

国際環境 NGO グリーンピース委託レポート（日本語 抄訳版）
2015年2月26日（概要および第5章）、2015年11月16日（目次
および第1章、第4章）

川内原発と火山灰のリスク

原題：

IMPLICATIONS OF TEPHRA (VOLCANIC ASH) FALL-OUT ON THE
OPERATIONAL SAFETY OF THE SENDAI NUCLEAR POWER PLANT



© Greenpeace

執筆者：

ジョン H ラージ

John H Large, Large&Associates, Consulting Engineers,
London

日本語抄訳版は、英語本編（全 72 ページ）から、Executive Summary、目次と Part I,IV,V
について、グリーンピースが委託・翻訳したものです。図表番号と参考文献は原文と合わ
せています。また、脚注については、訳出している部分の連続番号をふっており、原文と
一致していません。

Executive Summary (要約)

本レポートは、火山噴火により九州電力の川内原発（鹿児島県薩摩川内市）が大量の火山灰降下物に見舞われた場合の現在の原子力安全対策について、3つの側面から論じる。このレポートでは、火砕流等その他の火山に関連する危険要素について、また、こうした危険に火山灰降下物が加わることで、運転中の原発の復旧対応力にどのような脅威となりうるかという点については細部に検討を加えることはしない。

本レポートではまず、火山に関連する危険要素全般について、それが発生した場合の状況とリスクを十分に予想する上で、川内原発の事業者が満たさなければならない現行の規制要件について概観する。第二に、川内原発に関して危険な火山とその危険度を判定するために用いられているスクリーニング・プロセスの有効性について述べる。第三に、予想される火山災害の規模に対して、2013年に改訂された原子力規制委員会の「設計基準」要件は適切であるのか、この点につき、原発が長期間火山灰降下物に見舞われた場合、川内原発内での準備や対策は、周辺地域を放射性物質による深刻な影響から防護するのに十分であるのかという点について論じたい。

2012年に新しく設置された原子力規制委員会は、2013年初めに、極端な自然現象の中でも特に火山活動のリスクと危険について、影響評価の指針案を出した。この「火山影響評価に関する新安全基準」案は、特に方法論的な評価プロセスを採用している点で、国際原子力機関（IAEA）の推奨する基準に忠実である。ここで重要なのは、この評価プロセス全体が、火山ハザードに特化し各原発の立地の特性に合わせて作成された「設計基準」のパラメータを確定、導入させるものだったという点である。

ところが、当初2013年6月に最終的な改訂指針案として出された「原子力発電所の火山影響評価ガイド」は、事業者——川内原発の場合は九州電力——に十分包括的なリスク・危険評価の手続きを厳守させる規制力にも強制力にも欠けている。たとえば川内原発では、甚大な火山灰被害のケースが、確率論的判定による可能性の範疇から引き出されるのではなく、むしろIAEAが推奨する方法に反すると考えられる形で、12,800年ほど前に起きたとされるたった一度の地質学的な出来事を基に導き出されている。現存する地質学的な痕跡が示す一度のみの過去の出来事に依拠するのは、特に同時代の人間の証言が得られない場合には、不確実性を伴わざるをえない。とりわけ、過去のより小規模な火山活動が地質学的な痕跡からは隠れて見えなくなっていたり、火山灰降下の物理的な痕跡が時を経て浸食されたり拡散したりしていたのなら、将来の潜在的な火山活動の測定基準が、実際より低く見積もられてしまう可能性がある。

九州電力による、噴火の可能性のある火山を選別するための火山爆発指数（VEI）の適用の仕方にも同様の欠陥がある。特に、より頻度の高いVEI3からVEI6レベルの火山活動は川内原発に何ら有害な影響を及ぼさず、VEI7クラスの大規模噴火の場合にだけ、川内原発の現在の「多重防護」設備の有事対応力に問題が生じると主張している点である。VEIは、基本的には過去に観測された火山噴火を測定する経験的な尺度として、噴出量や噴煙の高さ等、数々の定性的な観測を考慮して作成されるものであり、一般的に将来の噴火頻度の前兆や、噴火マグニチュード、火山灰降下等の影響を予知するための尺度とは考えられていない。

概して、そしておそらくより直接的に、火砕流や火砕サージのような高エネルギーの火山ハザードとの関連という点においても、噴火の予測が可能だと主張する理論モデルの

一例のみに過度に依存している。また、仮にこの研究のモニタリングの方法論が信頼に足るものであるとしても、このモデルのタイムスケールの範囲は、行動を促すには長すぎる（10年から100年）か、あるいは、400トンから1000トンほどの使用中の核燃料を搬出準備して、原発敷地内から日本のどこか安全な貯蔵場所へ移送する時間としては短かすぎるだろう（数週間から数ヶ月）。

しかしながら、本レポートは火山灰降下物に限定して論じており、これほど大量の使用済みおよび短期間しか冷却されていない核燃料を移送するという、たとえ不可能ではないとしても、おそろしく困難な事業については深く立ち入ることはしない。

また本レポートにおいては、火山灰降下の長期化への対策が、川内原発内で十分に取られているかを検討している。九州電力は、堆積する火山灰層は最大12cmから15cmになると推定している。これは、堆積して湿った灰が、原発立地内に散在する様々な平屋根やタンクに荷重を加えるという点から見ると、屋根の設計荷重限度内である。この火山灰層への対処として、九州電力は、作業員2人1組のチームを編成すれば30チームによる14日間ほどの作業で灰を除去できるとしている。これはかなり楽観的な予測である。イギリスで用いている指標をもとに作業量を換算してみると、水をたっぷり吸いこんだ「粘着性の」火山灰の除去には30日程度かかる。火山灰降下が続く中で、同時に火山灰層を除去しなければならないといった可能性を九州電力は検討していないが、もしそうなった場合、毎時1.3cmという比較的中程度の火山灰降下率だとしても、2人1組のチーム40組ほどが3交替制で作業を行う必要があるだろう。

九州電力が甚大な火山被害の噴火例として参考にしている、12,800年前の火山灰降下物の地質記録に基づけば、もし偶然風向きが北寄りの風から東寄りの風に変化したら、川内原発周辺の火山灰層の厚みは、約30cmにまで増大する。もし堆積した湿った灰が除去されなければ、原子炉1号機、2号機の使用済み核燃料の保管施設として使用している建物は、屋根の荷重限度をそれぞれ1.18倍および1.4倍超過することになるだろう。それにより、使用済み燃料プールの片方あるいは両方の屋根について、破損リスクや崩壊の可能性が生じる。

一般的な認識として、火山灰降下が長期化すると、地域の送電網、特に外部に露出した変電所の開閉装置、変電設備などが絶縁破壊や損傷の危険にさらされることになる。九州電力は、火山灰降下の長期化により7日間の外部電源喪失（LOOP）が起こりうるとして、その間川内原発は、発電所内にある非常用ディーゼル発電機と、場合によっては、車両搭載型の移動式発電機に頼ることになると想定している。だが後者については、移動式発電機が、火山灰降下で通行が困難になっている道路を通過して現場に到着できた場合に限られる。ディーゼル発電装置を維持する上で一つ注意しておかなければならないのは、機械の滑動部分や軸回転部分の焼付きを防ぐために、エンジン吸気フィルターや発電機室のフィルターを取り替える必要がある点である。たとえばアメリカのコロンビア原発では、火山灰降下物の対策として、エンジンフィルターの交換を実質稼働時間2.3時間ごとに行い、発電機室のフィルター交換も実質稼働時間3.6時間ごとに行うとしている。それに比べて、川内原発の詳しい対策の中には、非常用ディーゼルエンクロージャー換気システムのフィルター交換はまったく含まれていない。その一方で、発電機のエンジン吸気フィルターについては、九州電力によれば（コロンビア原発の2.3時間に対し）実質稼働時間26.5時間ごとの交換が必要であり、フィルター交換作業には8人の作業員による約2時間の作業で可能とされている。こうした点を踏まえ、本レポートは、九州電力の分析で展開されている内容の実質的な適用可能性や原始データについて多くの疑義を表明するものである。

興味深いことに、九州電力の諸計画と対策は、原発敷地外の公共設備等に及んでいない。当然、火山灰の降下と堆積はおそらく広範囲に広がり、車両通行は不可能もしくは困難になることが想定され、火山灰の降下が続けば自然光も非常に限られてしまう可能性がある。夜間、地域の送電システムが停止した場合、幹線道路や建物の照明も独立電源設備に頼ることになるだろう。さらに、小胞化し、軽石状になった浮揚性の火山灰が川内川に流れ込み、下流へ集積して局地的あるいは広範に洪水を引き起こす可能性もあり、火山灰が下水管や排水溝を詰まらせれば被害は一層大きくなる。また、災害対策や消防の人員は、噴火中の火口周辺地域で生じたより深刻な事態など、他の火山活動の影響への対応要請に追われることになるだろう。

別の言い方をすると、非常に活発化した火山活動が生じた場合、ある程度の期間にわたって、川内原発は、より緊急にとまでは言わないまでも、至るところで同程度に必要とされる人材・設備両方の資源の争奪戦に加わらなければならなくなる可能性がある。このため川内原発の職員自らが、人員、設備、燃料を発電所内に搬入するのに不可欠なルートを確保するために、敷地外にまで作業範囲を広げざるを得ない状況になるかもしれない。そうなれば、原発敷地内の状況を安定させ、原発の安全性を維持するために、必要とされる人的資源が手薄になる可能性がある。同様に、常勤職員や契約労働者等、原発現場で働く契約をしている人たちも、原発での作業への義務感と、家族に対する誠実さの二者択一を迫られた結果、自分たちの家を守ったり、火山の影響が少ない九州の他地域か、もっと広範囲の日本のどこかに脱出したりする可能性がある。

このように、ある種の状況下において、川内原発が立ち往生し、人材・資材も不足し、ますます不安定で耐久が困難な状況に陥ることが想像できる。ところが、九州電力も原子力規制委員会も、その影響評価の要旨には、こうした可能性に対する認識や準備を示す記述はほとんどない。ましてや、九州電力が火山灰降下物に対処する用意があり、そのために事前計画した対策があることを誇示するために川内原発で行った様な、比較的小規模の訓練やリハーサル（晴天の乾燥した日に、100mほどの距離にわたり演習用火山灰を舗装路面から除去する訓練など）は、九州地域で起きる実際の火山ハザードからは程遠い。

結論としては、2013年に導入された原子力規制委員会の「原子力発電所の火山影響評価ガイド」は、福島第一の事故以前には火山活動の影響が全く考慮に入れられていなかったことを考えると、重要な進歩であると言えるだろう。しかしながら、初版の「ガイド」は、IAEAが推奨する方法論的なアプローチの反映という点では、未熟なものと言わざるをえない。さらに「ガイド」は、火山災害の評価を包括的で実効性のあるものとするために、事業者に必要な規制の必要性を認識させるものとはなっておらず、原発特有の「設計基準」を調査し確立するよう、事業者に義務づけることもしていない。そのため、原発立地評価を行ったとはいえ、原発とその敷地の根本的な有事対応力や「多重防護」に取り組むというよりは、むしろ些末な部分を捏ね回して終わってしまったようだ。

「ガイド」のもう一つの弱点としては、火山活動の影響を検討する際に、火山活動がおよぼす様々な影響を一つひとつ機械的に切り分けて事業者が評価するような導引となってしまうという点である。本レポートの主題である降下火山灰を例にとると、その影響は原発施設内外を問わず、広範囲に多様なエリアで同時に起こりうる。つまり、相互発生的なものなのだ。機器の停止、火山灰堆積による建屋へのダメージや損壊、施設内外の電気設備のショートやトリップ、原発と外部とのアクセス経路が絶たれる、予測困難な火山噴火時における事故対応要員の不足や就業の拒絶等々である。発生しうる

影響の一つひとつは、原発を停止させるほどの影響を持たないかもしれない。しかしそれが複数同時に発生した際、特に混乱を伴う場合などは、原発の全体的な対応力を低下させるに十分な影響となる恐れがある。同様に、火山灰の影響は、火砕流やサージ等、他の火山ハザードとの組み合わせで検討されるべきである。

この点こそ、原子力規制委員会-九州電力のアプローチの根本的な限界を示している。すなわち、総体的に噴火の影響を検討することなしに、個々の側面からのみプラントの性能や対応力を規定したり処理したりしようとするものである。

九州電力が原子力規制委員会に提出し、原子力規制委員会が要約したのを見ると、原子力安全のための新しい規制組織である原子力規制委員会が、原発における体系的で包括的な火山影響評価を導入しようとしたこの最初の試みは、必ずしも成功しなかったと結論づけられるだろう。

ジョン・H・ラージ

川内原発と火山灰のリスク

IMPLICATIONS OF TEPHRA (VOLCANIC ASH) FALL-OUT ON THE OPERATIONAL SAFETY OF THE SENDAI NUCLEAR POWER

PLANT

目次

Part I 法律と規制の枠組み

原子力発電所の設計基準（デザインベース）ハザード評価～福島第一以前
福島第一原発事故で明らかになった規制の枠組みの欠点
福島第一以後と新しい設計基準（デザインベース）への移行

Part II 火山災害

火山災害

降下火災堆積物

火山ガス

ブルカノ式噴火

溶岩流とドーム

火砕流

火砕サージ

火山性地滑り

噴火の頻度と予測可能性

火山リスクと災害の分類

火山爆発指数

災害とリスクの評価

方法論的アプローチ

Part III 日本の火山

九州の活火山

火山活動警告システム

Part IV 火山の危険性と原子力発電所へのリスク

危険区域の決定

火山灰降下

大気に運ばれる火山灰の拡散と堆積に関するモデル

a) 火山灰堆積層の厚さ

b) 火山灰層の形成速度

c) 火山灰降下と原子力施設一般的なケース

i) 建造物の積載荷重支圧強度

ii) 局地的洪水

iii) 電気機器

iv) 原子力発電所の発電現場

1) エアフィルター：建屋及び付帯設備域の換気と浄化

2) エアフィルター、緊急用ディーゼル発電建屋

3) 復水器の海水取水口と循環ポンプ

非常時補機冷却水供給とポンプ

緊急用冷却ポンプと補給水ポンプ

V) 原発敷地内外における関連する影響

a) 原発へのアクセス

b) 原発スタッフが働ける状態にあるか

Part V 川内原発- 火山リスク設計基準

原子力規制委員会の規制の枠組み — 川内原発の場合

A) 「設計基準」の強化の放棄

B) 川内原発の原子力規制委員会「火山影響評価ガイド」への適合性

C) 原子力規制委員会の規制枠組みにおける標準的コンプライアンス

付属書 I

付属書 II

付属書 III

付属書 IV

参照

(訳注：本文中の右肩付き数字は注釈、括弧[]の数字は参照文献を示す)

第1章 法律と規制の枠組み

原子力発電所の設計基準ハザード評価～福島第一以前

2011年3月11日に発生した福島第一での壊滅的な事故以前、日本の原子力発電所に適応される原子力安全規制は、一連の規制ガイドラインを用いて実施されている国の法令の階層的枠組みによって構成されていた。

原子力エネルギー基本法によって定められている通り、大臣の命令と法令は、規制ガイドラインを通して原子力発電所に適用される原子力安全のための二つの主要な法律である原子炉等規制法と電気事業法に付属または関連付けられている。

2012年9月以前の、個別で課題／トピックが特定された規制ガイドラインは、原子力安全保安院（NISA）や経済産業省（METI）と並行して機能していた、法定機関である原子力安全委員会（NSC）により始められ、また適用されたものであった。

