

## 発電用原子炉施設に対する降下火砕物の影響評価に関する検討結果 及び今後の予定について

平成29年7月19日  
原子力規制庁

### 1. 検討の経緯

平成28年10月5日の第35回原子力規制委員会において、降下火砕物に関して、今後も最新知見の収集・分析や研究を進めて規制活動に反映すべきか否かを判断する必要がある旨の指摘があった。また、原子力規制庁は、同年11月16日の第43回原子力規制委員会において、1980年のセントヘレンズ山噴火で得られた観測データを用いた発電所への影響について、事業者による評価の結果を報告した。さらに、各事業者に対し、電力中央研究所が公表した研究報告を踏まえ、各発電所敷地において想定される最大の気中降下火砕物濃度の程度について報告を求めるとともに、当該研究報告等の分析及び降下火砕物の影響評価に関する研究を行い、これらの規制基準等への反映に関して検討を開始した。

これらの対応を踏まえ、平成29年1月25日の第57回原子力規制委員会及び同年2月15日の第61回原子力規制委員会において、降下火砕物の影響評価に関する検討チーム（以下「検討チーム」という。）を設置することが了承された。検討チームにおいては、噴火の規模、継続時間等の設定及びその不確かさに関して検討を行うとともに、想定される噴火による降下火砕物に関し、堆積量等から算出する方法とシミュレーションによって算出する手法とを組み合わせることで発電所敷地における気中濃度を評価する際の考え方及び施設への影響評価について検討することとされた。

### 2. 検討チームの取りまとめ

検討チームは、公開の会合において、降下火砕物に関する外部専門家、電力中央研究所の研究者及び事業者から意見を聴取し、議論を行った。

会合での議論を踏まえ、VEI 5～6規模（噴出量で1～100 km<sup>3</sup>未満）の噴火による降下火砕物の気中濃度によって共通要因故障が発生する可能性があることから、設計あるいはその後の運用で対策が採られていることを確認するため、「機能維持評価用参考濃度」の考え方やこれに基づく規制上の要求に関して、添付1のとおり「気中降下火砕物濃度等の設定、規制上の位置付け及び要求に関する基本的考え方」を取りまとめた。

### 3. 今後の予定

添付1を基に、必要に応じて事業者に対し意見を聴取した上で、具体的な規則等の案を策定し、原子力規制委員会に諮ることとしたい。

## 気中降下火砕物濃度等の設定、規制上の位置付け及び要求 に関する基本的考え方

平成29年7月19日  
降下火砕物の影響評価に関する検討チーム

降下火砕物の影響評価に関する検討チームは、気中降下火砕物濃度等の設定方法、当該濃度等の規制上の位置付け、当該濃度等による発電用原子炉施設への影響を防止するための規制要求について検討を行い、基本的考え方を以下のとおり取りまとめた。検討に際しては、公開の会合を開くとともに、外部専門家及び事業者から意見を聴取した。

### (1) 自然現象に関して想定する基準（ハザード・レベル）の設定の考え方

自然現象に関して想定する基準（以下「ハザード・レベル」という。）の設定には、主として、既往最大又は理論的評価に基づく考え方を採用している。

#### (a) 既往最大に基づくハザード・レベルの設定

「実測値」や「歴史的痕跡+推測」から既往最大を決定し、不確かさを考慮して設定。ただし、既往最大を超えるものの発生が否定できず、既往最大がハザード・レベルとして適切でない場合がある。

#### (b) 理論的評価に基づくハザード・レベルの設定

モデルから得られた解析値から、不確かさを考慮して設定。ただし、モデルが確立していない場合や入力パラメータの設定根拠が確立できない場合はハザード・レベルが設定できない。

### (2) 審査における気中降下火砕物の取扱い

新規規制基準への適合性審査（設置許可審査）において、外気取入口に設置されているフィルタは、気中降下火砕物が侵入し難い構造とすることを確認している。

また、上記(a)の考え方により、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を設定し、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。ただし、国内原子力発電所での観測値はもとより国内での観測値もほとんどないため、海外での数少ない観測値（アイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山の噴火（2010年）、米国セントヘレンズ火山の噴火（1980年）の観測値）を用いている。事業者は、これらの気中降下火砕物濃度において全量が外気取入口からフィルタに侵入し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。

