高レベル放射性廃棄物の地層処分と科学的有望地の問題点

鹿児島大学　大学院理工学研究科
井村隆介

いろいろ考えてみた

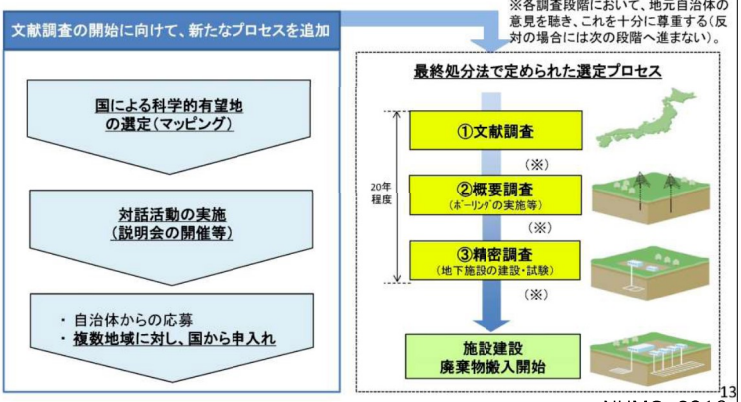
- 科学的有望地の選定は科学で，決定は社会がする
- 地球科学では科学的有望地の前提条件を決められない
- 科学は事実を提示し，それに対して社会的コンセンサスをもって前提条件が決まる
- しかし，（地球）科学は事実を提示できない．いろいろな考え方ができる（地球科学と物理・化学とは違う）
- いろいろな考え方を提示して決める（都合の良いデータだけを使わない）
- 学会代表の意見は個人の意見なので，パブリックコメントではなくピアレビューを．
- 社会的コンセンサスは，地方・地域への根回しではない．地球科学のあいまいさへの理解
- 世界基準であることが大切
- 科学的有望地のもう一つの考え方→管理はあきらめて遠ざける

井村隆介（いむらりゅうすけ）自己紹介

- 鹿児島大学　大学院理工学研究科　地球環境科学専攻　准教授
- 最終学歴は，都立大（首都大学ではない）　の博士課程．町田　洋先生が主査
- つくばの地質調査所（産総研ではない）の地震地質課の特別研究員を経て鹿大
- 専門は，火山地質学，地震地質学，第四紀地質学，災害地質学，環境地質学
- フィールドは，南九州を中心に，噴火のあるところ，地震のあるところ
- 国交省緊急災害対策派遣ドクター，屋久島世界遺産地域科学委員会委員など

新たなプロセスの追加

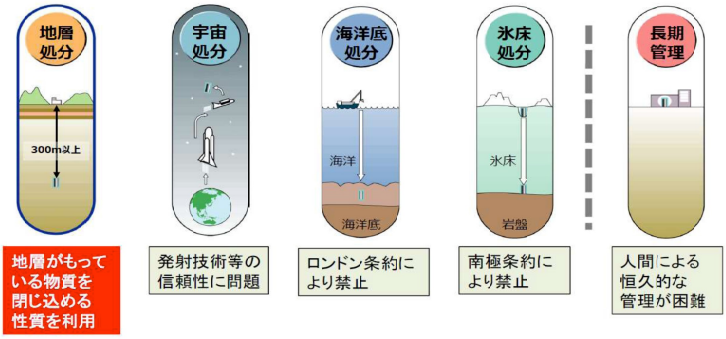
●新たな基本方針では、自治体からの応募を単に待つのではなく、科学的有望地を提示する等、国が前面に立って取組を進める新たなプロセスを追加しました。



NUMO, 2016

13

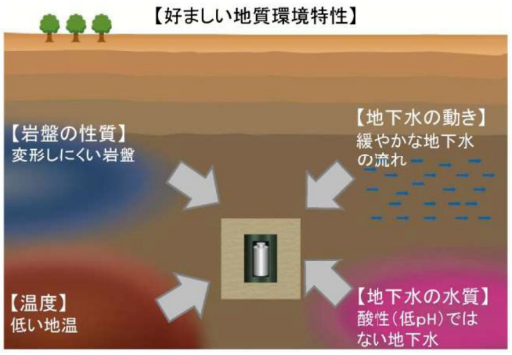
まあ，地層処分しかないだろう



NUMO, 2016

地下深部でも、処分に適しているかどうかは確認が必要です

●地下深部は、一般的に優れた特性を持っていますが、そうでない場所もあります。「閉じ込め機能」が維持される好ましい地質環境かどうかを判断するには、現地調査によって、岩盤の特徴や地下水の動き等を詳しく調査する必要があります。