原子力発電所のための NSC の規制ガイド（NSCRGs）は4つのクラスにグループ分けされ、それぞれがそれぞれの申請（原子炉-L、研究炉-D、核燃料施設-F、そして廃炉、防災などの一般的ガイダンス-T）に関連しており、例えば原子力発電所を扱う全ての NSCRGs は、NSCRG:L-DS-I.0 のように L が付けられる。

原子炉クラス L は5つのカテゴリーに分類されており（サイト-ST、設計-DS、安全評価-SE、被ばく-RE、そして事故管理-AM）それぞれにガイドラインが添付されている。全ての NSCRGs が全てレベル2である「事故管理」の項を除いて、それらのガイドライン中の各区分内では、二つのレベル（レベル1とレベル2）が示されている。¹

NSC レベル1の規制ガイドラインの例をあげると、NSCRG:L-ST 1.0 が《原子炉施設評価と申請基準》について。また、NSCRG:L-DS-1.0 が《軽水炉施設の安全設計》について²保安院と原子力安全委員会は NSCRGs を原子力安全評価のための基礎として使用していたが、法的拘束力はなくまた、必要条件ともなっていない。

しかし、国の法律（法律および行政の命令と法令）は原子力安全の基準を細かく定めてはいないため、NSCRGs は最低限の《設計基準（とされる）》要件をを規定したものと総じてみなされている、というのがこれまでの認識である。

このことから、原子力発電所の設計ガイドライン NSCRG:L-DS-I.0 の明文化された目的は、建設許可が承認された時点と、その後、提案された原子力発電所の設計が LDS-I.0 の要求を満たしているときにおいて「安全性評価における安全確保のための設計の適性を判断する基準」を確立するため、と言える。

その意味で、NSCRG L-DS-I.0 の要求を満たすことは、十分安全な設計を《確実に》し、そして、そのため、原子力発電所の設計基準（デザインベース）を確立することとなる。

原子力の専門用語において、設計基準（デザインベース）は、原子力発電所の設計が明らかに勘案された諸条件／事象の範囲内に収まるものであり、制定された基準によれば、そのような施設は認められた条件を超えることなく持ちこたえることができ、そして、計画

¹ Each division of the NSCRGs is headed by a general guide, such as NSCRG:L-DS-I.0 appended to which are a series of more detailed and/or topic specific guides such as NSCRG:L-DS-I.02 Reviewing Seismic Design of NPPs and, then, in greater application Level II guides such as NSCRG:LDSII.05 Geological and Ground Safety Examination of NPPs

² A listing of the NSCRGs is at http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/guides/nsc_rg_lwr.htm

上の安全システムの介入運転と／または受動的な防壁（訳注：原子炉建屋など）によって抑制される。

別の言い方で言えば、設計基準（デザインベース）は、原子力発電所が「持ちこたえられない」という結果を生じさせることなしに耐え切るであろう条件／状況と、一組のセットと言える - それはいくつものそのように特定された設計基準的状况、特有の事故のそれぞれの典型、外的自然事象などと共存するものかもしれない。

定義上は、設計基準（デザインベース）は必ずしも原子力発電所での最悪を想定した事故もしくは状況のことではない - 最悪のシナリオは、差し支えないほどに発生頻度が低いという理由で、除外されうる（例：確率論）など…

福島第一原発事故で明らかになった規制の枠組みの欠点

福島第一原発の惨事により、ハザード分析に対する日本的なアプローチの基本的欠陥が露呈した。その欠陥は、とりわけ自らが長けていると考えていた、確率論的地震ハザード解析 (PSHA) における不確実さの説明と定義という部分において明らかとなった。

これらの欠陥は、地震のプロセスや深刻度についての不完全な知見からくる認識の不確実さ、また本来地震事象に内在するランダムさが引き起こす進展や、偶然による変動性を生み出す不確実性に関連している。[1]

地震ハザード分析において、認識の不確実さはデータをより多く集めることと、予測の技術を向上させることのどちらかもしくはその双方により減らすことができるだろうが、しかし逆に、それとは違い、偶然による不確実性は、詳細に予測できず、また、その時のさらなる調査によって軽減もできない情報のランダムさに由来する。³

東日本大震災と2011年3月の東部の海沿いを襲った津波の組み合わせは、今なお残る当時の、認識と偶然両方に起因する不確実性の深さと複雑さを露わにした。

確率論的津波ハザード解析 (PTHA) は確率論的地震ハザード解析 (PSHA) 由来であるにもかかわらず、非常に異なる不確定要素を組み入れているということ、福島第一原発の事故は実証した。（つまり）地域の潮の満ち引きの様態と海底の傾きの角度⁴のようなまさに地域限定の状況と同様に、遠方の発生源についても説明すべき、ということである。

原子力発電所の立地についても当てはまるように、設計当時はおそらく考慮さえされなかった他の要因が、福島第一の確率論的ハザード分析全体の複雑さを増加させた。サイトの段丘や土木作業による高い取り囲みの壁⁵（訳注：防潮壁など）、通常海面レベル以下で原子力島につながるダクトと複雑に入り組んだサービスルームが浸水し、アクセス不可となることなどを考慮すべきだった。外部電源喪失 (LOOP) を伴い、機能しない非常用発電機の位置や防御は、破壊的な全交流電源喪失 (SBO) を引き起こし、それは、容赦なく原子炉の核燃料冷却システムの喪失へと繋がっていき、核惨劇を確かなものにする。

福島第一における津波後の原子力事象は、さまざまなレベルの事象を通して炉心と使用済み燃料プールの冷却の両方が正常に保たれることが不可欠であると示した。その理由は（その両方の維持が）深刻な放射能放出を防ぐための最も効果的な方法だからである。

³ Of course separating aleatory variability and epistemic uncertainty concerns the limits of what could be learned in the future. In effect, there is no aleatory variability in the earthquake process because, in principle, earthquakes are responding to stresses and strains in the earth so that, given enough time, sufficient data and understanding will become available to develop reliable and detailed models of the earthquake process. In other words, since the earthquake process is in theory knowable, there is only epistemic uncertainty due to our lack of knowledge that will be reduced in time

⁴ The shelving rate (ie the shallowing of seawater depth in the approach to the coastal beach) determines the run-up height of the tsunami wave train

⁵ The earthwork bunds enclosing the southern section of the Fukushima Daiichi acted to reflect back and thereby heighten the tsunami inundation amplitude over the site area.

この事故は、これから原発が保護されなければならない現象として：大規模な火災、爆発、地域的な火山活動が及ぼす災害を含む極端な自然現象や、いつまで続くかわからない電源喪失、従来の設計基準（デザインベース）事象から防護してくれている通常用／バックアップ用炉心冷却の喪失を引き起こす複数の内部的欠陥の組み合わせ、などがあることを示した。[2]

福島第一以前の NSCRG:L-DS-I.0 版は、自然現象について以下のように扱っている：

「…ガイドライン 2. 自然現象に対する設計上の考慮

1) 安全機能を備えた SSCs⁶は、それらの安全機能の重要性と地震由来の機能喪失がもたらす安全性への影響の可能性が考慮されるとともに、適切な地震カテゴリーに割り当てられるべきであり、そして地震の強度に十分耐えうる適切な設計がなされなければならない。

2) 安全機能を備えた SSCs 6 は、原子炉施設の安全性が**他の想定される地震以外の自然現象**によって機能が損なわれることのないよう、設計されていなければならない（強調は筆者）

安全機能を備えた SSCs の極めて重要度が高い点は、「想定される自然現象もしくは自然による力や事故がひき起こす負荷の絶妙なコンビネーションが生じさせる最も深刻な条件に対して、適切な安全性への考慮が反映された」設計であろう…」。

このように、福島第一以前、自然災害に関しての主要な関心は地震現象にかなり偏っており、火山活動を含む他のすべての自然現象の評価に関しては、被認可者/運転者の裁量に大きく任されていた。

日本政府（国会）の東京電力福島原子力発電所事故調査委員会は、2012年7月に出した報告書で、原子力発電の安全性を規制する原子力法規制の速やかな抜本的見直しを勧告している。

（強調と説明の追加は筆者による）

「…ひとたびこのような法規制、新しいシステムが確立されたら、それらは既設の原子炉にも遡及適用されなくてはならない。

そしてその法では、新基準に適合しない原子炉は**廃炉とする、もしくは適切に然るべき対処がなされるべきことが明言される必要がある…**」（強調は筆者による）

福島第一以後と新しい設計基準への移行

2012年に設立された日本の原子力規制委員会（NRA⁷）は、2013年7月に『新規規制基準案』[4]を発表しているが、その中では、有効なシビアアクシデント・マネジメント対策の不在を含む、脆弱性の存在や現存の原子力発電所の不備が認識されている。

概要案（パート 1）では、設計基準（デザインベース）の安全基準を向上させるための手段として以下が言及されている：

「…自然現象（例：竜巻、森林火災）に対する安全対策と外部の人工的ハザード（例：航空機衝突）、外部電源供給の信頼性、敷地内の防火対策とともに、SSCs の機能と最終の（訳注：最終オプションとしての）ヒートシンクは強化されるべきである…」

⁶ SSCs - Structures, Systems, and Components

⁷ The NRA was created by separating the functions of the former Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) industry watchdog from the pro-nuclear Ministry of Economy, Trade and Industry (METI).

続く 2013 年 4 月には、さらなる概要案としての『新規制基準 (NRRs) –設計基準 (デザインベース)』[5] 中における『ガイドライン 2』の記述に見られるように、設計基準 (デザインベース) に含まれる自然現象を定義する、より実質的な内容が加えられている。

例えば…

「… 2. 原子炉施設の一般技術要求

(1) 自然現象に対する設計考慮…

(地震以外の自然現象)

考慮を反映した設計でなければならない…」(参照 5, 9 頁) 省略は筆者による)

…新規制基準が明示するところによれば、自然現象とは以下のものを指す：

「…D. ” 予測される自然現象” とは、溢水、台風、竜巻、凍結、降雨、降雪、雷、地滑り、火山活動、生物学的作用、森林火災などの敷地内の自然現象を指す」(参照 5, 10 頁) 強調は筆者による)

E. "The severest conditions" refer to the conditions assumed to be the severest according to the **latest scientific and technological knowledge concerning the natural phenomena under consideration . . .**"

「…E. ” 最も厳しい状況” とは考慮される自然現象に関して最新の科学のおよび技術的知見において最も厳しいと想定される状況…」(強調は筆者による)

新規制基準案の評価の次のステップは、本稿の主要な関心事であるところの、2013 年 6 月に改定された『原子力発電所への火山影響評価ガイド』[参照 7] などの一連のガイドライン案 [参照 6] ⁸ の開発だった。これと他の新規制基準は『原子力規制委員会の新しい規制』という一般的なタイトルのもと、2013 年 7 月 8 日に有効となった。

この特定の『ハザード評価ガイド』⁹ は、原子力規制委員会が国会事故調査委員会の最終報告 [3] の以下の勧告に対して提示した実用的な履行であった。

「…原子力事業者は自然環境の特性を考慮に入れた包括的なリスク分析を実施すべきである。

その分析においては、地震とそれに付随する事象だけでなく、**それらが起こる確率が高くなくとも、既存の分析に考慮されている内部事象も含め、溢水、火山活動**または火災などの外部事象をも含めるべきである。

(強調は筆者による)

原子力規制者は事業者の分析をチェックすべきである…」

2013 年 7 月までに有効となった新規制基準 (NRRs) ¹⁰ [参照 8] は、原子力発電所の事業者に、従前では起こり得ないと考えられており、それゆえ原子力安全ケースにはふくまれていなかった希少かつ極端な自然事象に対しても考え方の明文化を求めるものとなった。これにより、火山活動の評価と収集が今や事業者に課せられることとなったのである。

⁸ Some, if not all of the Draft Guides were put out to public consultation and, it is believed, at this stage the Japan Nuclear Energy Safety Organisation (JNES) may have contributed to revision and amendment – certainly this was the case for the seismic ground motions, but JNES does not seem to have contributed directly to the Assessment Guide of Volcanic Effects of APPENDIX I.

⁹ No such volcanic hazard specific guide existed prior the regulatory changes brought about by the accident at Fukushima Daiichi, as noted by the Diet Investigation Commission comprehensive risk assessments addressing earthquake, tsunami, fire, volcano, collapse of slope had not been conducted.

¹⁰ Act for the Establishment of the Nuclear Regulation Authority (No 47, June, 2012) and under the terms of Article 17 of the Supplementary Provisions of the Act for Establishment of the Nuclear Regulation Authority. The revised Act introduced a new regulation system based on the lessons learned from the Fukushima Daiichi accident, the latest technological findings, trends in overseas regulations including regulatory requirement stipulated by the IAEA and other international organizations, as well as other factors.

こうして、改正された法律は、福島第一事故からの教訓に基づく新しい規制システム、最新の技術的知見、IAEA や他の国際機関により定められた規制の要求を含む海外の規制の潮流、およびその他の諸要素を導入するものとなった。¹¹

この評価は、火山評価ガイドにおいて特定されている火山ハザードのうちの一つであるテフラ降灰の影響と、その事象の特性が、現在原子力規制委員会による再臨界と発電再開の許可プロセスの最終段階にある川内原発の安全な運営にどのような影響を与えるか、を考察したものである。

¹¹ APPENDIX I includes an unofficial translation of the Contents Listing of ‘The Assessment Guide of Volcanic Effects to the Nuclear Power Plant (Draft)’ - APPENDIX II provides the (English) tentative titles of new and/or strengthened NRA Safety Guides.