### (3) 気中降下火砕物濃度の評価のためのモデルの現状

電力中央研究所がモデルにより気中降下火砕物濃度の評価を行ったこともあり、上記(b)の考え方が適用可能か検討を行った。

現在得られている科学的知見では、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、及び③数値シミュレーションにより推定する手法は、いずれも大きな不確実さを含んでいる。

現時点では、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、降下火砕物濃度の観測値が十分に得られていない。そのため、モデルが十分に検証されておらず、モデルの入力パラメータの設定根拠も少ないことから、上記(b)の考え方によりハザード・レベルを設定することは困難である。(別紙1参照)

#### (4) 総合的、工学的判断によるハザード・レベルの設定

上記(b)の考え方によるハザード・レベルの設定が困難であっても、運用期間中の活動が否定できない火山の噴火による降下火砕物の襲来により安全施設の安全機能を喪失する可能性があるため、設計あるいはその後の運用により、安全施設の機能維持を確認すべきである。

その際、大きな不確実さを含んでいるものの、手法②又は手法③による推定値を考慮し、フィルタ交換等による安全施設の機能維持が可能かどうかの評価に用いる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こととした。これを「機能維持評価用参考濃度(以下「参考濃度」という。)」と呼ぶ。

注) 設計基準と機能維持評価用基準

設計において考慮する基準を「設計基準」、設計及び運用等による安全施設の機能維持が可能かどうかを評価するための基準を「機能維持評価用基準」とする。また、機能維持評価用基準を、総合的、工学的判断により設定したものが「機能維持評価用参考濃度」である。

#### (5) 規制上の要求

現行制度は、地震・津波等は、発生時に復旧が困難な損傷等の共通要因故障を複数設備に同時に引き起こす可能性があることから、あらかじめ、施設・設備等の設計において、設計基準事故対処設備には耐震性等を有すること、重大事故防止設備には設計基準事故対処設備等との可能な限りの多様性を考慮することを要求している。

今回検討している気中降下火砕物に関し、安全施設は、ダンパー(空気流量制御弁)閉止等により一時的に停止すれば損傷等は考え難いこと、数時間～数日後に降灰が収まれば、安全機能を復旧できることから、必ずしも降灰開始と同時に損傷等を引き起こすとは限らない。

したがって、気中降下火砕物に対しては、施設・設備面での対応だけでなく、運用面での対応も含めて全体として対応することが可能であり、降下火砕物の特性を踏まえた要求とすべきである。

また、降下火砕物対策としては、原子炉の運転を停止<sup>\*1</sup>し、安定な状態への移行及びその状態の維持に必要な安全施設の機能を維持することが必要

\*1 運転の停止に係る判断の基準の考え方については、今後検討する。

である。

以下イ) からハ) までにおいて交流動力電源設備に係る要求を、ニ) においてその他の設備に係る要求を示す。

#### イ)非常用交流動力電源設備（設計基準事故対処設備）の機能維持

参考濃度に対して、適切な設計及び運用等により、原子炉を停止した後の安定な状態に移行し維持させるために必要な非常用交流動力電源設備の機能維持を求める。

参考濃度は、手法②により降灰継続時間を 24 時間と仮定した平均濃度、又は手法③<sup>\*2</sup>により噴火継続時間を 24 時間とした場合の最大濃度とする<sup>\*3</sup>。この参考濃度において、非常用交流動力電源設備に対し、24 時間 2 系統の機能維持を求める。

なお、既往最大に基づく気中降下火砕物濃度は、参考情報として把握することを求める。

（理由）

広域に降下火砕物をもたらす火山噴火は比較的規模が大きい噴火の頻度が少ないため、噴火継続時間が観測された事例は少ない。このため、過去のプリニー式噴火における噴火パラメータをとりまとめた文献（Carey and Sigurdsson、1989）を参考に、VEI 5～6 の規模の噴火継続時間の平均値を求めると約 24 時間となる。また、火口から敷地への一定風を仮定すると噴火の継続時間と降灰時間はほぼ同一となることから、参考濃度の推定に用いる降灰継続時間及び噴火継続時間を 24 時間とした。

手法②で得られる平均濃度は、24 時間以降も引き続き降灰した場合の降灰量も合算されているので保守的な高い濃度となる。また、24 時間以降の降灰も合算されているので、降灰継続時間が 24 時間以上となった場合（濃度は下がり、総量は同じ）でも対応ができる。

