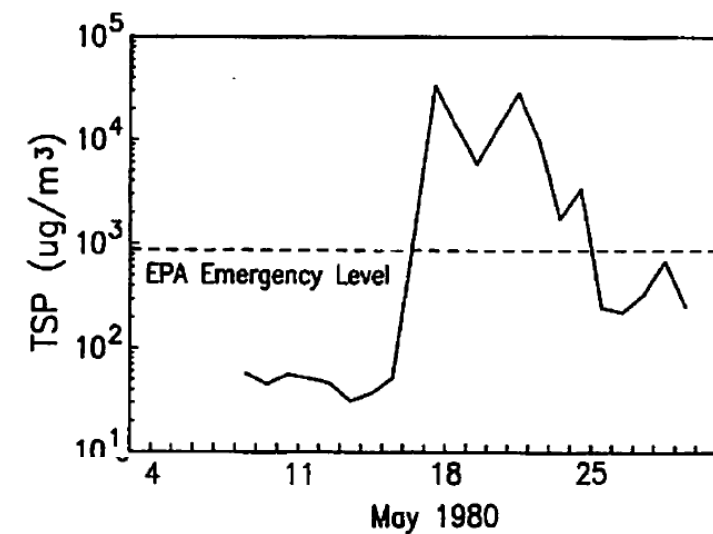
セントヘレンズ山から約135km離れたYakima地点において、

- 降灰量約0.8cm。90%以上の粒子が $10\mu\text{m}$ 以下。(ともに実測値)
- 5/18 AM9:45降灰開始。約8時間継続。この間の平均TSP(Total suspended Particles)レベルが $33.402\text{mg}/\text{m}^3$ 。ただし、採取器がこのような高濃度に対応できる設計ではなかったため、実際はより高い濃度であった可能性も否定できない。
- 翌日からTSPレベルは減少、 $13.609\text{mg}/\text{m}^3$ (5/19)、 $5.863\text{mg}/\text{m}^3$ (5/20)。
- 風の影響で再びTSPレベルが増加、 $13.273\text{mg}/\text{m}^3$ (5/21)、 $28.465\text{mg}/\text{m}^3$ (5/22)。



1980年5月18日噴火の降灰分布図 (☆Yakima地点、135km) 単位はmm

(Shinpley and Sarna-Wojcicki, 1983)



Yakima地点での総浮遊粒子量の時間変化

(Baxter et al., 1983)

参考3(終端速度と堆積量からの大気中平均濃度の算出)

<計算式>

原子力発電所敷地に堆積した火山灰重量、火山灰の粒径から推定する終端速度、及び降灰時間を仮定して、大気中平均濃度の算出する式を以下に示す。

$$C(g/m^3) = \frac{V(g * s^{-1} * m^{-2})}{r(m * s^{-2})} = \frac{Wt * t^{-1}}{r}$$

C : 大気中火山灰濃度 (g/m^3)

V : 単位表面積当たりの火山灰堆積速度 (g/s)

Wt : 単位表面積当たりの火山灰堆積量 (g/m^2)

r : 火山灰の終端速度 (m/s)

t : 降灰時間 (s)

降灰時間(hr)	Case1(r=1.1m/s)	Case2(r=0.8m/s)	Case3(r=0.5m/s)	Case4(Mixed)
6	6.31	8.68	13.89	9.39
12	3.16	4.34	6.94	4.70
18	2.10	2.89	4.63	3.13
24	1.58	2.17	3.47	2.35
30	1.26	1.74	2.79	1.88
36	1.05	1.45	2.31	1.57
48	0.79	1.09	1.74	1.17

参考4(降下火砕物の粒径と終端速度の関係)