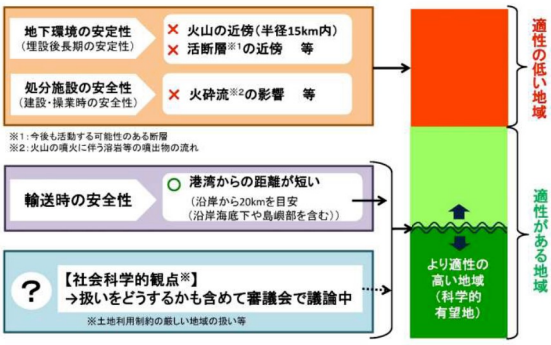


NUMO, 2016

36

科学的有望地に関するこれまでの議論の成果

●安全性の観点から避けるべき要素が一つでもある所は、「適性が低い地域」と整理し、そうでない地域は「適性のある地域」と整理します。
●「港湾からの距離が短いこと」が「より適性の高い地域」の条件の一つとしてあげられています。

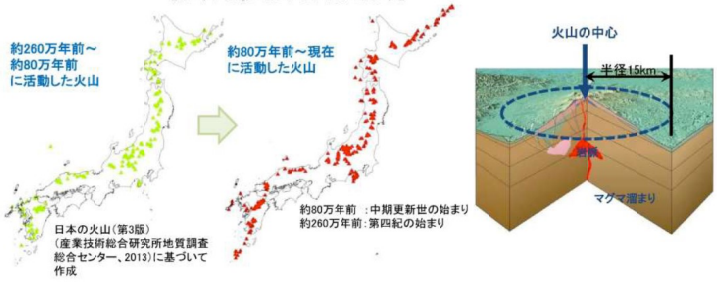


NUMO, 2016

方策(2)ー①：火山の活動によって地下施設が破壊される可能性がある地域は避けます

●過去数百万年程度の期間、火山の位置はほとんど変わっていません。また、火山活動は火山の中心から概ね半径15kmの円の範囲にとどまっています。
●処分地選定調査において、半径15kmの円の範囲を超えて火山噴出物の分布等の詳細な調査を実施し、火山の活動範囲を確認し、回避します。

【日本列島における火山の分布】



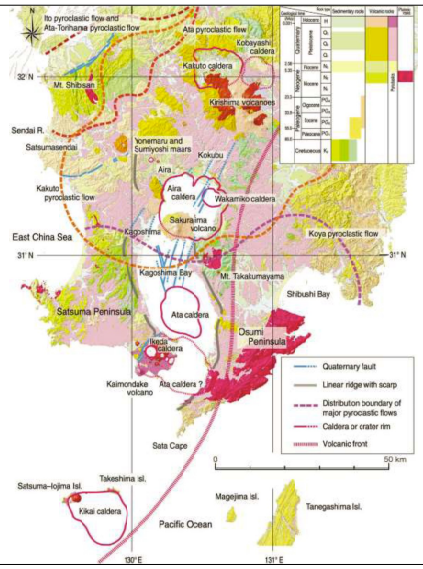
NUMO, 2016に加筆

科学的有望地に関してお伝えしたいこと①

1 科学的有望地の提示によって、地層処分に関する国民理解が深まることを期待しています。

- 火山や活断層等の影響範囲を考慮しても、地層処分に明らかに適さない場所が国土の太宗を占めるわけではありません。逆に、少なくとも調査してみる価値がある地域は、全国に広く存在することが示されることになるはずです。
- 「火山国の日本では地層処分はできないのでは」といった不安の解消に役立ち、日本での地層処分の実現可能性に関する理解が進むことを期待しています。
- その上で、合意形成のあり方や地域支援のあり方などを含め、この問題について考えて頂くきっかけとなり、地層処分に関する国民的議論が深まっていくことを期待しています。