手法③で得られるピーク濃度は、最大濃度を持続することを仮定しており、保守的な濃度となる。

なお、仮に、降灰継続時間が短くなった場合には、参考濃度を一時的に上回る事となるが、1 系統の機能維持であれば約 2 倍の濃度に対応できること、後述の全交流動力電源喪失等対策が控えていることから、炉心損傷を防止できる。

既往最大に基づく気中降下火砕物濃度は、これを大幅に上回る参考濃度を用いて非常用交流動力電源設備の機能維持の確認を行うことから不要であるが、今後新たな観測値が得られる可能性もあることから、参考情報として把握することを求める。

#### ロ)代替電源設備（重大事故等対処設備）の機能維持

\*2 手法③では、パラメータ設定において妥当性の確認が必要

\*3 手法②及び手法③において計算に用いる粒径分布（終端速度）は可能な限り実測値を使用する。

参考濃度に対して、適切な設計及び運用等により、非常用交流動力電源設備 2 系統が偶発的に多重故障を起こした場合をあえて想定し、必要な代替電源設備等の機能維持を求める。参考濃度及び降灰継続時間は、上記イ)と同じとする。

なお、参考濃度に対しては、2 系統の非常用交流動力電源設備の必要な機能維持が可能であることを要求しており、これらが同時に故障することは考え難い。それに加えて、待機している非常用交流動力電源設備をダンパー（空気流量制御弁）閉止等により停止しておけば、気中降下火砕物を共通要因として、複数が同時に故障することは一層考え難い。

注) 特定重大事故等対処施設の機能維持

特定重大事故等対処施設についても、設計基準事故対処設備同様に、参考濃度に対して必要な機能維持を求める。

ハ) 全交流動力電源喪失等への対策

参考濃度には大きな保守性を持たせていること、1 系統であれば参考濃度の約 2 倍の濃度までは非常用交流動力電源設備の機能維持が見込まれること、及び代替電源設備に気中降下火砕物対策を求めることから、フィルタ閉塞による「全交流動力電源喪失」は極めて考え難い。しかしながら、深層防護の考え方から、フィルタ閉塞等を起因とする「全交流動力電源喪失」を想定し、炉心損傷の防止を求める。この際、降灰継続時間を 24 時間としたこと踏まえ、フィルタ閉塞時間は 24 時間とするとともに、作業環境の悪化を想定する。

(理由)

気中降下火砕物濃度が参考濃度を上回るのは、降灰継続時間が 24 時間より短くなる場合である。参考濃度の約 2 倍の濃度（非常用交流動力電源設備の 1 系統の機能維持となる）となるのは、降灰継続時間が約 12 時間の場合であり、機能喪失は約 12 時間より短くなるが、保守的に、フィルタ閉塞時間は 24 時間とする。

上記については、別紙 2 に示す気中降下火砕物に対する規制上の考え方（案）において、その概略を示す。

ニ) 評価を要するその他の設備

参考濃度においては、交流動力電源設備以外の安全施設についても同様に適切な設計及び運用等により、水源（海水ポンプ、取水設備などを含む）、通信連絡設備（無線、有線）等の機能維持、降灰時のアクセスルート確保を求める。

## 気中降下火砕物濃度の推定手法

### I. 気中降下火砕物濃度の推定手法

国内はもとより海外においても、降灰中の降下火砕物を直接観測した事例は少なく、気中降下火砕物の濃度、粒径分布等のデータは少ない。そこで、現在の科学的知見から考えられる気中降下火砕物濃度の推定手法について検討した結果、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

上記の手法について、具体的な推定手法とその留意点を以下に述べる。

#### ①観測値の外挿により推定する手法

本手法は、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である。この際、観測値として堆積量と気中降下火砕物濃度が相対関係にあると仮定し、評価対象となる原子力発電所敷地での降下火砕物の堆積量を基に気中降下火砕物濃度を外挿する単純な比例計算で求める。

本手法を適用する際の留意点として、対象とする原子力発電所と想定する火山との距離や方位等の位置関係が実際とは異なること、評価対象とする噴火の規模や様式が一致しない場合もあることが挙げられる。