第4章 火山の危険性と原子力発電所へのリスク

危険区域の決定

前に述べたように、IAEA では危険の特定と区域設定に関する指針[27]¹²を提供しており、これは新たな原子力発電所の場所の選定と評価のために主に利用されている。既存の原子力発電所の遡及的評価にも利用できる。IAEA の指針に関しては、特に川内原子力発電所の火山に関する安全の問題と原子力発電所の火山影響評価ガイド [7]への遵守について、後に考察する。

第2章で記述した各種火山活動の危険区域は、一般的には、第一に、近距離か遠距離¹³かによって規定される。第2に、これらの危険は危険度の大きさによりスクリーニングされる。第3に、特定の危険が単独または他の要因と合わさり検討対象の原子力発電所の建屋、構造及び機能に影響するか、また影響する場合にはその影響はいかなるものかを評価する。

第2章で示した危険の一部は、九州にある2カ所の原子力発電所に到達する距離内にある。しかし、今回のレビューは九州電力川内原子力発電所及びその周辺への火山灰降下を主な検討対象とする。とはいえ、特定されたその他の火山による危険性を無視してはならない。そして、同様な配慮を、活火山周辺にある日本の原子力発電所や原子力施設に対しても払うべきである。

火山灰降下

火山灰の大気拡散及び堆積は多くの要因により決定される。例えば、噴煙の高さ、大気温度、火山灰の総質量、灰粒子の大きさ、浮揚性、堆積速度、大気の安定性、降雨、風向きなどである。このような要素が、火山灰の地上での大きさと形状、ならびに、堆積率を決める。

一般的には、噴火地点から離れば離れるほど堆積した火山灰の厚さも粒子の大きさも減少する。粒度分布は噴煙高度、速度及び風向きにより主に決定され、粗い粒子が近距離に堆積し、細かい粒子は遠方に運ばれる傾向がある。[28]

過去の火山活動の年代配列は地質に刻まれている。活発な火山、プリニー式また亜プリニー式噴火の結果は次のようになる。すなわち、大型の破片、分厚い軽石及びスコリアは、噴出口のすぐそば、特に火山の麓付近に堆積する。このような堆積物は、一般に長期間残っている。一方、細かい灰粒子及び直径2ミリ以下の粒子は噴煙とともに上空に運ばれ拡散しより遠くに堆積する。しかし、このように広範囲に拡散した噴煙の成分は、地質学的には明確な記録としては残されていないかもしれない。というのも堆積した火山灰は細かい粒子であり、結合力が弱いためである。もし、噴出量（次々に噴火が続いても）が多くない場合は、火山灰は土壌と混ざり、判別不能になる。しかし、一回の噴出が長期間にわたり持続した場合、降下灰は堆積し、明確な地層を形成する。

以上のような理由で過去の火山活動の地質的記録、特に降下灰は慎重な解釈が必要となる。

¹² IAEA Specific Safety Guide No SSG-21, 2012 supersedes IAEA PSSS-01, Volcanoes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting, 1997

¹³ Proximal/Distal – near to and away from the centre of the eruption respectively

大気に運ばれる火山灰の拡散と堆積に関するモデル

大気に運ばれる火山灰の拡散と堆積に関するモデルは噴火の最中でもそれ以前でも作ることができる。JMA が使用している TEPHRA2 など数多くのソフトウェアが開発され実証済みである。このような数学モデルのほとんどは 1981 年の鈴木の仕事に基づいている。[29]

複雑な地質プロセスを表す数学モデルには本質的な限界がある。火山噴火に関する複雑で雑多な自然のプロセスの詳細についての知識が不完全であるからである。プロセスの詳細の全てを具体的に表す訳ではない。

複雑な雑多な地質的なプロセスの全ての側面の総合的なデータはない。このような限界の結果、数学モデルは予測を可能にするがプロセスまたは結果を正確に表したものではない。(火山灰の堆積した場所と量など)

ストロンボリ式噴火では大気へのマグマの噴出はミクロン及びミリ単位の粒子の弾道を描く噴泉である。この粒子は、噴火エネルギーとプルームの対流性の熱気とガスによって大きなスコリア破片が噴煙に吹き上げられたものである。残りの大きな弾道とスコリアの破片は噴火口周辺に堆積する。対流性のプルームは火山灰を遠くまで運び広範な地域に降らせる原因となる。プルームからの火山灰は噴火口から遠くなるほど降灰量は少なくなる。しかし、風と水の浸食により再拡散する。噴火が大型になればマグマのより大きな破片は灰の大きさに砕かれる。マグマの量が増えるため対流性プルームも増大する。一般的には、数学モデルはプルームしか表すことはできず、拡散噴出物の量、およそその距離には、方向についてのインプットが必要となる。

数学モデルは、噴煙柱の熱流束によって決まる噴煙柱(プルーム)の高さに分散している粒子の拡散移動(大気の乱れと風によるもの)を計算する。粒子の最終速度(各粒子の大きさ、密度、形状の関数)と噴煙柱における粒子の上昇速度によって決まる降下時間はそれぞれの粒子の移動時間である。モデルは通常噴煙柱の上昇速度が直線的に低下すると仮定しており、火口において最大で噴煙柱の頂点でゼロになる。浮力の速度への影響は無視している。

モデルのもう一つの一般的な限界は、平均直径が約 15 ミクロン以下の火山灰の粒子の移動を正確に表せないことである。人為的に平均直径で切り捨ててしまうことは、重力沈下の重要性を矮小化するものである。15 ミクロン以下の粒子は大気の乱れにより、モデルが推定するよりも長く大気中に浮遊する傾向がある。細かい灰の粒子が数百とは言わずとも数十キロ風下よりも近くに堆積すると極端に評価する傾向がある。もう一つの限界は、数学モデルはプルーム内の火山灰粒子の集団を考慮しないことである。(モデルによっては、雨によってプルームから火山灰粒子が除去されることも考慮していない。) 15 ミクロン以下の粒子の堆積を表せたら灰の重力沈下も説明可能になる。

より高度なモデルでは、風速、シア、風向きなど気象学的なインプットを不確実なパラメーターとして扱っている。風速などを確率論的に扱うことで垂直な噴煙柱の全ての高度における将来の風速の不確実性を捉えている。噴火力と当初の上昇速度などに関しても、似たような不確実性を仮定している。これらは、総噴火量と持続時間の関数である。マグマが破片化し、対流性プルームに入り込む場合、当初のプルームの上昇速度は噴出力、持続時間、火山通道の直径から得られる。

火山灰プルームが大気への放射性物質放出と混ざっている場合¹⁴、その後の拡散と堆積はASHPLUMEなどの既存のソフトを使いモデル化できる。[30]

a) 火山灰堆積層の厚さ

図8¹⁵は、米国のカスケード山脈の過去の噴火による火山灰堆積層の厚さを示している。

図8であるが、マザマ山の噴火（総火山灰噴出量8,800BP、40立方Km DRE）及びグレイシャーピークの噴火（11,000から12,000BP）のデータは、火山灰の厚さが時間の経過とともに浸食または改質されていなくとも圧縮されており、圧縮されていないセントヘレンズ（1980、～1立方Km）の最近の火山灰層と比較して、より証拠があると言える。一般的なコンセンサスは、当初のテフラ層は圧縮された厚さの2倍以上であったらうというものである。[31]

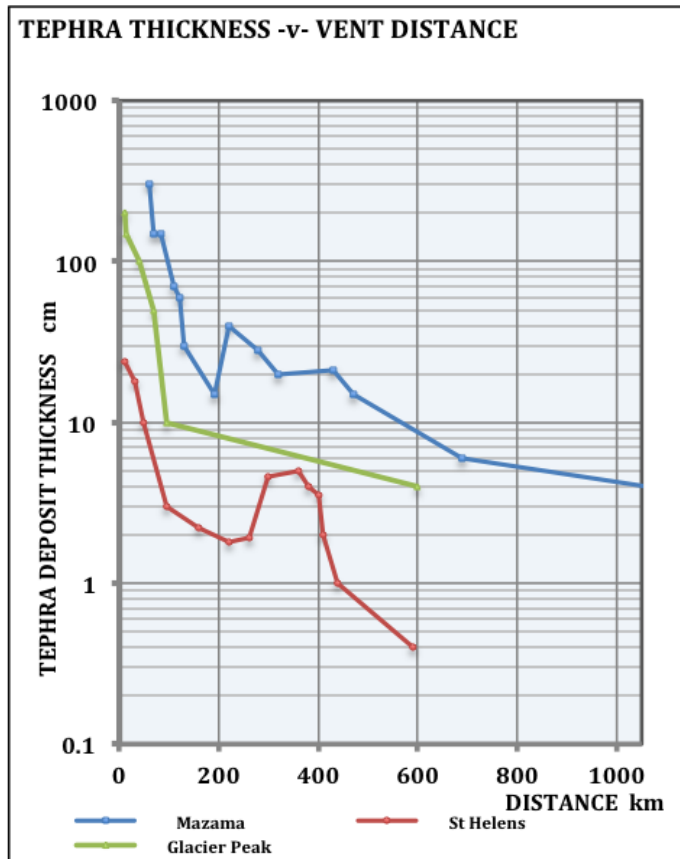


FIGURE 8 PAST EXAMPLES OF TEPHRA FALLS

灰の降下の予想は、TEPHRA2とJMA Ash Fall Forestなどの数多くの移流拡散ソフトのどれかを使った数値シミュレーションにより日常的に行われている。「火山灰降下のインバージョン法」[32]として知られているモデル手法では、過去の噴火パターンを理解することが可能である。それにより、将来の火山活動の可能性を確定的に分析するための有効なデータの蓄積ができる。

大気による火山灰の拡散及び堆積の予測は複雑な科学である。粒子の大きさの違いなどといった多くの変数は、特に移流の影響を受ける。もう一つの重要なパラメーターは湿度である。[33] しかし、火山灰の粒子が極端に小さい場合は、火山灰の堆積の厚さを見ても、距離が遠くなるに従い灰が小さくなるという相関関係は存在しない。[34]

¹⁴ Say where there occurs an atmospheric radioactive release from a whilst there is a volcanic tephra plume dispersing overhead.

¹⁵ FIGURE 8 is a diagrammatic representation of Figure 3-1 of [35].

最近のセントヘレンズ山の降灰の厚さのデータを見ると火口から約300Kmの地点で1.5cmから5cmへと厚みが増加しているのが見られる(図8)。これは、おそらく大気の異常により非常に細かな灰がより大きな粒子に凝集した結果であり、その結果大きな粒子は降下速度が増した。8800BPのマザマ山の噴火でも同じ効果が見られた。しかし、よりエネルギーが高い場合は圧縮されない火山灰の堆積は300Kmでも約50cmになろう。[35]

図9は¹⁶、火口からの距離による火山灰の降下層の厚さの確率を示したものである。火口から100Kmで厚さが5.5cmを超える確率は10%である。この確率データは36の噴火を元としている。これらの噴火のそれぞれ火山灰の量は0.1立方Km以上である。ただし、より大きな噴火も含むためある程度の偏りはある。[36]

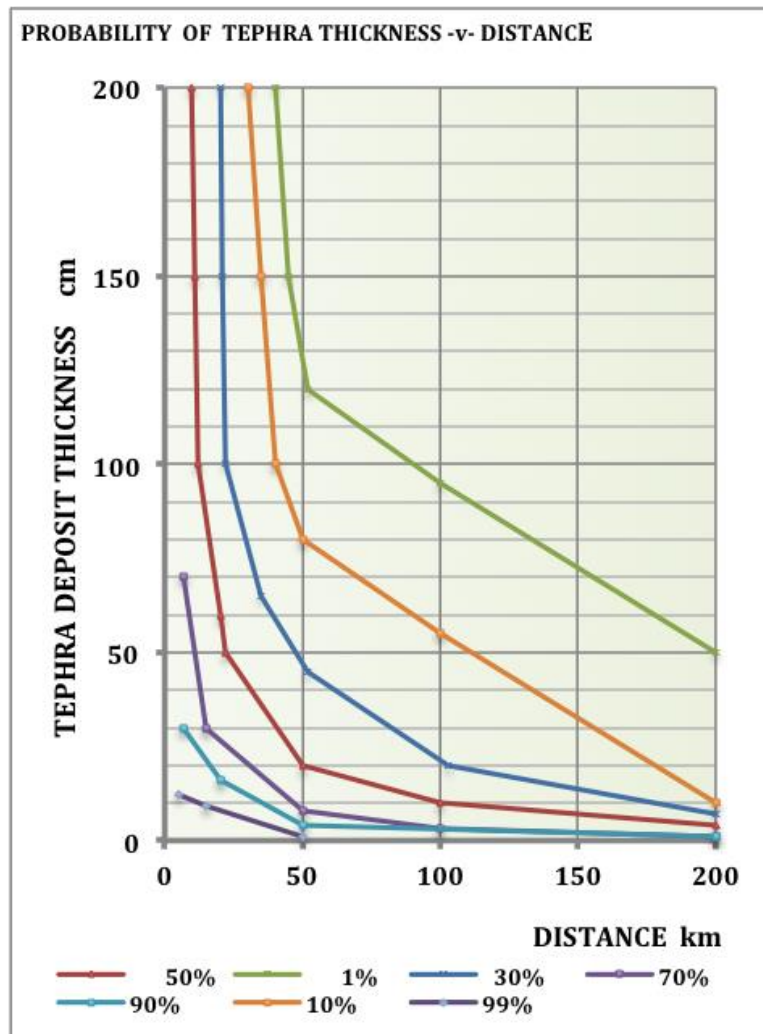


FIGURE 9 PROBABILITY OF TEPHRA FALLOUT THICKNESS

爆発に伴うブルームの研究から総噴出量を推定することも可能であるが、このモデルはまだ開発段階である。[37]

b) 火山灰層の形成速度

噴火中またはその直後における火山灰層形成速度については意味のある歴史的記録はない。1980年のセントヘレンズ山で見られた火山灰堆積からもきわめて限られたデータベースしか得られない。

1980年のセントヘレンズ山の噴火では、灰降下速度は1時間あたり1.3cmで火口から50Kmで総堆積4.5cmと報道されている。ただし、ほとんどの堆積は最初の1時間に起きたと推定される。[38]

¹⁶ FIGURE 9 is a diagrammatic representation of Figure 2.9 of Tilling I R, 'Volcanic Hazards', Int Geological Congress, Washington, 1989 - see Scott E W, 'Volcanic-Hazard Zonation and Long-Term Forecasts' p19

降下火山灰の蓄積速度は、多くの要因による。例えば、噴出量、噴煙柱の高さ、風向き及び風速、火山からの距離である。降下継続時間、火山灰堆積速度、視界の悪化と暗さの継続時間などは、歴史的な噴火記録から推測できる。

火山灰の降下速度は、過去の火山灰降下の計測値から得られる。しかし、このような計算値はあまりなく、速度も平均値に過ぎない。

(火山灰により空が覆われたために) 暗闇が記録された噴火に伴う圧縮されていない火山灰の厚さと暗闇の持続時間に関する集積データを作成することは可能だ。火山灰の大半が暗闇時に降下したならば、平均値としての堆積速度は毎時 1 以下から 20mm で火山灰全体の厚さは 1-300mm となる。[3 9]



FIGURE 10 COLLAPSE OF A WAREHOUSE ROOF

c) 火山灰降下と原子力施設一般的なケース

一般的に：

i) 建造物の積載荷重支圧強度

火山灰またはその蓄積の加重による建屋またはその一部に対する損傷は、屋根の一部損傷から完全崩壊まであり得る。建屋の屋根と外部の積載荷重は、火山灰が厚くなるほどに増加する。

主に黒曜石及び軽石シャードからなり遠くで降下する乾いた圧縮されない火山灰は、平均密度が立方センチメートル当たり 0.5g である。しかし、雨で濡れた火山灰の比重はおよそ立方センチメートル当たり 1.25 から 2.0g と増加する。20 から 30Km と火山近くに堆積する圧縮されていない火山灰層は、石質や結晶質の火山灰に似た高い比重をもつ。[4 0] [4 1]

図 1 1 は、火山灰及び雪の厚さによる積載荷重を比較したものである。雪の積載加重の上限として 3.5kN/m²が、日本建築基準を使用している日本の建造物の設計において典型的に使われるものである。¹⁷[4 2] 湿った火山灰層の厚みが約 17cm になると想定上の建物の屋根の雪積載荷重基準を超える。^{18, 19}

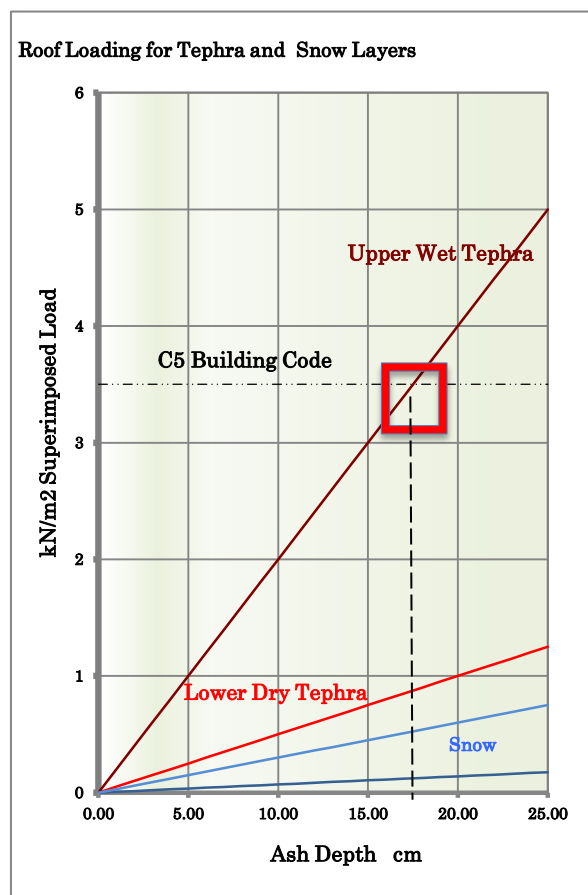


FIGURE 11 TEPHRA ASH AND SNOW LOADS

¹⁷ It may be that the Sendai 原発 building design adopted a higher superimposed load rating – the actual rating is not known.