NUMO, 2016



内村ほか, 2014

科学的有望地に関してお伝えしたいこと②

2 科学的有望地の提示は、長い道のりの「最初の一歩」です

- 科学的有望地の提示は、法律で定められた処分地選定調査の手前の段階で、「調査してみれば安全が確認できる可能性が期待できる地域」を大まかに示すものです。地域の意見を聴きながら、必要な調査を時間をかけて慎重に進めることは、何ら変わりがありません。

3 科学的有望地の提示と調査受入れのお願いは、全く別の話です

- 国民や地域の方々の理解なしに自治体に判断を求めても、決して上手くいかないというのが、これまでの経験から得られた教訓の一つです。有望地提示後も、国とNUMOは、国民や地域の方々と丁寧な対話を重ね、関心と理解を深めていくことに注力します。そうした活動の積み重ねなしに、自治体に判断を求めることはありません。

こうした有望地提示の位置づけや意味合いについて、国民の皆さんや自治体の皆さんの理解を得られるよう、全国的な対話活動に取り組んでいきます。

NUMO, 2016

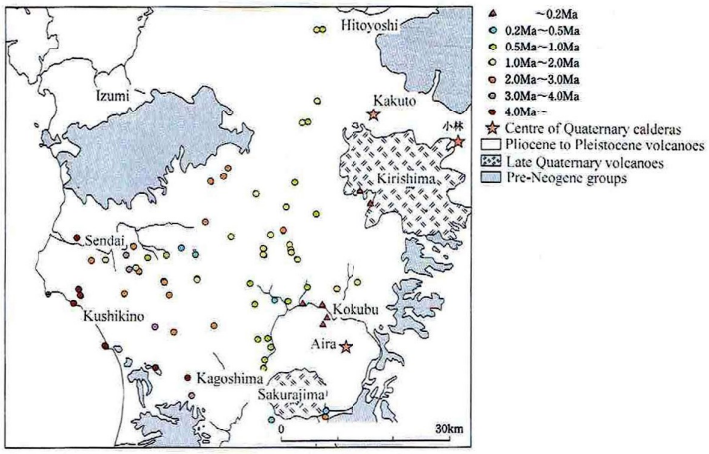


Figure 1.7 Map showing radiometric age distribution of volcanic rocks near vent in the north and northwest of Kagoshima graben (Aira-Hokusatsu area) Mehida & Moriwaki (2001)

方策(2)ー①:断層の活動によって地下施設が破壊される可能性がある場所は避けます

- ●断層活動は、過去数十万年にわたり同じ場所で繰り返し活動しています。
- ●断層活動に伴って地層が破砕された範囲(破砕帯)は、断層長さの100分の1程度です。
- ●処分地選定調査において、破砕帯を超えて物理探査やトレンチ調査等を用いた詳細な調査を実施し、隠れた活断層の分布や個々の断層の影響範囲等を確認し、回避します。

【日本列島における活断層の分布】

活断層とは
過去数十万年前以降に繰り返し活動し、将来も活動する可能性のある断層のこと。

活断層の影響範囲とは
断層周辺の岩盤の破壊や変形が生じている領域、ならびに将来、断層が伸展したり分岐する可能性がある領域のこと。

出典:活断層データベース(産業技術総合研究所 https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html)

物理探査
(物理探査は、岩石の電気や弾性波のとおりやすさといった物性の違いを測定して地下の様子を調査する方法。写真は地下に弾性波を送る大型バイブレータ震源。)
※写真提供:地球科学総合研究所HP

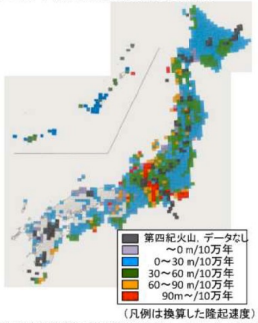
トレンチ調査
(実際に溝を掘り、その壁面にみられる地層の綿密な観察を行っている様子(遠田ほか, 2009))