なお、現在得られている観測値は不確実さが大きいことが分かっている。

計算例として、1980年5月18日のセントヘレンズ火山噴火における観測値と噴火の概要を参考1に、その観測値を用いた推定計算の例を参考2に示す。

#### ②降灰継続時間を仮定して堆積量から推定する手法

##### a. 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

本手法は、原子力発電所敷地又はその周辺で観測された降下火砕物の堆積量と堆積している降下火砕物の粒径分布から推定する。降下火砕物の落下速度（終端速度）は、降下火砕物の粒径に依存し、実験的に求められている（参考3）。そこで、敷地での降灰継続時間を仮定することにより、堆積した降下火砕物の堆積速度を求めることができ、粒径ごとに堆積速度を終端速度で除することで気中降下火砕物濃度を求めることができる。

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する。この際、評価対象火山から敷地に向かう一定風を仮定するケース

では、噴火継続時間 $\div$ 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 4）を参照することができる。

本手法の留意点としては、堆積している降下火砕物の全粒径が降灰中に均一に落下すると仮定しており、落下速度の遅い（粒径が小さい）降下火砕物と落下速度の速い（粒径が大きい）降下火砕物が同時刻に降灰するとしているため、算出される数値は粒径毎の気中降下火砕物濃度の総和となる。また、評価対象となる降下火砕物が経年変化することにより初生時の粒径分布を保持していない可能性があること、敷地及びその周辺で降下火砕物が得られるサイトが少ないことが挙げられる。さらには、噴火継続時間 $\div$ 降灰継続時間と仮定することで、最も短時間で同量の降灰を完了することとなり、単位時間当たりの降灰量は多く見積もられる。

計算例として、敷地に堆積した降下火砕物の層厚が 15 cm のケース（降下火砕物の密度を  $1 \text{ g/cm}^3$  とすると、重量は  $150 \text{ kg/m}^2$ ）で、降灰継続時間を 6～48 時間とした場合での気中降下火砕物濃度の計算結果を参考 5 に、終端速度と堆積量からの気中の平均濃度を算出する式を参考 6 に示す。

なお、計算に用いた降下火砕物の粒径は、樽前火山起源の降下火砕物 (Tara) の火口から約 100 km の地点（北海道占冠村付近）での中央粒径の実測値  $2\sim 3 \phi$  ( $0.0250 \text{ cm}\sim 0.0125 \text{ cm}$ ) を参考にした。

#### b. シミュレーションにより得られた堆積量から推定する手法

本手法は、前述の a. 法と同じであるが、気中降下火砕物濃度の推定に必要な降下火砕物の堆積量と粒径分布を数値シミュレーション (Tephra2) により求めた値を用い推定する。

本手法の留意点としては、a. 法における留意点に加えて、数値シミュレーションで設定するパラメータに不確かさがある。

### ③数値シミュレーションにより推定する手法

本手法は、3次元の大気拡散シミュレーション (FALL3D (イタリアで開発されたシミュレーションコード) 等) 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。シミュレーションでは、多くのパラメータを入力する必要があるが、観測値等のデータが少なく、工学的判断によりパラメータを設定したうえで推定する。

本手法の留意点としては、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・拡散モデル等があり、これらを設定するための定量的な根拠に乏しいこと、過去の噴火における気象データが不明な

ことから、シミュレーション結果を検証することが困難であることが挙げられる。

計算例として、FALL3D を用いた気中降下火砕物濃度のモデル計算結果を参考 7 に示す。モデル計算では、敷地を想定した地点において 100 km 程度離れた火山からの 15 cm 程度の降灰を想定した。また、噴火規模は、VEI 5 クラスの噴火（噴出量：6.2km<sup>3</sup>）相当規模の降灰、高度別の風速・風速は、給源から想定した地点方向へ吹く一定風（解析範囲内はすべて一定の風向・風速条件）とした。（参考 8）。モデル計算に用いるパラメータ設定の考え方を参考 9 に、計算に用いた入力値と実現象で考慮すべき点をまとめた比較表を参考 10 に示す。

## II. まとめ

上記 I の①～③の気中降下火砕物濃度推定手法について、不確実さの観点でまとめると以下のようになる。

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、現在得られている観測値には不確実さがあり用いることは難しい。
3. 手法② a の適用は、敷地又はその周辺で降下火砕物の堆積が確認でき、かつ堆積している降下火砕物の適切な粒径分布測定が可能な場合に限られる。
4. 手法② b 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。