¹⁸ This calculation is based on the 100 year snowfall for the Kyushu Sendai area,

建物に対する積載荷重の増加は、地震力に対する動的応答にも影響を与える。雨に濡れた火山灰層は、積雪の場合とはかなり違った振る舞いをする。地震が起きた時に、火山灰は密度が高いだけでなく建物表面により付着し払拭されにくい。

ii) 局地的洪水

雨樋、排水管、縦樋は湿った灰が詰まった場合危険である。豪雨で屋根からの排水が詰まった場合は水が溜まり、屋根の積載荷重が増加する。灰は地表からの排水を妨げ、水流が火口により近い地域から大量の火山灰と破片を運び、広範囲の洪水を引き起こす恐れもある。

iii) 電気機器 [43]

湿った火山灰は電線や送配電機器に薄い粘着性の層となって堆積するとアーキング、フラッシュオーバー²⁰やショートを起こすに十分な伝導性を持つ。[44]

通常原子力発電所内と周辺には密集して電圧制御、保護、開閉器、変電所などがあり、内部と外部の送電網の接続節となっている。変電所の機器はキャパシタンスのフラッシュオーバーやその他の故障をおこしやすい。それは絶縁体が地面か低い場所にあるからで、局所的な風が渦巻き地面からの影響で灰の堆積や滞留が増加しうる。開閉器とサーキットブレーカーも荒い灰に覆われ、機能しなくなるかもしれない。変電機器もケーシングの冷却フィンが過度の降灰で詰まり加熱する恐れがある。

火山灰降下による電気系統への最も一般的影響は絶縁体のフラッシュオーバーである。これは、発電、送電部品及び配電網の全てで起こりうる。特に、軽度の霧や霧雨を伴う場合である。[45] 送電や配電網や原子力発電所の変電所が故障した場合は²¹、外部電源の喪失につながり、原子力発電所の電気系統は孤立し、敷地内の緊急発電で必要な電力、特に緊急停止後の炉心と使用済み燃料プールの冷却を賄わざるをえない。



FIGURE 12 FLASHOVER

¹⁹ Kyushu Electric state that the allowable superimposed load for the Sendai 原発 nuclear island, emergency generator and other essential services are higher within the range of 4.4 to 9.8kN/m².

²⁰ When dry, ash typically has a low conductivity (high resistivity) to electrical current, but when wetted, the soluble salts on the surface are mobilized and lower the resistivity. Many factors influence flashover potential from volcanic ash contamination, including grain size, soluble salt content, ash fall thickness, shape and composition of exposed components, network configurations and weather conditions before, during and after the event. Because flashover is more prevalent with finer grained ash, failures of the electricity grid distribution and supply systems may occur at distal locations. – see [43] for a detailed exposition on this and related infrastructure topics.

²¹ Experience from impacts of the 1980 eruption of Mount St Helens volcano on electrical networks [44] suggests that transmission networks are generally less vulnerable to ash-induced flashover than distribution networks. Transmission networks (110–500 kV) were able to withstand ash falls of 6–9 mm before serious flashovers occurred. However, on smaller distribution networks (33 kV) and domestic supply voltages (400 V) which received the same thickness of ash, flashovers were a more common problem, leading to sustained power outages of the higher order transmission system for several hours or longer.

火山噴火はかなりの量の水蒸気を大気中に放出する。マグマソースにより、二酸化炭素、二酸化硫黄、塩化水素酸、フッ化水素酸(HF)なども放出される。塩化水素酸とフッ化水素酸は水に溶け、酸性雨となって降下する。一方、二酸化硫黄のほとんどはゆっくりと硫酸エアロゾルになる。湿気を帯びた火山灰に覆われた地表は浸食、腐食しやすい。この作用は比較的ゆっくり起き、直ちに影響は及ぼさないか、ごくわずかである。

酸性雨は肌及び目を刺激し、電気系統の修理、屋根やタンクから火山灰を除去するなどの喫緊の作業に従事する緊急対応の職員の職務に悪影響を及ぼすかもしれない。

iv) 原子力発電所の発電現場

発電現場に対する火山灰降下の一般的影響は変電所におけるフラッシュオーバ(iii 参照)などである。建屋に灰が侵入し精密機械や電子機器などに損傷を与えることもある。水関連のポンプ類、加熱機器、換気 AC システムへの損傷、フィルターやストレーナーの詰まり、長軸屋根の瓦解など構造破壊、そしてその下の床が次々と崩壊する恐れもある。

火山灰降下による潜在的損傷は火山灰の成分と関係する。フィルターの詰まりでは粒子の大きさ²²が特に問題になる。密接に動く機械やポンプを灰が摩損させる場合は粒子の堅さ²³が関係する。ガラスや陶器でできた断熱材など表面に付着する場合は化学的性質²⁴が関係する。水冷却システムに灰が入った場合は凝集と密度が関係する。

具体的には、

1) エアフィルター：建屋及び付帯設備域の換気と浄化

付属 III は典型的な軽水炉(PWR)の建屋の換気及び浄化システム、使用済燃料プールなどの付帯設備、緊急用ディーゼルと取水スクリーンを有する建物を示している。典型的な原発には他にも他の建物やプロセスのための換気調整システムが備わっている。

サイクロン式集塵装置、ポンプ、ファンなど露出している機械の部品や斜行部品に火山灰粒子が侵入し浸食し、ファウリング、オーバーヒート、焼き付きが起こる恐れもある。

付録 III は原子炉建屋の換気(図 1)の例である。浄化やベント用給気、外気混合などのための給気側のフィルターが付いていない。火山灰降下時には灰を含んだ大気が換気と浄化システムに吸い込まれ、ダウンストリームでフィルターや部品が危険な状態になる。特にファウリングや焼き付きの危険があるのが、最大毎分 33,000 立方フィート(毎分~1,000 m³)を処理する建屋の排気ファンである。

²² Tephra particles vary greatly in size, ranging from a mixture of large to small particles near eruptive vents, to very fine particles at long distances. Glass shards of about 2mm equivalent aerodynamic diameter ranging as small as about one-tenth of a micrometer are common in downwind ash in the distal zones.

²³ Of a typical tephra composition: Pumice is a highly voided, mainly of glass low density (0.7 to 1.2g/cm³) composition of about the same hardness of glass at about 5 Moh, a little softer than the blade of a steel knife – Glass shards are of higher density (~2.4g/cm³) at 5 Moh – Lithic fragments are dense (~5 to 7g/cm³) about 7 Moh, equivalent to a high quality steel knife blade – Crystalline Fragments are typically coated with magma glass (~2.5 to 5g/cm³) of about 5 to 7 Moh.

²⁴ Tephra glass and crystalline minerals are relatively inert and decompose slowly under the normal climatic conditions although fragments may be coated with soluble salts and liquid condensates from the eruption – when moist these salts may mobilise to improve the adherence of tephra thin films to smooth surfaces, such as glass and porcelain insulators.

火山灰降下でエアフィルターが詰まるという一般的所見はあるが、原発の特定機能を阻害するようなブロックがどれだけ速く、どの程度おこるかという情報やデータは少ない。これは特定のシステム及びプロセスの空気処理率、換気システムなどによって決まる。エンジン故障を防ぐために4時間ごとに車両のエアフィルターとオイルフィルターを交換するよう推奨する多くの公開文献がある。[46] 米軍は車両用及び静電起電機のエンジンフィルターなどを含む車両のフィルターと換気とコンピュータを交換することには特別な注意を払い、(例えば、火山灰を含む大気は空気平衡機器のバントを通して燃料タンクに吸い込まれる。) 一般に1時間半から3時間の継続的使用毎に交換している。[47]

2) エアフィルター、緊急用ディーゼル発電建屋

ガスタービン、ディーゼル、(外部電源喪失の際必要な)緊急用発電装置などの動作機器、そして気温が高い場所では、例えばディーゼルモーターの排気弁配管とガスタービンの燃焼室、粒子の融合などは吸気カウリング(右図)でのフィルトレーションが必要である。

緊急発電機用のファンで送風する冷却コイルとエンジンの潤滑油は緊急発電用建屋の屋上によく設置されている。冷却コイルとフィン(ラジエーター)への火山灰の堆積から守り、ファンモーターを摩擦と焼き付きから守る必要がある。

1991年以来、米国原子力安全委員会は原発に対し「…活火山の付近にある発電所では IPEEE プロセスの一環として火山活動を評価すべきである」と要求している。[48] この要求は発電所ごとに評価され具体的に説明されている。



FIGURE 13 DIESEL GENERATOR INTAKE
PRE-FILTER COWL

コロンビア原発²⁵の設計基準、「異常事態時における作業手順 ABN-ASH」²⁶では火山灰降下時、電力を下げ、炉を緊急停止し、冷却して冷温停止させるよう指示している。ABN-ASH設計基準では、原子炉停止への条件として、i) 40,000フィート(～12,200m)以上の高さの灰雲が2時間以内にコロンビア原発を通過すると予想され、最大20時間にわたって灰が降下する。ii) 降灰率 0.21 インチ/時間(～毎時0.53cm)以上[49][50]

コロンビア原発を運転するエナジー・ノースウエストに対し NRC から数多くの違反通告があった。緊急発電用の燃焼吸気フィルター違反や、別件では、緊急発電室換気用給気フィルター [51] の違反であり両件とも2基の敷地内発電機を交互に運用するという管理手法上に関する違反である。ただし、ここでの関心は、降灰による詰まりとフィルター交換の頻度である。

²⁵ The Columbia PWR 原発 is about 220km and 165km to the east of the Mount St Helens and Mount Adams volcanoes respectively.

²⁶ Energy Northwest, Abnormal Condition Procedure ABN-ASH ME-02-87-95 – this is not a publicly accessible document although details of which are cited in [51]

燃焼吸気フィルター（例えば、図 13）では、フィルターが詰まるので 2. 3 時間ごとに交換の必要がある。緊急発電室のヒーターと換気と通気のフィルター（付録 III）²⁷は 3. 6 時間ごとに交換が必要である。[5 1]

つまり火山灰が降下したらコロンビア原発は原子力発電を停止し、（仮定上）想定されている 20 時間の灰降下中はずっと停止してはならない。停止中に地域の送電網が火山灰により静電容量超過（絶縁破壊）フラッシュオーバ（または火花放電）などのために故障したら、外部電源喪失状態の原発は各種サービスや炉心と使用済み燃料の冷却用の電源を敷地内の緊急発電機に依存することになる。長引く緊急発電時には、敷地内の二つの発電機のどちらかは燃焼吸気フィルターと室内換気フィルターの交換時には停止させなくてはならない。室内換気フィルターの交換では暫定的な代替フィルターを応急措置として使い、稼働している発電機を保護しなくてはならない。フィルターへの灰の堆積は、不完全燃焼や室冷却通気が不十分なため、非常用ディーゼル発電機の共通原因故障（コモンモード）につながる。

3) 復水器の海水取水口と循環ポンプ 非常時補機冷却水供給とポンプ 緊急用冷却ポンプと補給水ポンプ [5 2]

原発の敷地内各所では大量の水が汲み上げられ、主に通常運転時と緊急時には冷却用にそして事故や異常事態には補給水として様々なプロセスで使用される。



FIGURE 14 A MAIN CONDENSER COOLING PUMP, USUALLY ONE OF FOUR PUMPS

a) タービン復水器の冷却系統

主冷却水はタービンの復水器を冷却するためのものである。タービンから復水器に排出される低気圧蒸気は水に戻される。典型的な 1,000MW（100 万 Kw）の原発の場合、給水流量は排水温度により毎分 2,000 から 2,750 m³の範囲である。

海岸にある発電所では復水器用冷却水は海から直接引いてくる。内陸の場合は川や入り江から引いてくる。どちらも貫流冷却であり熱い復水器の冷却水は取水源に返送される。内陸の原発の中には、復水器に返送し再使用する前に、冷却塔を使い、復水をスレートやルーバーで滝のように流し冷却しているところもある。このような閉ループの冷却塔は自然通風の高い双曲面の塔か、モーター駆動のファンを備えたより小型の塔であり、いずれも冷却過程での多量な蒸発損失を補うため継続的に補給水が必要となる。

復水器などのポンプを駆動する電気モーターも冷却が必要である。通常は密封型の空冷再循環システムで電気モーターのコイルや表面に通気している。表面は二次外気経路で冷却される。詳細仕様にもよるが、この二次経路は、ファンのベアリングに磨耗を起こす火山灰が入り込んだり、火山灰による熱伝導面（一般にはフィン）の詰まりを引き起こし故障しやすい。

²⁷ But note this example does not show ventilation air intake filters – at Columbia the emergency generator room air ventilation filters were in the flow path op the combustion air filters.

- b) 主要冷却給水システム： 原発では重要な設備用の冷却が必要である。原発は立地により適切な近くの内陸の池、海、川など水源から取水する。取水率は季節や周囲環境にもよるが、典型的な 1.000MW だと毎分 150 から 200 m³である。復水器冷却だとこれよりずっと高い率になる。

原発の設計にもよるが、主要冷却給水システムの水は空調設備のチラー、主タービンの潤滑油冷却装置²⁸、空気圧縮機のアフタクーラー、使用済み燃料プールの熱交換器などへ冷却水を送る閉ループ冷却システムのための熱交換器などに送られる。これら主要設備やプロセスの多くは原子力発電所が運転停止となりかなりの時間が経っても、(使用済み燃料プールなど) 冷却の継続を必要とする。

- c) 緊急冷却と補給水： 異常事態の結果、SCRAM(緊急自動停止)とタービンポンプがトリップすると炉心と主要回路に残存した熱は、炉心メルトダウンと放射性物質放出を避けるために迅速に最終ヒートシンク(UHS)に散逸、消逸させなくてはならない。

原発の設計や立地にもよるが、UHS は復水器冷却水を取水、排水する海、川や池を使ってもいいし、フラッシュ蒸発器かスプレーを並べて専用 UHS 池にリサイクルする分離型でもよい。

復水器冷却、主要設備と緊急冷却のために取水する貯水池は火山灰の降下と堆積で汚染されやすい。小囊化した「軽石ラフト」で取水スクリーンが詰まる。主要設備に水を送るポンプにも水とともに灰粒子が流れ込み、可動部品を磨損させ故障させる恐れもある。並んでいる熱交換管に粒子が水で運ばれ、伝熱を損なう恐れもある。

火山灰堆積を考慮した設計の原発において、厳しい環境下でどのように運転を円滑にするのかを扱った公開文献はあまりない。すでに現存しないパターン原発以外で大量の灰が降下したところはない。原発がどうなるのか、運転中の経験はない。

V) 原発敷地内外における関連する影響

火山灰降下やその他の火山活動は広範なインフラを攻撃する。その影響も結果も広範囲で多岐にわたる。

当然、原発への潜在的ハザードの詳細評価は、発電所の設計、給気と給水、立地、スタッフ、緊急対応要員、車両、周囲の環境など立地特有の要因を考慮する必要がある。噴火が時間を置かずに連続して起きて火山灰が降下した場合、状況は数日または数週間かそれ以上続くこともあり、状況は悪化する。



FIGURE 15 RESUSPENSION OF TEPHRA SURFACE LAYERS BY VEHICLES

- a) 原発へのアクセス： 火山灰降下は視野を大幅に悪化さ

²⁸ Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems are essential for a healthy working environment inside inhabited buildings and, particularly, for maintaining critical components of infrastructure in working order. Many electronic control systems cannot function without external cooling, due to the heat generated by internal computers and electron processing – for example, most telecommunication exchange and mobile cell facilities require constant air conditioning. Air conditioners are known to be vulnerable to ash blockage, corrosion and arcing of electrical components, and air-filter and heat transfer coil blockage.