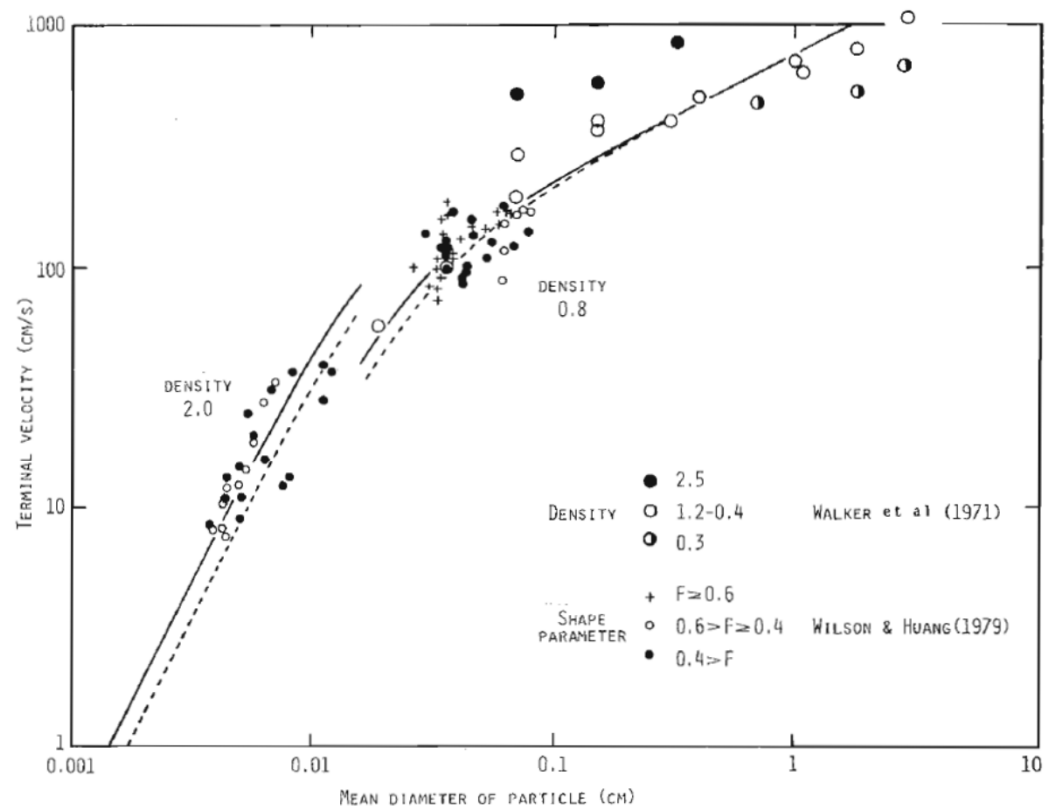


Fig. 3. Terminal fall velocity of volcanic particles vs. mean diameter of the particle at sea-level. Dotted curves; Eq. (4), solid curves; Eq. (4)'. All experimental data are from WALKER *et al.* (1971) and WILSON and HUANG (1979).

※各プロットは実際の火砕物粒子を用いて室内実験を行った際の実測値

Suzuki "Theoretical model for dispersion of tephra" *Arc volcanism*, (1983) 95-113

参考5 (過去のプリニー式噴火における噴火パラメータ)