## III. 参考濃度の設定

降下火砕物に関しては、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、得られているデータが少ないことから、気中降下火砕物濃度を設定することは困難である。現時点では、VEI 5～6 規模\*の噴火による気中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又は手法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。

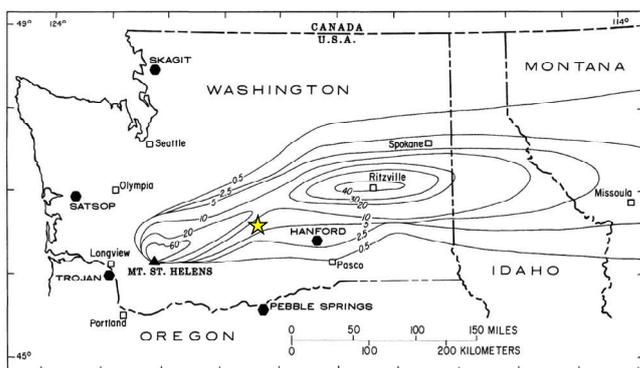
\*：VEI は火山爆発指数（Volcanic Explosivity Index）の略。VEI 5～6 は噴出量 1～100km<sup>3</sup> オーダーの噴火を指す。

## 参考1 セントヘレンズ噴火(1980年)における降下火砕物濃度

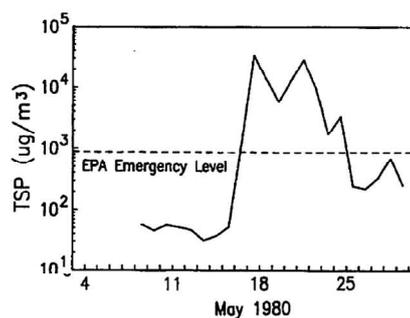
降下火砕物濃度観測の実例として「Mount St. Helens eruption: The acute respiratory effects of volcanic ash in a north American community」が1983年にArchives of Environmental Healthに公表された。

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 $\mu$ 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33.402mg/m<sup>3</sup>。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 mg / m<sup>3</sup> (5/19)、5.863 mg / m<sup>3</sup> (5/20)。
- 風の影響で再びTSPレベルが増加、13.273 mg / m<sup>3</sup> (5/21)、28.465 mg / m<sup>3</sup> (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2 観測値の外挿により推定する手法の計算例

### <計算に用いる観測値>

- セントヘレンズ火山の1980年5月18日噴火噴
- Yakimaにおける気中降下火砕物濃度観測値\* : 約33mg/m<sup>3</sup>
- 観測地点(Yakima)での堆積量(実測値) : 0.8cm

### <モデル計算に用いる観測値>

- モデルサイト: 降下火砕物堆積量15cm

モデルサイトでの気中降下火砕物濃度 =  $0.033\text{g/m}^3 \times 15\text{cm} \div 0.8\text{cm} = 0.6\text{g/m}^3$

\* 観測機器の測定限界を超えていた。

### 参考3 降下火砕物の粒径と終端速度の関係

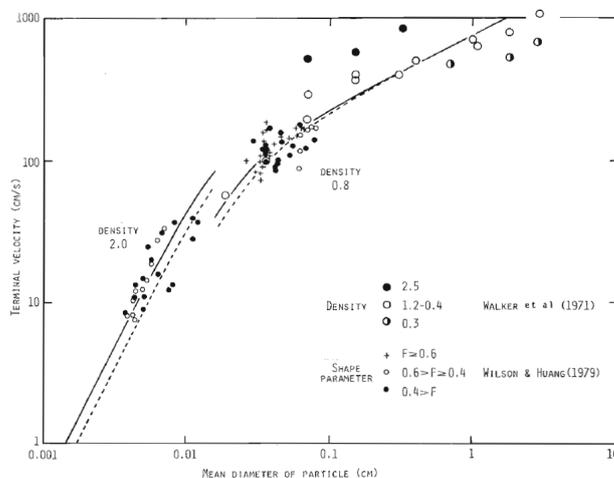


Fig. 3. Terminal fall velocity of volcanic particles vs. mean diameter of the particle at sea-level. Dotted curves; Eq. (4), solid curves; Eq. (4)'. All experimental data are from WALKER *et al.* (1971) and WILSON and HUANG (1979).