NUMO, 2016

方策(2)ー②:隆起・侵食により人間と廃棄物とが接近する可能性がある場所は避けます

- ●隆起・侵食は過去と同じ傾向が今後も続くと考えられます。
- ●処分地選定調査において、地表地質調査による詳細な調査を実施し、隆起・侵食量等を確認し、将来地表に著しく接近することが予想される場所は回避します。

【最近約10万年間の隆起速度の分布】



(凡例は換算した隆起速度)
日本列島と地質環境の長期安定性(地質リーフレット4 日本地質学会、地質環境の長期安定性研究委員会 編 2011) 付図5

地表地質調査
(隆起・侵食速度を推定するために過去の侵食の記録である河岸段丘や海成段丘を調査している様子)
http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/cyousa23.html#03

地殻変動:1mm/年=100m/10万年

海水準変動:10mm/年=100m/1万年

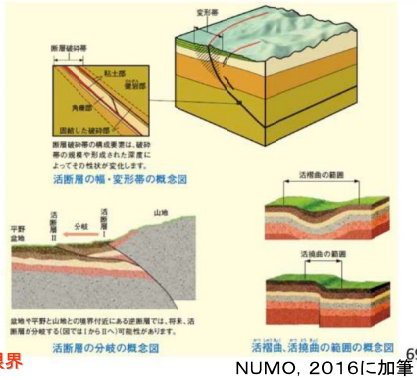
NUMO, 2016に加筆

方策(2)ー①:断層の活動によって地下施設が破壊される可能性がある場所は避けます

- ●処分地選定調査において、空中写真判読や、物理探査、トレンチ調査、ボーリング調査、断層から放出されるガスの分析等を組み合わせることによって、以下の点を把握し、処分施設に著しい影響を及ぼす可能性がある場合は、回避します。

・断層の分布、破砕帯の幅および外側の変形帯に含まれる範囲
・断層の伸展・分岐が発生する可能性がある領域
・変形帯や活褶曲・活撓曲の分布範囲
・変位規模の小さい断層、地表の痕跡が不明瞭な断層、地下に伏在している断層による影響

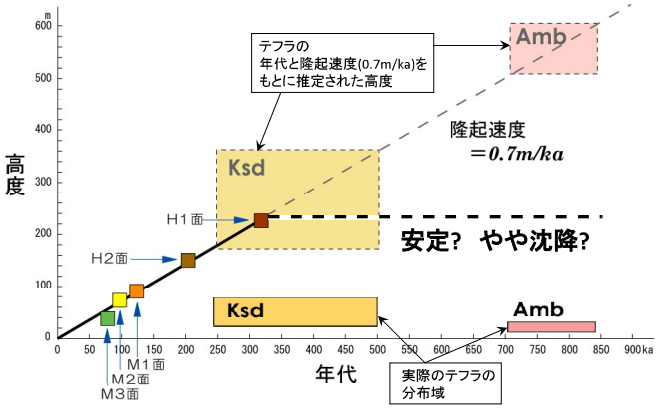
※空中写真判読とは、高空から撮影した写真を用いて地形的な特徴を判読し、断層を示している可能性のある直線的な地形等を推定する方法です。



地表からの調査の限界

NUMO, 2016に加筆

地殻変動様式

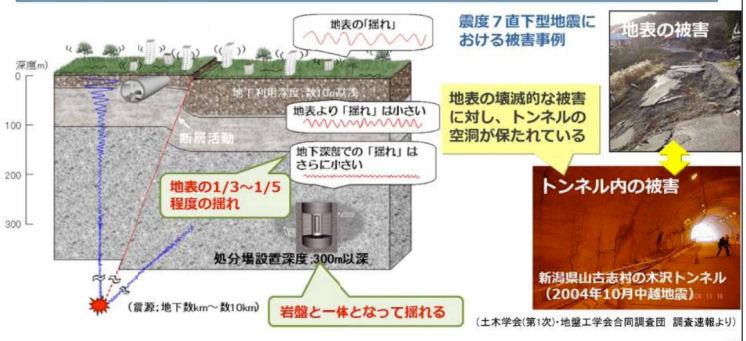


◆M1面・M2面・M3面は平均垂直変動量, H1面・H2面は平均旧汀線高度を示す.