せる。場合によっては完全な闇に近くなる。火山灰に覆われた道路を車両が通過すると、灰は跳ね上がったたり再浮遊し、灰雲が渦巻き、視界が更に悪化する。路上の細かな堅い灰粒子の堆積は、特に灰が湿気を帯びた場合、静止摩擦を低下させる。1mm 以上の積灰は車線などの路上のマークや路肩などを覆い隠す。[53]

空の輸送手段、特にヘリコプターは空気が運ぶ灰がガスタービンのコンポーネントに悪影響を及ぼすため飛べなくなる恐れがある。[54] 国内を移動して来る修理メンテ要員は送配電の故障現場まで行き着かない恐れもあり、原発は LOOP（外部電源喪失）状態となる。

同じように通信機器（空中線、アンテナ、ディッシュ、支柱）にも損傷が起きるかもしれない。過剰な需要で通話ができない状況にもなりやすい。[53] [45]

- b) 原発スタッフが働ける状態にあるか：車が故障したり、道路が通行不可能だったりして、スタッフと緊急対応要員は原発まで来る手段がなくなるかもしれない。更には、専門的な緊急対応要員が他でのタスクを優先されるかもしれない。炉の運転と安全担当の修理保安担当者は、呼吸困難と視力不全のために業務を行えないかもしれない。または、このような緊急時には家族や自宅から離れたがらないかもしれない。

第5章- 川内原発- 火山リスク設計基準

川内原子力発電所

九州電力川内原発には、加圧水型原子炉（PWR）が2基存在する。各原子炉の1次冷却材管は、三菱重工業設計・製造の3ループM型で、それぞれ1984年7月、1985年11月に営業運転が開始された。



FIGURE 16 SENDAI NUCLEAR POWER PLANTS

川内原発は、鹿児島県薩摩川内市（人口約10万人）市街から約12km東の、川内川河口に位置する。

2011年3月の福島第一原発の事故を受け、現在、川内をはじめとした日本の原発は全て運転停止となっている。2014年11月、鹿児島県知事（伊藤祐一郎氏）は、川内原発再稼働に同意した。しかし、原子力規制委員会は、「工事計画」「保安規定」を審査し、さらに「使用前検査」も完了させる必要があるため、川内原発の再稼働は、2015年夏以降にずれ込む公算が大きい。

原子力規制委員会の規制の枠組み – 川内原発の場合

A) 「設計基準」の強化の放棄

先述 (Part I、英語本編 p6) のように、原子力規制委員会は、商業用原発の新しい規制制度を導入した。この新しい制度に採り入れられた、原則的なアプローチは、「実用発電用原子炉に係る新規制基準」および、その付属文書である「軽水炉新規制基準 – 概要」に記載されている。[8]

2013年1月、原子力規制委員会は、次のことを宣言した。[4]

「…特に、福島教訓を十分に踏まえ、設計基準に関する安全基準を再構築する」

「…自然現象に対する設計基準要件に関し、設備の安全度を向上させる…」

さらに、2013年4月の「新規制要件概要（設計基準）」においては、地震以外にも、「火山活動の影響」をも含む「想定され得る自然現象」を考慮に入れた設計基準を確立することが、明確に要件に含まれている。[5]

言い換えれば、2013年時点での原子力規制委員会の新しい規制アプローチでは、火山の噴火といった当然予想されうる自然事象に対し、火山活動予測に基づいた危険度評価から抽出される設計基準パラメータを確認することが求められているということである。さらに、原子力規制委員会が新規制要件（2013年4月）の策定時点で目指していたのは、火山活動を含む様々な自然現象の影響を勘案した「設計基準」を、原発の運転を許可する上での基本的枠組みとして据えるということであったと言い得る。

2013年7月、原子力規制委員会は、一連の安全ガイドを新たに策定および／または増補（付属文書 II、英語本編 p63）したが、その中で、特に興味深いのが、「(1) 原子力発電所の火山影響評価ガイド（案）[以後、火山影響評価ガイドと記す]」である。[7] この火山影響評価ガイドは、「設計基準」アプローチを強く支持する国際原子力機関（IAEA）の火山評価[27]に直接言及しているものの、それ自体としては適切な「設計基準」事例に関するパラメータを設定することに関しては言及していない。

B) 川内原発の原子力規制委員会「火山影響評価ガイド」への適合性

巻末の付属文書 IV の表 A では、一般論として、川内原発に関するこれらの内容（第 4 列）が、原子力規制委員会の新規制要件 [8] にどのように適合する必要があるか（第 2 列および第 3 列）、そして火山影響評価ガイド [7] にどのように規定されているか、（もしくはされていないか）が記されている（第 5 列）。これらの比較は全て、火山事象に基づき、特に火山灰降下に関連して行われている。表 A からは、噴火の影響に関する「設計基準」事例を規定する要件がもはや存在しないことは明白である。新規制の詳細な枠組み、とりわけ、火山影響評価ガイドにおいて、原子力規制委員会が以前確認した「設計基準」アプローチが放棄された理由は不明確である。[7]

2014年9月、原子力規制委員会は、運転停止を余儀なくされた期間に着手された変更および修正を考慮した上で、九州電力川内原発の再稼働申請（本質的に、新規制要件に適合した原発の再稼働申請）の概要 [55] を提示した。この概要には、法的な適用については不明確であるが、「火山の影響に対する設計方針」を具体的に記載した項目 III-4.2.2⁴⁷ が含まれている。この項は、火山影響評価ガイドへの適合についての記述とみなすことができよう。[7]

III-4.2.2 項は、本レポートの主要問題点である火山灰降下よりも、広範な噴火の影響について取り上げている。しかし、そのスクリーニングプロセスや改善策を、原子力規制委員会の特定した9つのステージの枠組みを用いて詳細に検討することは、火山灰降下に関しても適用可能であるという点で意味があると言えよう。この9つのステージは、原子力規制委員会が以前作成した付属文書 I の図 1（英語本編 p62）や、ダイアグラム I（英語本編 p17）に示されているIAEAのいわゆる方法論的アプローチにおおむね対応するとみることができると。[27]

ダイアグラム I を参照すると、原子力規制委員会の特定した9つのステージのうち最初の4つのステージは、IAEAの第1～3ステージに対応している。IAEAの第1ステージである初期評価、第2ステージの火山活動の源の特性、そして、第3ステージの原発の型および発電所からの距離による災害スクリーニングに対応する。（訳注：下記は、原子力規制委員会の特定した各ステージについての説明）

ステージ 1) 川内原発に影響を及ぼしうる火山の特性評価：

原子力規制委員会が規定した基準に基づき、原発の半径 160km 圏の初期審査および、第四紀、そして完新世の火山活動を対象とする。

この比較的粗い初期段階のスクリーニングの結果、原子力規制委員会は川内原発の半径 160km 圏にある活動の可能性のある火山の数を 14 としている。しかし、火山影響評価ガイド [7] ではさらに、火山活動別に適用される（半径 160km より短い）選定距離基準が提示されている - 付属文書 I のチャート I（英語本編 p61）参照。

ステージ 2) 川内原発の運用期間に火山活動が起きる可能性：

ここでは、上記 ステージ 1) で特定された火山の活動の可能性に関する評価報告が含まれる。その際、VEI7 の火山事象が基準として考えられおり、原発原子炉の一次系および格納容器への深刻な損害、壊滅的な放射能放出と非常に深刻な放射性物質による影響が想定されている。その一方で、VEI6 クラスの事象に関しては、川内原発に対していかなる損害も、また放射性物質による影響も及ぼさないと考えられている。

ステージ 3) 火山活動のモニタリング：

モニタリングプログラムは、VEI7 クラスの事象の可能性を予測し、十分に早い段階で九州電力が事前通知を受け取り、原子炉の停止、炉心や使用済み核燃料の川内からの搬出を可能にすることを目的としている。

しかしながら、この原子力規制委員会によるアセスメントプロセスのステージ 2 および 3 だけでは解消することのできない、いくつかの不確定要素が存在する。

- a). まず、VEI7 未満の事象では、原発において放射性物質等の影響は無いという、人為的なカットオフ閾値が設けられている点である。実際、過去の（観測されていない）火山事象の証拠と、VEI 評価との間の明確な関連性は証明されていない。しかも、特に重要なのは、このふるい分けでは大きな噴火の影響（火砕サージ）は、VEI7 では直接的または（および）間接的に原発における損害や誤動作につながると想定している一方で、VEI6 以下の事象においては、正当な根拠の無いまま、川内原発から放射性物質による影響が生じることはないと思われている点である。

表 1(英語本編 p15)と表 2(英語本編 p16)は、VEI に対する原発からの距離との関連における、火山灰降下を含む火山活動の影響のレベルの比較を示したものである。大ざっぱではあるが、この比較によれば、VEI3 から 6⁴⁸ の範囲の事象であっても、原発の運転維持がむずかしいだけでなく、運転を停止した場合でも、原子炉や使用済み核燃料プールを安定させ、冷却することが確実に困難となり、川内原発および、その周辺の土地や海域に影響を及ぼす可能性があることが示されている。

- b). (原子力規制委員会のアプローチでは) ドルイット等 [56] が最近発表した、マグマだまりで異なる珪質が混合しているかどうか観測することで、事象から数か月および/または数年以内の噴火の可能性やその信頼性を予測できるとする研究に過度に依存している⁴⁹。このドルイットの研究は、原子力規制委員会・原子力施設における火山活動のモニタリングに関する検討チームの第 1 回会合での議論の中でもたびたび触れられており、日本での議論や討論の中で広く取り上げられているものである。[57]

フィリピン・バターン原発（核燃料装荷も、運転も行われていない）に関して、この（ドルイット主導の）活火山監視戦略は採用されなかった。もし採用されていれば、最も先進的な確率論的アプローチを[58]無視するものとなっただろう。この確率論的分析は、（フィリピン・ナチブ山に関し）年間に $1.E-4$ から $2.E-4$ まで、噴火の可能性を 95%と算出しており、これは将来、VEI6 の噴火が考えられるとみなすのに十分な根拠を与えたものである。

ステージ 4) 火山活動の影響評価：

火山灰降下以外の噴火の悪影響については、桜島から川内原発までの距離(約 40km)や、1 万 2800 年前に起こった噴出物量約 11km^3 の桜島薩摩噴火規模によってふるい分けがされる。この火山灰降

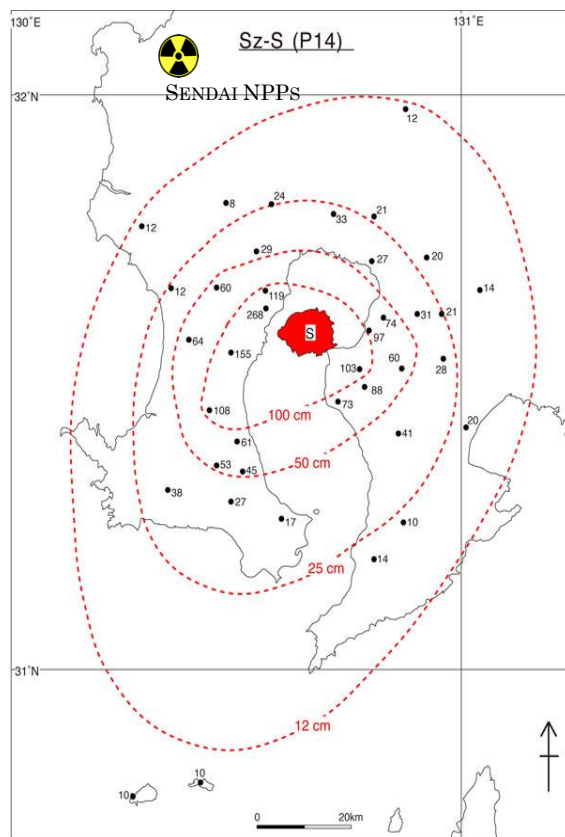


図 17 1 万 2800 年前の桜島薩摩の噴火
- GJS - 火山灰圧縮層記録 cm

下量に関しては、原子力規制委員会によれば、水分飽和時の密度 1.5g/cm³ における過去の火山灰堆積層は 12.5cm またはそれ以下の厚さにとどまるとされている。

噴出物量自体は、前述の桜島薩摩噴火の場合 VEI5 を若干上回る（英語本編 p15 表 1 による）。

火山灰の分散および堆積層の記録は、川内原発の現在の位置、すなわち桜島火道の北西 40km とともに、図 17 に示されている。東西の堆積パターン（cm 単位の厚さの輪郭を点線で表示）は、噴火時および大気分散時、主に北東風だったことを表している。

火山灰の分散・堆積パターン、そして、川内原発への火山灰降下量を理解する際に重要なのは、噴煙の高さや大気条件、とりわけ噴火時の風向きや大気安定度を把握することである。1 万 2800 年前の桜島薩摩の事象については、当然のことながら現存する記録がないため、その結果を絶対値として将来の火山事象に当てはめることはできない。これらのパラメータに比較的小さな変化があった場合でも、そして/あるいはその VEI が徐々に値 6 に近づくようなケースであれば、川内原発の VEI 値や、火山灰の総堆積量はかなり増大する可能性がある。

例えば、今後卓越風が南東の方向から吹いているときに VEI5~6 に相当する事象が発生した場合、図 17 で示した堆積量の輪郭を単に +90 度配置し直すだけでも、川内原発が 25~35cm 相当の火山灰層に埋もれる可能性があることがわかる。しかしながら、火山灰への対処のために必要な設備や人員の割り当てを決定する際に不可欠な知識であるにもかかわらず、先述のように、歴史的記録を参照しても、火山灰の堆積量やその層の厚さに関する情報はほとんど得ることができない（英語本編 p10 参照）。

これ以降の原子力規制委員会の特定したステージ 5 からステージ 9 は、全体として IAEA 方法論の最終段階である、原発特有の危険の評価に対応する。

ステージ 5) 火山活動の影響に対する設備の防護：

原子力規制委員会では、このステージにおいて、九州電力が既存の安全ランキングシステムのクラス 1、2 および 3 を用いて安全設備を評価し、また必要に応じ修正するよう求めている。

ステージ 6) 火山活動による直接・間接的影響への対処：

上記ステージ 5) への適応として、九州電力が噴火時および噴火後の原発の安全性能に直接的に影響を及ぼす事項（フィルターの目詰まり等）や、間接的に影響を及ぼす事項（原発への車両のアクセスや、外部電源喪失等）を特定するよう求めている

ステージ 7) 設計荷重の決定および設定：

これには、火山灰層の堆積に関連し、屋根やタンク、その他のむき出しの構造物、そして同様に、火山灰の降灰および/吸引にさらされる部品に対する静的積載荷重の設定が含まれる。九州電力は、原子力規制委員会に提出した報告書 0035-13/14

の4-2-4項で、設計荷重その他の影響について要約している。[59]

表4：《4-2-4》直接的影響の評価結果 [59]