※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4 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

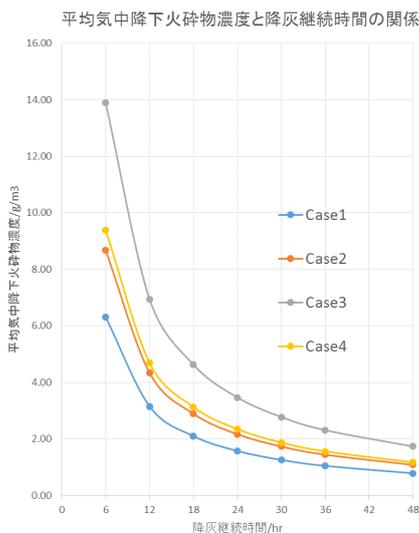
Eruption	Country	Date	Composition	Col. Hl.	MDR (kg/s)	DRE (km <sup>2</sup> )	Plin. Mass (kg)	Time (h)	PF+S (DRE)	PF+S (Mass)	Total Mass	Reference
Toluca (lower)	Mexico	24500 YBP	And./Dac.	28	7.90E+07	0.4	9.0E+11	3.2	N.R.	N.R.	9.0E+11	Bloomfield <i>et al.</i> (1977)
Toluca (upper)	Mexico	11600 YBP	And./Dac.	30	1.90E+08	3.6	9.0E+12	25.9	N.R.	N.R.	9.0E+12	Bloomfield <i>et al.</i> (1977)
La Primavera B	Mexico	95000 YBP	Rhyolite	36	2.20E+08	16.0	4.0E+13	50.5	18.50	4.63E+13	8.6E+13	Walker <i>et al.</i> (1981)
La Primavera D	Mexico	<95000 YBP	Rhyolite	26	7.90E+07	0.6	1.6E+12	5.6	N.R.	N.R.	1.6E+12	Walker <i>et al.</i> (1981)
La Primavera E	Mexico	<95000 YBP	Rhyolite	24	6.30E+07	0.8	2.1E+12	9.1	N.R.	N.R.	2.1E+12	Walker <i>et al.</i> (1981)
La Primavera J	Mexico	<95000 YBP	Rhyolite	33	1.80E+08	3.8	9.5E+12	14.7	N.R.	N.R.	9.5E+12	Walker <i>et al.</i> (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	Walker <i>et al.</i> (1981)
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	85000 YBP	Rhyodacite	45	5.00E+08	150.0	3.8E+14	208.3	120.00	3.00E+14	6.8E+14	Rose <i>et al.</i> (1987)
Apoyo A	Nicaragua	23000 YBP	Dacite	27	8.30E+07	2.8	7.0E+12	23.4	3.30	8.25E+12	1.5E+13	Saouman (1985)
Apoyo C	Nicaragua	<23000 YBP	Dacite	29	8.70E+07	2.5	6.3E+12	20.9	N.R.	N.R.	6.3E+12	Saouman (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	Narango <i>et al.</i> (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 Hildeeth (1986)
Akja	Iceland	1875	Rhyolite	26	7.90E+07	0.3	8.0E+11	2.8	0.03	8.88E+10	8.9E+11	Sparks <i>et al.</i> (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 Crossdale (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 Crossdale (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 <i>et al.</i> (1985)
Avellino	Italy	3500 YBP	Phonolite	30	1.00E+08	0.7	1.7E+12	4.7	N.R.	N.R.	2.0E+12	Pescatore <i>et al.</i> (1987)
Campanian Tuff	Italy	36000 YBP	Trachyte	44	3.20E+08	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	2.7E+14	Sigurdsson and Carey (unpublished)

Carey and Sigurdsson "Intensity of plinian eruptions" *Bull Volcanol* vol. 51, 28-40 (1989)の抜粋

### 参考5 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)



※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、2~3φ(0.0250cm~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、3~7g/m<sup>3</sup>  
降灰継続時間が24時間の場合の平均濃度は、2~4g/m<sup>3</sup>