Table 1. Eruptive Parameters of Late Quaternary to Recent Plinian Eruptions

Eruption	Country	Date	Composition	Col. Ht.	MDR (kg/s)	DRE (km ²)	Plin. Mass (kg)	Time (h)	PF+S (DRE)	PF+S Mass	Total Mass	Reference
Toluca (lower)	Mexico	24 500 YBP	And./Dac.	28	7.90E+07	0.4	9.0E+11	3.2	N.R.	N.R.	9.0E+11	Bloomfield et al. (1977)
Toluca (upper)	Mexico	11 600 YBP	And./Dac.	30	1.00E+08	3.6	9.0E+12	25.0	N.R.	N.R.	9.0E+12	Bloomfield et al. (1977)
La Primavera B	Mexico	95 000 YBP	Rhyolite	36	2.20E+08	16.0	4.0E+13	50.5	18.50	4.63E+13	8.6E+13	Walker et al. (1981) Wright (1981)
La Primavera D	Mexico	<95 000 YBP	Rhyolite	26	7.90E+07	0.6	1.6E+12	5.6	N.R.	N.R.	1.6E+12	Walker et al. (1981) Wright (1981)
La Primavera E	Mexico	<95 000 YBP	Rhyolite	24	6.30E+07	0.8	2.1E+12	9.1	N.R.	N.R.	2.1E+12	Walker et al. (1981) Wright (1981)
La Primavera J	Mexico	<95 000 YBP	Rhyolite	33	1.80E+08	3.8	9.5E+12	14.7	N.R.	N.R.	9.5E+12	Walker et al. (1981) Wright (1981)
El Chichon A	Mexico	1982	Trachyand.	27	8.00E+07	0.3	7.5E+11	2.6	N.R.	N.R.	7.5E+11	Carey and Sigurdsson (1986)
El Chichon B	Mexico	1982	Trachyand.	32	1.50E+08	0.4	9.8E+11	1.8	0.13	3.2E+11	1.3E+12	Carey and Sigurdsson (1986)
El Chichon C	Mexico	1982	Trachyand.	29	8.50E+07	0.4	1.0E+12	3.3	N.R.	N.R.	1.0E+12	Carey and Sigurdsson (1986)
Santa Maria	Guatemala	1902	Dacite	34	1.70E+08	8.6	2.2E+13	35.1	N.R.	N.R.	2.2E+13	Williams and Self (1983)
Los Chocoyos	Guatemala	85 000 YBP	Rhyodacite	45	5.00E+08	150.0	3.8E+14	208.3	120.00	3.00E+14	6.8E+14	Rose et al. (1987)
Apoyo A	Nicaragua	23 000 YBP	Dacite	27	8.30E+07	2.8	7.0E+12	23.4	3.30	8.25E+12	1.5E+13	Sussman (1985)
Apoyo C	Nicaragua	<23 000 YBP	Dacite	29	8.70E+07	2.5	6.3E+12	20.0	N.R.	N.R.	6.3E+12	Sussman (1985)
Nevado del Ruiz	Colombia	1985	And./Dac.	27	5.00E+07	<0.1	3.5E+10	0.2	0.004	1.00E+10	4.5E+10	Naranjo et al. (1986)
Pelee P1	Martinique	650 YBP	Rhyodacite	21	3.20E+07	0.1	2.0E+11	1.7	0.080	2.00E+11	4.0E+11	Traineau and Westercamp (1985)
Pelee P2	Martinique	1670 YBP	Rhyodacite	20	3.10E+07	0.1	2.0E+11	1.8	0.080	2.00E+11	4.0E+11	Traineau and Westercamp (1985)
Pelee P2	Martinique	2010 YBP	Rhyodacite	22	3.20E+07	0.1	2.0E+11	1.7	0.080	2.00E+11	4.0E+11	Traineau and Westercamp (1985)
Mount St. Helens	United States	1980	Dacite	19	1.90E+07	0.3	6.3E+11	9.1	0.03	8.88E+10	7.1E+11	Carey and Sigurdsson (1985)
Katmai	United States	1912	Rhy./Dac.	32	1.70E+08	3.5	8.8E+12	14.4	6.50	1.63E+13	2.5E+13	Fierstein and Hildreth (1986)
Askja	Iceland	1875	Rhyolite	26	7.90E+07	0.3	8.0E+11	2.8	0.03	8.88E+10	8.9E+11	Sparks et al. (1981)
Fogo	Azores	1563	Trachyte	19	1.90E+07	0.4	1.1E+12	15.4	N.R.	N.R.	1.1E+12	Walker and Croasdale (1973)
Fogo A	Azores	4600 YBP	Trachyte	30	1.00E+08	1.7	4.3E+12	12.0	N.R.	N.R.	4.3E+12	Walker and Croasdale (1973)
Vesuvius	Italy	A.D. 79	Phonolite	32	1.50E+08	2.1	5.1E+12	9.5	0.37	9.25E+11	6.1E+12	Sigurdsson et al. (1985)
Avellino	Italy	3 500 YBP	Phonolite	30	1.00E+08	0.7	1.7E+12	4.7	N.R.	N.R.	2.0E+12	Pescatore et al. (1987)
Campanian Tuff	Italy	36 000 YBP	Trachyte	44	3.20E+08	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	2.7E+14	Sigurdsson and Carey (unpublished) Cornell et al. (1983)

Carey, et. al "Intensity of plinian eruptions" Bull Volcanol vol. 51, 28-40 1989)

参考6 (Tephra2とFALL3Dの比較)

	FALL3D (INGV(イタリア),BSC(スペイン))	Tephra2 (USF(アメリカ))
概要	完全数値シミュレーションモデルで、降下火砕物の運動過程を非定常三次元で表現することができる。堆積物の分布だけでなく、粒子濃度等も計算できる。	単純化された移流拡散モデルで、適当な初期パラメータを与えることにより堆積物の分布を簡便に計算できる。
適応範囲	100～1000kmオーダー	100kmオーダー
初期給源モデルパラメータ	4モデルから選択	1モデルのみ
移流	3次元風	2次元一定風
拡散	勾配拡散型物理モデル	ガウシアンパフモデル
降灰に係る設定	4モデルから選択	1モデルのみ
粒子密度	任意の数値	任意の数値
粒形	任意の数値	固定(球状)
乾燥環境での堆積	○	○
湿潤環境での堆積	○	—
粒子の凝集効果	○	—
粒子の再移動	○	—

(新堀、2016より抜粋)