評価対象施設	確認結果	備考
原子炉建屋、原子炉補助建屋、燃料取扱建屋、ディーゼル建屋、主蒸気管室建屋	降下火砕物堆積荷重は3,000N/m ² であるが、建屋の許容堆積荷重は4,000N/m ² 程度以上であり、安全性への影響はない。また、外装塗装がなされていることから、降下火砕物により化学的腐食により直ちに機能に影響を及ぼすことはない。	1
復水タンク、燃料取替用水タンク	降下火砕物堆積荷重について応力評価を行った結果、屋根及び脚は健全であり、機能に影響を及ぼすことはない。また、外装塗装がなされていることから、降下火砕物による化学的腐食により直ちに機能に影響を及ぼすことはない。	2
海水ポンプ	降下火砕物が堆積した場合に厳しい条件となると考えられるモーターフレームにおいても発生する応力に対し十分な裕度を有しており、機能に影響を及ぼすことはない。また、外装塗装及び防汚対策塗装がなされていることから、外面、内面及び水循環系ともに降下火砕物による化学的腐食により直ちに機能に影響を及ぼすことはない。ポンプ軸受には異物逃がし溝を設けており、降下火砕物による軸固着等には至らない。電気系及び計装制御系について、海水ポンプモータは全閉外扇型の冷却方式であり降下火砕物の侵入はないため、機械的及び化学的影響はなく、冷却管についても閉塞することはない。	3
主蒸気逃がし弁（消音器）	大気開放部には消音器が設置され、配管形状及び消音器の構造から降下火砕物が直接配管内に侵入し難い構造であり、仮に直接配管内に侵入し配管を閉塞させた場合でも、降下火砕物の荷重より主蒸気逃がし弁の吹出力が十分大きいことから、機能に影響を及ぼすことはない。	4
主蒸気安全弁（排気管）	主蒸気排気管は、配管形状により降下火砕物が直接配管内に侵入し難い構造であり、仮に直接配管内に侵入し配管を閉塞させた場合でも、降下火砕物の荷重より主蒸気安全弁の吹出力が十分大きいことから、機能に影響を及ぼすことはない。	5
タービン動補助給水ポンプ（蒸気大気放出口）	タービン動補助給水ポンプの蒸気大気放出口は、降下火砕物が進入し難い構造であり、機能に影響を及ぼすことはない。	6
非常用ディーゼル発電機（機関、消音器）	機関の吸入空気の流れは、降下火砕物が侵入し難い構造であり、また、層状フィルタにより降下火砕物が捕集されること、及び侵入した場合でも降下火砕物の高度が低く破砕しやすいことから、機能に影響を及ぼすことはない。	7
換気空調設備（給気系外気取入口）	換気空調設備の外気取入口には平型フィルタが設置されており、降下火砕物が外気取入口に侵入した場合であっても、平型フィルタの除去効率は85%（中径径の範囲が6.6～8.6μm）以上であり大部分の降下火砕物が除去されることから、給気系を供給する設備に対して、降下火砕物が影響を与える影響は小さい。なお、中央制御室空調系については、外気取入口ダンパを閉止し、外気隔離運転することにより、中央制御室の居住性が維持されることを確認している。また、各フィルタについては、タービン建屋等からのアクセス性がよく、必要に応じて清掃及び交換することにより除灰ができることを確認した。	8
補助建屋排気筒格納容器排気筒	補助建屋排気筒の排気速度は降下火砕物の降下速度を上回っており、降下火砕物により閉塞することはない。また、外装塗装等による対応を行っていることから、直ちに腐食により排気筒の機能に影響を及ぼすことはない。	9
取水設備	降下火砕物の粒径は十分小さく、除塵装置を閉塞することはない。	10
海水ストレーナ（下流設備を含む）	降下火砕物の粒径は、ストレーナのメッシュサイズよりも小さく、閉塞することはない。なお、ストレーナのメッシュを通過した降下火砕物の粒子は、下流の機器（非常用ディーゼル機関の冷却器、空調用冷凍機、原子炉補機冷却水冷却器）に対して閉塞等の影響を与えることはない。また、外装塗装がなされていることから、直ちに腐食により機能を喪失することはない。	10
タンクローリ	燃料の輸送開始までに約24時間の余裕がある。また、外装塗装がなされていることから、直ちに腐食により機能を喪失することはない。必要に応じてエアフィルタ等の清掃を行うことで降灰後も使用可能。	10

さまざまな建屋構造物（平屋根建屋およびタンク屋根）への火山灰降下による静的積載荷重も、報告書 0035-13/14 に記載されている。[59]

表5：直接的影響の評価結果；個別評価1 - 原子炉建屋、原子炉補助建屋、燃料取扱建屋、ディーゼル建屋、主蒸気管室建屋（ハイライト部分は筆者による）[59]

表 降下火砕物に対する建屋の評価結果※1

評価対象施設	評価部位※2	許容堆積荷重※3 N/m ²	降下火砕物堆積荷重 N/m ²	裕度	結果
原子炉建屋	1号機	屋根スラブ（ドーム部※4）	3,000	2.07	○
	2号機	屋根スラブ（ドーム部※4）		2.07	○
原子炉補助建屋	1号機	屋根スラブ		2.70	○
	2号機	屋根スラブ		2.70	○
燃料取扱建屋	1号機	屋根スラブ		1.70	○
	2号機	屋根スラブ		1.47	○
ディーゼル建屋	1号機	屋根スラブ		3.27	○
	2号機	屋根スラブ		2.70	○
主蒸気管室建屋	1号機	屋根スラブ		3.27	○
	2号機	屋根スラブ		2.70	○

※1 川内原子力発電所の立地地域は、建築基準法施行令に基づく地震荷重と積雪荷重の組合せを要しない地域であり、降下火砕物の堆積は積雪頻度と同程度以上であることから、地震荷重との組合せは考慮しない。ただし、降下火砕物の除灰作業による堆積荷重の低減は速やかに実施する。
 ※2 条件の厳しい（設計時考慮荷重（積載荷重、自重）が最も小さい）スラブを代表部位として評価した。
 ※3 降下火砕物堆積荷重は短期荷重として評価した。（短期許容応力度設計における長期荷重を差し引いた荷重を許容堆積荷重とした。）
 ※4 ドーム中段には凹凸が無いため、屋根勾配により灰が端部に流れても、ドーム中段に灰が集中して堆積することはない。また、ドーム中央部から端部に灰が流れた方が応力は小さくなるが、評価においては等分布荷重とした。

ステージ 8) 火山灰の直接的影響を抑制・軽減する手順：

2014 年 3 月の原子力規制委員会の質問書に対し、火山灰の堆積（およびフィルターの目詰まり等）に対処し、除去する措置として九州電力が回答したものの。

火山灰層の除去に関し、九州電力は、合計で 18,400 m²となる原子炉建屋、外部タンク（復水および燃料取替用水タンク）、平屋根区域に関してのみ影響評価を行なっている。その際、共通のタービン建屋やディーゼル発電機、総合管理事務所の広い平屋根や、建物内部、オフサイトの変電所は含まれていない。こうした平屋根や空き地の面積は約 10,000 m²にもなり、その負荷容量や機能面から（除灰の）優先度が高いため、当然対応人員を割くことが必要となる。

九州電力の火山灰層除去分析は、層の厚さを最大 15cm に限定している。九州電力の分析によれば、作業員 2 人 1 組のチームで 1 日 6 時間（休憩 2 時間）作業した場合、除去するのに、実に 263 日間かかることになる。ということは、15 チームで火山灰を除去する場合、18 日間かかり、30 チームが 1 日に 2 つのシフトのいずれかで作業した場合でも、9 日間程度かかるということである。九州電力の分析に含まれない建屋など 10,000 m² を考慮に入れた場合、火山灰の除去に、それぞれ約 405 日間、28 日間、14 日間かかる計算となる。

これらの大まかな除去時間には、一定の区域への道路や通路へのアクセスを確保や、風にさらされた吹きだまりの火山灰の除去、配電・変電ヤード、海水取水口スクリーン等を覆った火山灰除去のための追加の作業や遅れ等は含まれていない。そして更に、こうした作業のために必要な相当数の作業員を追加で集め、原発に派遣した後、比較的危険で厳しい環境での仕事に向けて彼らを組織し、必要な装備をさせることなども考慮には入れられていない（最大 60 名、あるいはそれ以上の作業員や監督者）。

実のところ、火山灰除去作業のアセスメントにおいて九州電力はいささか楽観的なようである。例えば火山灰除去方法は、雨水を吸った火山灰の「粘性」により、堆積層から取り出したものを手押し車に載せ、またそれを降ろしてという作業をを繰り返すことに多大な労力が必要になるにもかかわらず、その点を考慮しているようには見えない。作業面は滑りやすく不安定な作業を強いられて、輸送に長い時間がかかる。そして、火山灰の降灰が続けば作業灯が役に立たず、ますます仕事が遅れることになる。火山灰除去作業をさらに阻害するこれらの要因を考慮した場合、作業員 2 人 1 組のチームを組み、30 チームで働いたとすると、九州電力の評価では、14 日間で終わるとしているのに対し、公開されている英国の仕事率データ[59]によれば、約 29 日間が必要とされる。

九州電力の分析におけるもう一つの仮説は、1 万 2800 年前の桜島薩摩の噴火の際、降下した火山灰の厚みは最大約 30cm という記録が残っているにもかかわらず、その想定を 15cm までとするというものである（図 17 の再配列を参照）。火山灰を除去せず、その層厚が 30cm になった場合、最も脆弱な屋根である、1 号機・2 号機の燃料取扱建屋で、それぞれ x1.18（設計余裕 0.85）、x1.4（同 0.73）の係数分、設計荷重を超えることになる。

最後に、九州電力の予測は、火山灰降下が止まることを前提として分析がなされている。しかし、火山灰降下が収まらず、さまざまな平屋根やタンク区域における火山灰層の厚さが許容荷重あるいは構造限界に近づくか、達した場合（表 5、第 4 列「許容堆積荷重」参照）、堆積速度に追いつくよう、火山灰の除去を行わなければならない。

例えば、1980 年のセントヘレンズ火山の噴火の際、そこから 50km 離れた地域での火山灰降下速度が 1.3cm/時と報告されたが、28,000m² に及ぶ屋根全体の火山灰除去が遅れないようにするには、最低でも作業員 2 人 1 組のチームで、7 チームを連続して配置する必要があった（火山灰降下が続いた状態において）。実際に、原発の敷地全体で適切に火山灰を除去するには、屋根の区域があちこちに分散しているため、24 時間を 3 シフトに分けたとして、それぞれの時間帯に 7 チームが 2 グループ必要になり、実際に動作業員の数は合計で最大 42 チーム、人数にして約 80 ~90 人となる。

火山灰の降下が続く、特に降雨時等の条件下では、高い屋根の上で、視界が悪い中、足元が滑りやすい状態のまま、どろどろした重い火山灰を除去する仕事は、作業員にとって非常に困難で、危険なものになり得る。

ステージ 9) 7 日間の外部電源喪失(LOOP)への対応 :

これには、発電所内への復旧機器の搬入および維持のためのロジスティクスが含まれている。その目的は、不可欠な安全システムを確立し、炉心や使用済み核燃料プールの冷却を可能とするための、発電所外の可動式非常用発電機と発電所内の非常用ディーゼル発電機の復旧による中断のない十分な電力供給の確保である。

機械やフィルターを火山灰から保護するとともに、地表面や重要（構造）表面への火山灰の堆積を管理可能なレベルに抑えるために適切な措置を取ることが、外部電源喪失下での発電所内全交流電源喪失を回避するために必要不可欠な条件である。

表 2（英語本編 p16）およびある程度の推論により、川内原発に関し、主要な火山灰降下設計基準パラメータを作成することが妥当である。

表 6 : 川内原発の設計基準パラメータ（降灰のみ）

規制機関 (原発名)	所在地	事前の警告	雲柱の高さ	原発の設計基準パラメータ		
				降灰の期間	降灰率	外部電源喪失期間
日本・原子力規制委員会 (川内原発)	桜島から西に 40km	特定なし、Druitt の想定では数カ月から数十、数百年	特定なし	特定なし	降灰率の特定なし、火山灰層の厚さは 12 から 15cm と設定	7 日（開始のタイミングは不明）
					1 時間あたり	

米国原子力規制委員会 (コロンビア原発)	セント・ヘレンズ山から東に220km, アダムズ山から東に165km	2 時間	12,000m 超	20 時間	0.53cm 超、火山灰層全体の厚さは10.60cm - 降灰期間は20 時間	火山の噴火発生から2 時間
-------------------------	------------------------------------	------	-----------	-------	--	---------------

表 6 の最終行には、米国のコロンビア原発に関する主要な火山灰降下設計基準パラメータが示されている。コロンビア原発の設計基準として特定され、採用された火山灰のハザード(危険)は、220km の距離(セントヘレンズ火山の噴火の場合)での最終火山灰堆積降下速度が 0.53cm/時であると仮定される。一般原則として、火山灰層の堆積厚、すなわち火山灰の降下速度は火口に近いほど高くなるので、川内原発と桜島との距離に相当する 40km での降下速度はかなり速いものとなるだろう。

コロンビア原発の場合、異常事態対応手順 (Abnormal Condition Procedure) ABN-ASH 発動にあたっては、管理された状態で原子炉を停止させ、その際、原発は発電所外の電源や外部電源の喪失に備えなければならないとしている。この準備状態において、コロンビア原発の非常用ディーゼル発電機は、発電所外の電力供給が不可能になった場合、作動して発電所内の電力需要にすぐに応えることができる。前述のように、セントヘレンズ火山の火口から 220km に位置するコロンビア原発では、各ディーゼル発電機の吸引フィルターの目詰まりを 2.3 時間ごとに交換する必要があるが生じる。同様に発電室の吸気フィルターも、3.6 時間ごとの交換が必要となる。

上記ステージ 7 の九州電力川内原発のアセスメントの場合、非常用ディーゼル発電機格納容器の換気用エアフィルターを交換するという条項はないが、九州電力によれば発電機の吸気フィルターに関しては、2 つのフィルターを切り替えて使用するタイプの発電機を、連続使用 26.5 時間ごとに(コロンビア原発のケースでは 2.3 時間である) 8 名の人員により 2 時間の作業時間をかけて交換することになっている。しかしながら、このフィルター交換時間予測の基準については[61]、大気濃度 3,241 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2010 年のアイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル噴火時のデータを採用)を想定しており、12~15cm の火山灰降下の際の降灰率は反映されていない。また、川内原発に到達しうる火山灰のサイズについての具体的な検討や、過去にも実際に観測されたような(図 17)火山灰排出の増大と東風が同時に発生した場合に起こりうる高濃度火山灰降下の影響についての検討などもなされていない(例えばフィルター交換頻度の増大など)。

C) 原子力規制委員会の規制枠組みにおける標準的コンプライアンス

表 7 は、米国原子力規制委員会 (NRC) [35] が通常使用する標準的なパラメータ(第 2 列)の要約で、より一般的には、原発の立地審査に関し IAEA が伝え、勧告する内容である [27]。本レポートに関しては、他の噴火の影響よりも、火山灰降下に重点が置かれている。