### 参考6 終端速度と堆積量からの空中平均濃度の算出

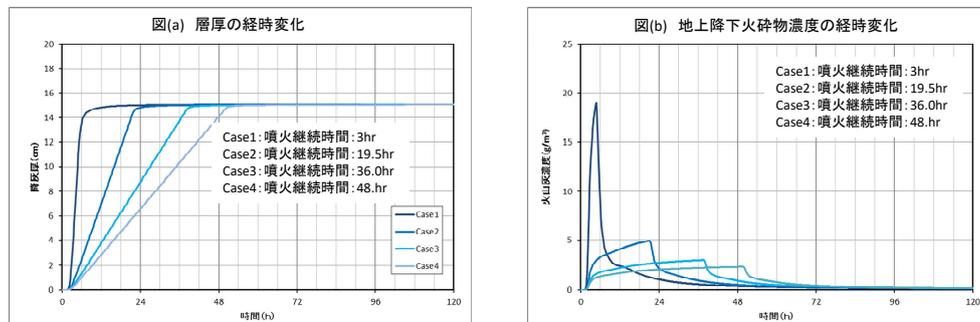
#### <計算式>

原子力発電所敷地に堆積した降下火砕物重量、降下火砕物の粒径から推定する終端速度、及び降灰時間を仮定して、空中平均濃度の算出する式を以下に示す。

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

- C: 空中降下火砕物濃度 (g/m<sup>3</sup>)
- V: 単位表面積当たりの降下火砕物堆積速度 (g/s/m<sup>2</sup>)
- Wt: 単位表面積当たりの降下火砕物堆積量 (g/m<sup>2</sup>)
- r: 降下火砕物の終端速度 (m/s)
- t: 降灰時間 (s)

### 参考7 FALL3Dによるモデル計算結果

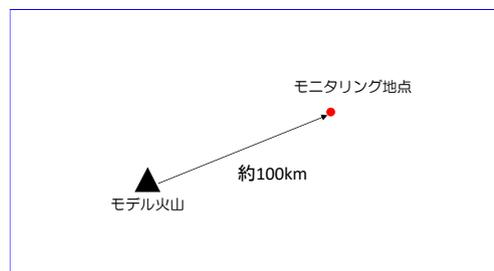


#### <計算結果>

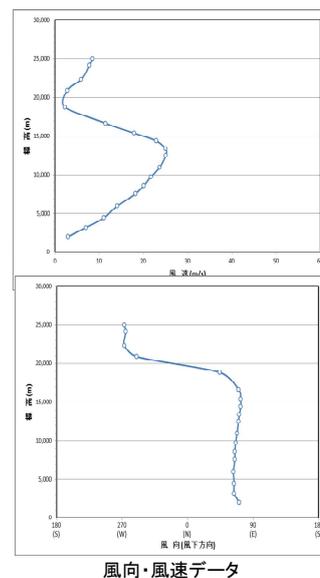
- ・噴火継続時間と降灰時間は同等。
- ・噴火継続時間が長くなるほど、降灰継続時間は長くなり、最大濃度も希薄になる。
- ・最大濃度以降は急速に濃度が低下し、その後、緩やかに濃度は減少する。ただし、気中濃度は長時間低下しない(細粒の遅延降下)。
- ・いずれの条件においても、気中濃度は1~2日程度数g/m³が継続する。

### 参考8 モデル計算における条件設定

- 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。



モデル火山とモニタリング地点の位置関係



風向・風速データ

### 参考9 モデル計算で設定したパラメータ

<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/m<sup>3</sup>とし、噴出体積(6.2km<sup>3</sup>)を重量に変換し、6.2×10<sup>12</sup>kg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、8.8×10<sup>7</sup>kg/sとなる。

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

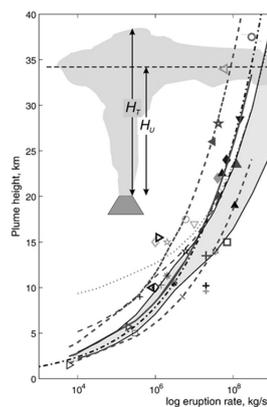
・噴火継続時間(t:s)

⇒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10<sup>7</sup>~10<sup>9</sup>kg/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。



噴煙柱高度と噴出率の関係(Mastinほか2009)

### 参考10 計算に用いた入力値と実現象で考慮すべき点の比較

	入力値	実現象	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 <sup>3</sup> と仮定	正確な噴出量の予測は困難	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 <sup>3</sup> 軽石1000kg/m <sup>3</sup> 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 <sup>2</sup> /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。

気中降下火砕物に対する規制上の考え方(案)