表 7：原発の敷地における火山災害審査の要約（降灰のみ）

項目	設計基準審査パラメータ ⁵¹	記載元	
		火山審査ガイド [7] の 原子力規制委員会要約 (川内原発審査書) [55]	火山審査ガイド [7]
1	爆発性噴火が火山灰の降下をもたらす火山の噴火履歴	○ III - 4.2.2. -1(1)	○ S2, 3.1, 3.2, 3.3
2	過去 2000 年, 1 万 5000 年, 10 万年の期間内に《項目 1》に類別された火山の爆発性噴火の頻度	○ III - 4.2.2. -1(2) 第四紀についても言及	○ S3.1, 3.2, 3.3 (1),(2)
3	発電所内と発電所から 50km 内の地域における降灰の層序記録	○ III - 4.2.2. -4(1)	○ S6, S6.1(1a - 直接的影響), S6.1 (1b - 間接的影響)
4	様々な量の火山灰層モデルの厚さプロットと距離の対比に基づく、発電所における凝縮されていない状態の火山灰の厚さの推定範囲	○ III - 4.2.2. -4(3) データは 1 万 2800 年前の薩摩での出来事に甚だしく依存して推測されたものであり、厚みについては一重のみ	X 特定の要件なし
5	発電所における 1cm, 10cm, 1m の降灰確率（年間）	X データは 1 万 2800 年前の薩摩でのたった一度の出来事より導かれたものである	X 特定の要件なし
6	発電所における予想される最大の降灰の厚さ	○ III - 4.2.2. -4(1) 飽和 12~15cm	X S6 - 表 1, 発電所付近の過去の火山灰堆積のデータに依存している
7	発電所における上層風の風向きの頻度と速度	X	X 特定の要件なし
8	発電所における《項目 1》に類別された火山から出る灰の予想される粒子サイズの範囲	X	X 特定の要件なし
9	組成、粒子サイズ、湿度の含有量をふまえた、火山灰の密度（濃度）の範囲	○ III - 4.2.2. -4(3)	X 特定の要件なし
10	《項目 4, 6, 8, 9》を用いて導いた、火山灰によるシステムへの推定負荷、および、風により漂流する火山灰の影響	○ III - 4.2.2. -6(1), -7 非常に限られており、漂流についての記載もなし、また、屋根は手作業での除灰を想定している	○ S6.1(2) 直接的影響
11	火山灰の蓄積率の範囲、降灰期間、および、火山灰により視界が悪く／暗くなる期間	X	○ S6.1(2) 直接的影響
12	諸火山の噴火による火山灰が発電	X	X 特定の要件なし

	所に降下する時間帯幅		し
13	火山の爆発による大気の衝撃波の影響	X	○ S6.10(1) 定量化されていない
14	風や水による火山灰の再堆積と堆積後の浸食についての予想されるパターン、および、発電所における別のプロセス	X	X 特定の要件なし

表7の第3列には、火山影響評価ガイド [7]に従って九州電力が提出した報告書に関する、原子力規制委員会の要約 [55] の際立った特徴が示されている。第4列には、火山影響評価ガイド [7]の主な特徴(要件)が示されている。そして、第2列にあるのは、ホブリット(Hoblitt)等 [35] が規定した標準的な前提条件で、基本的に、火山の危険やリスク評価に対する米NRCのアプローチや、原発の立地の基準を示している。

巻末の付属文書IVの表Aに示されている一般的事例に見られるように、川内原発に関して言えば、新しい(2013年6月の)火山影響評価ガイド [7]が設計基準目標を達成していないことは、表7からも明白である。これは、基本的に対応や軽減措置に関しての評価の枠組みを1万2800年前の過去1回の火山事象からのみ確定的に導き出しているためである。

原発立地評価に関するIAEA SSG-21の方法論と火山影響評価ガイドのさらなる比較については、(訳注:筆者が2015年1月に執筆した)「意見書」で参照可能である。[62]

火山災害は、幅広い範囲や規模、マグニチュードで発生する。火山災害とリスク評価のスクリーニングプロセスにおいて決定論的アプローチと確率論的アプローチの両方を使うことは可能であり、実際に使われてもいる。端的に言うと、決定論的アプローチは、閾値を設定して、さらなる検討は加えずに、特定の現象を取り上げる。反対に、確率論的アプローチは特定の火山現象が起きる可能性(および放射性物質放出の原因となり得る他の原発設計・立地要因)を予測する確率関数を展開する[63]。原子力規制委員会は、火山活動やその影響を審査のために抽出するため、決定論的かつ、人によっては恣意的とも感じられ得る数値(例えば、英語本編 p61 付属文書Iのチャート1にある160kmおよび他のカットオフ距離)を採用している。

表7の川内原発の評価の大部分で使われているものと同様、決定論的アプローチは、意思決定の基準の透明性を示す可能性はあるものの、現存する地質学的証拠に依存するため、過去の事象の数は限られ、物理的な記録も不足していることから、スクリーニングの基準を開発する上では困難な場合が多い。

過去の事象の数や特徴における大きな不確実性は、意思決定の際の基準として、極端な事象に依存したがるような決定論的アプローチへと駆り立てる。

しかし、確率論的アプローチならば、例えば、不完全な地質学的記録に起因する不確実性を加味し、さまざまな自然変動を考慮に入れた上で、不確実性をも複雑な自然事象の知識に組み込むことができる。設計基準の決定や、必要な設備や手続きの修正の確認、そして、立地

適合性の決定は、こうした蓋然性分布の分析から導き出される。[64] [27]

評価の初期段階で、原発での火山災害の可能性が確実性のある外的事象とし確認されれば、原発で発生し、その安全な運転や停止状態に影響を及ぼし得るこれらの事象に対応する設計基準を導き出す作業は必然的にそこから導き出されるものである。いったん規定されれば、蓋然性に基づく設計基準の事例により、設計基準を超えた事象に対しても理解を深め、準備を進めることが可能になるのである。

川内原発等の既存の原子力施設では、当初の設計基準の変更、あるいはそれに対する追加や、火山災害を考慮した規制要件の変更は、当初の設計特性に大きな影響を与え、ひいては設備や運転手順にも重大な変更を要求し得る。そうした、噴火の影響に対する設計基準を満たすための変更を行う場合、それらが規定されている原発の他の安全機能や安全性を犠牲にするものであってはならない。

九州電力による、新しい原子力規制当局である原子力規制委員会への報告書は、同委員会が要約しているように [55]、原発に対する火山活動の影響に関して、体系化された包括的な評価を導入する初の取り組みが必ずしも全て成功しているわけではないことを示している。

47. Section III-4.2.2 -about 8 pages of Japanese kanji writing characters.

48. Of course, VEI 7 and 8 events are so severe effects, being continental and global in scale, that the radiological impact of one or more NPP failures might be considered relatively insignificant compared to the widescale environmental and human loss likely to be encountered.

49. The Druitt, et al 2012 work[56] examines the pre-eruptive processes occurring in the magma reservoir of a past (17th C) eruption of the Santorini Volcano in Greece. It evaluates the timing for changes in silicic crystals in the magma reservoir of a volcano perched on the edge of a caldera-forming eruption. For the Santorini volcano a recharge of and increase in volume (by at least a few km³) of the magma reservoir with a silicic magma is shown to have occurred rapidly (at >0.05km³/y compared to typically ~0.01km³/y) during the relatively short and transient volcanic timescale of about 100 years prior to eruption following an 18,000 year gestation period since the previous major eruption. However, the authors of this innovative work acknowledge that it is based on a limited study of a single volcano; that the high magma reservoir recharge rate of 40 to 60km³ requires a low viscosity melt and very efficient mixing at a high convective Reynolds No; and, amongst other things, that the addition of a few km³ of magma into the reservoir would require a significant total uplift of tens of meters, at an average rate of ~1m/y over 100 years, compared to observed rates of sustained uplift of 0.15 to 0.2m/y (Iwa Jima caldera), so the absence of such significant caldera uplift means that the accommodation of the reservoir growth has to be by an equally rapid rate of subsidence or down-sagging, which is not readily detectable.

付属文書 IV

表 A 原子力規制委員会の新たな規制要件の抜粋と分析（火山に関連する項目のみ） [8]

項目/問題	要件など	筆者コメント	火山ハザードとして川内原発に適用されるか	新たな「火山評価ガイド」[7]における論点
-------	------	--------	----------------------	-----------------------

第1ページ 2011年3月の福島第一原発事故以前の規制制度で現存するもの

事故の認識	シビアアクシデントの特定	外部事象および自然現象について、その重大度と範囲・変動性を特定し明らかにすることが行われてこなかった、またブラックスワン事象が無視されていた。	2013年7月以前は、川内原発の原子炉と使用済み燃料プールに適用。それ以降は、使用済み燃料プールについては適用が継続している。	福島第一原発事故以前には、規制当局である原子力安全・保安院（NISA）と原発事業者の双方は、JEAG-2009 およびIAEA[64]の火山影響ガイドを遵守していたかもしれないが、例えそうであったとしても、原子力規制委員会は彼らの個別の取り組みの徹底について真摯に取り組まなかったとした [4]。
事業者の責任	深層防護によるシビアアクシデント対策	火山事象の影響を含めて、特定の予見可能な極端な事象に対する備えが行われなかった。	上記の通り－規制当局は対策を義務づけず、事業者は実施しなかった。	上記の通り
火山ハザード評価	リスクとハザード評価	火山事象のリスク評価は実施されてこなかった。	上記の通り－規制当局はリスク評価を義務づけず、事業者は実施しなかった。	上記の通り

第2ページ 2012年6月以降の新たな規制制度

適用	シビアアクシデント	シビアアクシデントを対象に含め、既設にさかのぼって適用され、2013年7月8日に施行された。	適用－川内原発から40km内の遠近距離圏内に将来活動の可能性のある火山が存在する	項目5.5.1は「発電所の設計限界」に言及しているが、その限界を質的にも量的にも規定していない。同様に第6節では、火山による影響が原発の「設計限界」を超える場合にはさらに火山評価を実施すべきことが規定されているが、発電所の限界がどのように定まるかは示されていない。
火山事象	将来における発生、軽減、対策	事業者は、将来における火山事象の発生を想定する。原子力安全文書には、重大な火山事象に対する措置が含まれていなければならない。	適用－様々な火山影響の中でもとりわけ大量の火山降下物を生成している、地域で最も活発な火山である桜島の40km圏内に川内が位置していることは、原発の安全性に影響を及ぼす危険要因であり、長期間にわたって噴火が連続した際はとくに危険度が高い。	項目3.3.3.(1)は、完新世における活動履歴がある火山を「将来活動の可能性のある」火山と見なすことを規定しているが、将来（原発の耐用期間）において火山活動が発生しないと評価されており、理論上の火山活動が、第四紀中のあらゆる時点に見出されるのと同様の火山粉砕物堆積層深度を伴って発生することが想定されている。
バックフィット	認可されている既存の原発	最新の規制要件を満たすため、既存の原発に対しバックフィットを実施する。	適用－川内原発1号機・2号機の両方に適用される。	項目1.2は、既存原発への適用を規定している－「IAEA SSG-21 安全指針」は、既存原発に遡及的に適用される点について言及している。廃炉の期間中に「火山評価ガイド」とハザード評価が適用されるか否かは明確にされていない。

第5ページ 新たな規制制度の原則

コンセプト原則	深層防護および設計基準	自然現象（火山）への対策の大幅な強化。	原則的には適用、しかしながら各火山影響の危険性に対する「設計基準」の定義は不明である。	原子力規制委員会「火山影響評価ガイド」全体を通して、「設計基準」への言及は「総則」の項目1.1におけるものが唯一である－「評価ガイド」で言及されている一般社団法人日本電気協会による指針（JEAG 4625）は、新規原発の立地選定に適用される[65]。
深層防護	深層防護の徹底	多層かつ複数の防護対策を講じる。	原則的には適用、しかしながら各火山影響の危険性に対する「深層防護」の	「火山影響評価ガイド」では、深層防護に対する言及あるいは定義が行われてい

設計基準	強化された設計基準	共通要因故障を防止するために、自然現象（火山）に対する保護対策を講じて設計基準を大幅に強化する。	定義は不明。 原則的には適用－川内原発を対象として一連の設計基準事象を確立することが可能であると考えられる。 すなわち各火山災害について、その可能性と火山爆発源からの距離によりスクリーニングされなかったものに対応する「設計基準」限界と条件（すなわち対策あるいは緩和行動、もしくはその両方）を設定する－設計基準の一例として、屋根構造の安全積載荷重（15cm）に相当する火山灰堆積を屋根から除去する対策へのリソース供給が挙げられる。	ない。 項目 6.6.1 は火山降下物を取り上げており、外部電源喪失をはじめとする直接・間接の影響を広く特定しているが、きわめて一般的なやり方ではなく、設計基準を定める際の限界あるいは条件についてはなら規定していない。
性能要求	各原発・施設に特有	事業者は、各原発に個別に適合した適切な設計を実施し、手続き上の対策もしくは緩和策、あるいはその両方を講じるよう義務づけられる。	適用－以下の一般領域における設計上の修正と改善は、川内原発において要件とされる可能性が高い（飛来した火山降下物に関連する項目のみ）： a) 降下火砕物の堆積荷重： i) 平屋根 ii) 側壁の荷重 iii) 外部タンクのカバー iv) 装置のカバー b) 降下火砕物による目詰まりと閉塞 i) 雨樋、排水路 ii) 主海水取込口のスクリーンおよびラック iii) 炉心補助冷却海水系 iv) 炉心補助冷却系 1) 海水ポンプ 2) 熱交換器 v) エアフィルターと冷却器 1) エアコンディショニング 2) 換気装置 vi) 非常用ディーゼル発電機 1) 吸引フィルター 2) 屋内フィルター 3) 主エンジン冷却コイル 4) 潤滑油冷却コイル c) 降下火砕物による摩耗と焼き付き i) 機械類とポンプ ii) 主蒸気がし弁 iii) タービン発電機冷却ポンプ iv) 外部電気開閉装置 d) 吸水時に被膜状となった降下火砕物による絶縁破壊 i) 変電所構内 ii) 敷地外での送電・配電網 e) その他	火山降下物の影響、および火山降下物を克服もしくは緩和する、あるいはその両方を達成するために必要なリソースについては項目 6.6.1. (1)、(2)、(3) で検討されているが、詳細に及ぶものではない。しかしながら、外部電源喪失の可能性については、その開始および継続時間が厳密な境界と条件の面では詳述されていないものの、認識はされている。 火山灰除去、フィルター交換、その他の人手を要する作業に必要な人的資源に関する要件は含まれていないが、これらは総体として非常に大規模なリソースを必要とすることになる可能性がある。原発立地への人員輸送が高度の火山降下物と灰堆積により困難となる場合は特にそうである。 敷地外の救急サービスの提供については規定が存在しない－敷地外の救急サービスが、他のところでも必要とされ優先される場合は、とりわけこうしたサービスを利用できるかどうか問題になりうる。

第 6 ページ シビアアクシデント対策、テロ対策における基本方針

冗長性	最重要設備の強化	常設設備の信頼性向上のため、ディーゼル発電機のトラックへの搭載などの移動式設備を配置する。	適用－長期の外部電源喪失が発生した場合に備えて、移動式発電機一式を原発敷地外の所定位置に移動させることが要求される－不慮の事態において川内原発へのケーブル接続が確立されるか否かは不明。	項目 6.6.1. (1) (b) および 6.6.1. (3) (b) で長期の外部電源喪失が考慮されている点以外、具体的な規定は存在しない
-----	----------	---	--	---

第 7 ページ 設計への考慮とその他の自然現象の想定と対策の強化

共通原因	設計基準	設計上の考慮と設計基準へ自然現象を含む	適用－火山から発生する飛来物に直接関係する多数の要因を伴う共通原因	特記事項なし。
------	------	---------------------	-----------------------------------	---------

		める。	因故障の可能性、例えば、とりわけ敷地内外に配備された臨時の移動式発電機一式のフィルターの目詰まり。	
--	--	-----	---	--

第 8 ページ 従来の基準と新基準の比較				
自然現象	自然現象に対する考慮	自然現象に対する考慮が新たに義務化された	適用 – 原子力規制委員会による火山影響に関する新規指針では、この自然現象に対する考慮が義務づけられている	火山降下物をはじめとする自然現象一般に対する考慮が含まれている。

第 13 ページ 共通原因と設計基準				
自然現象	共通原因と設計基準 第一ステージのスクリーニング	共通原因故障への対策強化として個別に適合した設計基準を策定する	適用 – 原発の 160km 圏内を火砕流や火山灰の調査範囲に設定し、事業者に対しあらかじめ適切な防護措置を講じることを要求。	特記事項なし。

参考文献

- [1] Coppersmith K J, et al. 'Probabilistic Seismic Hazard Analysis using Expert Opinion: An Example from the Pacific Northwest', Neotectonics in Earthquake Evaluation, Reviews in Engineering Geology, Geo Soc Am. 8, 29-46, 1968
- [2] American Society of Mechanical Engineers, 'Forging a New Nuclear Safety Construct: The ASME Presidential Task Force on Response to Japan Nuclear Power Plant Events', June 2012 - www.tinyurl.com/8p2njby
- [3] The National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, 'Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission', July 2012 - https://www.nirs.org/fukushima/naic_report.pdf
- [4] Nuclear Regulation Authority, 'Overview – Draft New Safety Standards for Nuclear Power Stations' 原子力規制委員会 Japan, January 2013 - https://www.nsr.go.jp/english/data/new_safety_standards.pdf
- [5] Nuclear Regulation Authority, 'Outline of New Regulatory Requirements (Design Basis)', April 3, 2013 - https://www.nsr.go.jp/english/data/new_regulatory_requirements1.pdf
- an earlier version of this draft is dated 6 February 2013 but this, apparently, is the version before amendment by the ongoing separate study team(s).
- [6] Kudogh, Fumio, 'New Regulatory Requirements and Regulatory Guides and Their Implications for Site Safety Evaluation', IAEA/ANSN Regional Workshop on Essential Knowledge of Site Evaluation Report for Nuclear Power Plants, Kuala Lumpur, Malaysia, August 2013 - <https://ansn.iaea.org/Common/Topics/OpenTopic.aspx?ID=13016>
- [7] Nuclear Regulation Authority, 'The Assessment Guide of Volcanic Effects to the Nuclear Power Plant (Draft)', 3 June 2013 – in Japanese.
- [8] Nuclear Regulation Authority, 'Enforcement of the New Regulatory Requirements for Commercial Nuclear Power Reactors', July 8, 2013 - https://www.nsr.go.jp/english/e_news/data/13/0912.pdf - these regulatory requirements are enforced via the revised Reactor Regulation Act, being effective on July 8 2013.
- [9] Sarna-Wojcicki, A M, et al, 'Areal distribution, thickness, mass, volume, and grain-size of air-fall ash from the six major eruptions of 1980', in Lipman, P. L, and Mullineaux, D R, eds, 'The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington', U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, 577-600, 1981
- [10] Borchardt, G. A, et al, 'Correlation of ash layers in peat bogs of eastern Oregon' Geological Society of America Bulletin, V84, 3101-3108, 1973
- [11] Christiansen, R L, et al, 'Chronology of the 1980 Eruptive Activity', in Lipman, P W, and Mullineaux, D R, eds, 'The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington', U.S. Geological Survey Professional Paper 1250, 17-30. 1981
- [12] Gorshkov, G S, 'Gigantic eruption of the volcano Bezymianny' Bulletin Volcanologique, ser. 2, v. 20, 77- 112, 1959.
- [13] Simkin, T, and Howard, K A, 'Caldera Collapse in the Galapagos Islands', 1968: Science, V169, 429-437. 1970
- [14] Bacon, C R, 'Eruptive History of Mount Mazama and Crater Lake Caldera, Cascade Range, U.S.A', Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 18, 57-115, 1983
- [15] Macdonald, G A, 'Volcanoes: Englewood Cliffs' Prentice-Hall, Inc., 510, 1972
- [16] Tanguy, J.C, et al, 'Victims from Volcanic Eruptions: a Revised Database', Bul. Volcanology, 60, 137-144, 1998
- [17] Crandell, D R, et al, 'Source-Book for Volcanic-Hazards Zonation: Unesco Natural Hazards ', 4, 97 p. 1984 - <http://unesdoc.unesco.org/images/0006/000630/063032eo.pdf>
- [18] Szakaics A, 'Redefining Active Volcanoes: a discussion', Bul Volcanology, 56, 1994
- [19] Connor C B, et al, 'What is the Probability of Explosive Eruption at a Long-Dormant Volcano', in Mader H M, et al 'Statistics on Volcanology', Special Publication of IAVCEI, Geological Soc, London 2006
- [20] Connor C B, et al, 'The Nature of Volcanism', in Connor C B, Chapman N A and Connor L J, ' Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities', Cambridge University Press, 2009
- [21] Valkentik A C, et al, 'Aspects of Volcanic Hazard Assessment for the Bataan Nuclear Power Plant, Luzon Peninsula, Philippines', in Connor C B, Chapman N A and Connor L J, ' Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities', Cambridge University Press, 2009
- [22] Yokoyama et al 1984
- [23] Hitoshi Yamasato, et al, 'The Japan Meteorological Agency's Volcanic Disaster Mitigation Initiatives', Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, No. 380, July, 2013

- [24]Koji Kato, Hitoshi Yamasato, 'The 2011 eruptive activity of Shinmoedake Volcano, Kirishimayama, Kyushu, Japan—Overview of activity and Volcanic Alert Level of the Japan Meteorological Agency', *Earth Planets Space*, 65, 489-504, 2013 - <http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/2013/6506/65060489.pdf>
- [25] Geshi, N, et al 'Magma of the January 2011 Eruption of Shinmoedake, Kirishima Volcano', Abstracts of 2011 Japan Earth Planetary Science Joint Meeting, SVC050-04, 2011 - <http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/2013/6506/65060489.pdf>
- [26]Nakada, S, et al, 'The Outline of the 2011 Eruption at Shinmoe-dake (Kirishima), Japan', *Earth Planets Space*, 65, this issue, 475–488, doi:10.5047/eps.2013.03.016, 2013.
- [27] IAEA, 'Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations', Specific Safety Guide No SSG-21, 2012 - http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1552_web.pdf
- [28]Kobayashi T and Okuno M, 'The Mode of Eruptions and Their Tephra Deposits' - www.airies.or.jp/attach.php/.../save/0/0/06_2-04.pdf [29]Suzuki, T, 'A Theoretical Model for Dispersion of Tephra Arc Volcanism: Physics and Tectonics', Proceedings of IAVCEI Symposium, August-September, Tokyo 1981
- [30]US Dept of Energy, Sandia National Laboratories, 'Atmospheric Dispersal and Deposition of Tephra from a Potential Volcanic Eruption at Yucca Mountain, Nevada', Yucca Mountain Project, MDL-MGR-GS-000002 REV 03, October 2007
- [31]Blong, R. J, 'Volcanic hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions', Orlando, Florida, Academic Press, p424, 1984
- [32]Connor L J Connor C B, 'Inversion is the Key to Dispersion: Understanding Eruption Dynamics by Inverting Tephra Fallout', Mader H M, et al 'Statistics and Volcanology' 231-242, Geological Society, 2006 - http://www.cas.usf.edu/~cconnor/vg/0/0/06_2-04.pdf [29]Suzuki, T, 'A Theoretical Model for Dispersion of Tephra Arc Volcanism: Physics and Tectonics', Proceedings of IAVCEI Symposium, August-September, Tokyo 1981
- [33]Bonadonna C and Phillips J, 'Sedimentation from Strong Volcanic Plumes', *J Geophysical Res*, V108 B7, 2340, 2003 - http://www.researchgate.net/researcher/81801976_Jeremy_C_Phillips
- [34]Gatti E, Oppenheimer C, 'Utilization of Distal Tephra Records for Understanding Climatic and Environmental Consequences of the Youngest Toba Tuff', Univ Cambridge - http://www.researchgate.net/publication/264672488_Utilization_of_Distal_Tephra_Records_for_Understanding_Climatic_and_Environmental_Consequences_of_the_Youngest_Toba_Tuff
- [35]Hoblitt R P, et al, 'Volcanic Hazards with Regard to Siting Nuclear-Power Plants in the Pacific Northwest', US Dept of the Interior, Geological Survey, Report 87-297, 1987
- [36]Tilling I R, 'Volcanic Hazards', *Int Geological Congress*, Washington, 1989 – see Scott E W, 'Volcanic-Hazard Zonation and Long-Term Forecasts' p19
- [37]Woodhouse, M J, 'Interaction between volcanic plumes and wind during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland', *J Geophysical Research*, V 118, I1, 92-109, January 2013
- [38]Beaulieu, J D, and Peterson, N V, 'Seismic and Volcanic Hazard Evaluation of the Mount St. Helens area, Washington, Relative to the Trojan Nuclear Site, Oregon', Oregon Department of Geology and Mineral Industries, Open-File Report 0-81-9, 80, 1981 - <http://www.oregongeology.org/pubs/og/OGv43n12.pdf>
- [39] Blong, R J, 1982, 'The Time of Darkness' Seattle, University of Washington Press, 257, 1982
- [40]Shipley S and Sarna-Wojcicki A M, 'Distribution, Thickness, and Mass of Late Pleistocene and Holocene Tephra from Major Volcanoes in the Northwestern United States: A Preliminary Assessment of Hazards from Volcanic Ejecta to Nuclear Reactors in the Pacific Northwest', Office of Nuclear Regulatory Research, NRC, Department of Interior United States Geological Survey, 1982
- [41] Univ Canterbury (New Zealand), 'Final Report on EQC Research Contract 10/Sp607: 'A Quantitative Analysis of Volcanic Ash Damage to New Zealand Roof Structures and Materials', July 2011
- [42] see Figure 5.2.8(h) - Chapter 5 Snow Loads, C5-1- http://www.aij.or.jp/jpn/symposium/2006/loads/Chapter5_com.pdf
- [43] Wilson, T M, et al, 'Volcanic Ash Impacts on Critical Infrastructure', *J. Phys. Chem. Earth*, 2011 - <http://vatlab.org/wp-content/uploads/2010/02/Volcanic-ash-impacts-on-critical-infrastructure.pdf>
- [44] Sarkinen, C F, Wiitala, J T, 'Investigation of Volcanic Ash in Transmission Facilities in the Pacific Northwest', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-100, 2278–2286, 1981
- [45] Wilson, T M, Daly, M, Johnston, D, 'Review of Impacts of Volcanic Ash on Electricity Distribution Systems, Broadcasting and Communication Networks', Auckland Engineering Lifelines Group Project AELG-19. Auckland Regional Council Technical Publication 051, April 2009.
- [46] New Zealand Government, 'Self-Assessment Sheets', GNS Science Report 2011/37 - <http://www.trc.govt.nz/assets/Publications/guidelines-procedures-and-publications/civil-defenceemergency-management-2/volcano-source-book-oct2011.PDF>
- [47] Labadie R J, 'Volcanic Ash Effects and Mitigation', Air Force Office of Scientific Research and the Defense Advanced Research Agency, 1983 - <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0913/ML091330800.pdf>
- [48] NUREG-1407, 'Procedural and Submittal Guidance for the [IPEEE] for Severe Accident Vulnerabilities,' (ADAMS Accession No. ML063550238). GL 88-20, Supplement 4, paragraph 3, June 1991
- [49]NRC, Columbia Generating Station – NRC Integrated Inspection Report 05000397/2004005, February 2005 - http://www.nrc.gov/NRR/OVERSIGHT/ASSESS/REPORTS/wnp_2004005.pdf
- [50] NRC, 'Calculation for Filter Loading for DG HVAC and Combustion Air', Revision 1, ME-02-87-95, 2007
- [51] NRC, 'Columbia Generating Station – NRC Component Design Bases Inspection Report 05000397/2010006', September 2010 - <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1025/ML102530274.pdf>
- [52] Lochbaum D, 'Got Water', Union of Concerned Scientists, Issue Brief, October 2007 - http://www.ucsusa.org/sites/default/files/legacy/assets/documents/nuclear_power/20071204-ucs-briefgot-water.pdf
- [53] Durand, M, et al, 'Impacts of, and Responses to Ashfall in Kagoshima from Sakurajima Volcano – Lessons for New Zealand', Institute of Geological & Nuclear Sciences Science Report 2001/30, 2001
- [54] Gislason, S R, 'Characterization of Eyjafjallajökull Volcanic Ash Particles and a Protocol for Rapid Risk Assessment', *PNAS* 108, 7307–7312, 2011
- [55] 原子力規制委員会, 'Sendai NPP of Kyushu Electric Co. Screening (assessment) report for permit application to change installation of power reactor (change of facilities of power reactor No.1 and No.2) (The Law for the Regulations of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors; under Clause 1-3 and 4, Clause 1-2 (parts related technical capacity) of Article 43-3-6)' (in Japanese), 10 September 2014
- [56] Druitt T H, Costa F, Deloule E, Dungan M, Scaillet B, 'Decadal to monthly timescales of magma transfer and

- reservoir growth at a caldera volcano', Letter, Nature 482, 77–80 2012 –
<http://www.nature.com/nature/journal/v482/n7383/full/nature10706.html#contrib-auth>
- [57] 原子力規制委員会, 'The Monitoring of Volcanic Activity in the Nuclear Facility Investigation team'. 1st meeting 25 August 2014 – in Japanese – http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/kazan_monitoring/data/20140825.pdf
- [58] Volentik C M, Connor C B, et al, 'Aspects of Volcanic Hazard Assessment for the Bataan Nuclear Power Plant, Luzon Peninsula, Philippines' in Connor C B, Chapman N A and Connor L J, ' Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities', Cambridge University Press, 2009
- [59] Kyushu Electric, 'The effect assessment by pyroclastic fall deposit (volcanic ashes) for Sendai Nuclear Power Plant (Reactor No.1 and No.2)', 0035-13/14, October 2013
- [60] Langdon Davis, 'Spon's Architects and Builder's Price Book 2013', 138th Edition, 2012
- [61] Kyushu Electric Power Co., Inc., 'Sendai Nuclear Power Plant, Reactor No.1 and No.2 Answers to additional points brought up at the assessment meeting (points of note) regarding major damage, SA power supply, structure of procedures, emergency response centre etc.', 2014, 0098_03, March 2014
- [62] Large J H, 'Opinion and Statement of John H Large - The Application and Conformity of the Japanese Nuclear Regulation Authority's New Safety Standards for Nuclear Power Plants The Assessment Guide of Volcanic Effects to the Nuclear Power Plant with International Atomic Energy Agency's Volcanic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations SSG-21' R3229-E1, 28 January, 2015
- [63] Hill B E, et al, '1995 Eruptions of Cerro Negro Volcano, Nicaragua, and Risk Assessment for Future Eruptions', Geological Society of America Bulletin, 110, 1998
- [64] Hill B E, et al, 'Recommendations for Assessing Volcanic Hazards at Sites of Nuclear Installations', in Connor C B, Chapman N A and Connor L J, 'Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities', Cambridge University Press, 2009
- [65] IAEA, 'Volcanoes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting', PSSS--01, 1997
- [66] Nuclear Standards Committee (NUSC) of Japan Electric Association (JEA), 'Technical guidelines for evaluation of volcanic phenomena for nuclear power plants', JEAG4625--2014, revised February 2014 --
<http://www.denki.or.jp/committee/nuc/jeac/4625/jeag4625.html>

<本件に関する問い合わせ>

国際環境 NGO グリーンピース・ジャパン tel 03-5338-9800

キャンペーン担当： 高田久代 tel 080-6647-8503

関口守 tel 090-3204-7727

広報担当： 柏木愛 tel 080-5416-6507