Imura and Yamada, 2010

方策(2)ー①:地震の影響を考慮します(参考)

- ●地震を発生させる活断層は回避しますが、断層活動に伴う地震動(ゆれ)を避けることはできません。しかし、地震時の地下深部の揺れは地表に比べて1/3~1/5程度に小さくなることがわかっています。
- ●処分地選定調査において、地下深部における地震動の影響を詳しく検討し、必要な工学的対策を行います。



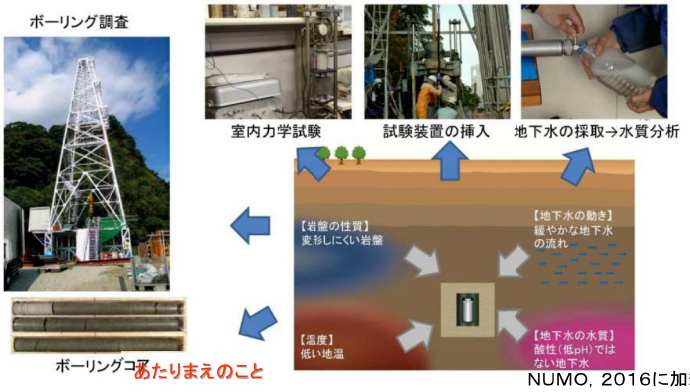
(土木学会(第1次)・地盤工学会合同調査団 調査速報より)

あたりまえのこと

NUMO, 2016に加筆

方策(2)ー③:地質環境特性を把握します

- ●処分地選定調査において、ボーリング調査等を実施し、地下深部の地質環境特性を把握します。
- ●変形しにくい岩盤、低い地温、緩やかな地下水の流れ、酸性(低pH)ではない地下水であるかどうか等を確認します。

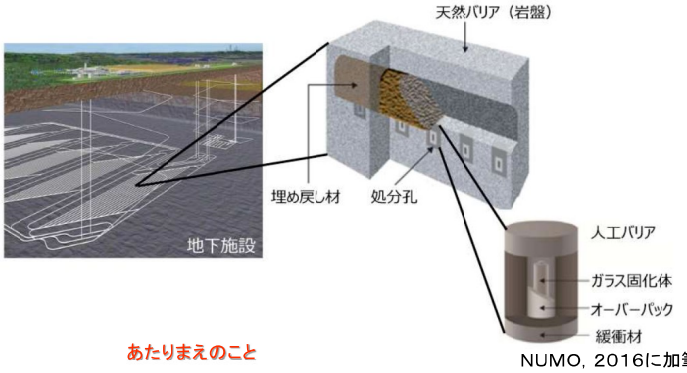


あたりまえのこと

NUMO, 2016に加筆

方策(3):調査地点の地質環境特性に応じた工学的対応を検討します

●処分地選定調査で得られた地下深部の地質環境特性に係る情報に基づき、十分な安全裕度を持った人工バリア等の施設の設計(オーバーパックの材質や厚さ緩衝材・埋戻し材の材料や厚さ、施工方法、廃棄物の定置間隔等)を行います。
●また、周辺の活断層等を考慮した施設の耐震設計も行います。

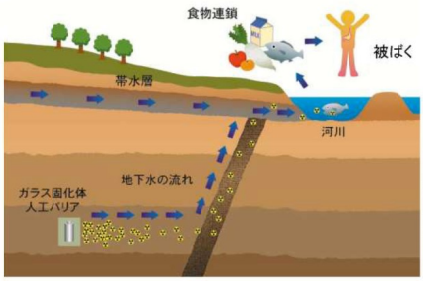


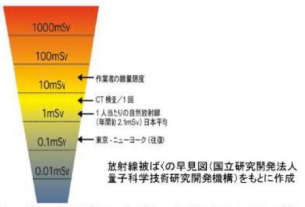
あたりまえのこと

NUMO, 2016に加筆

方策(3):安全性を評価・確認します

●放射性物質が人間の生活環境に運ばれる可能性に対しては、必要な対策を講じた上で、慎重に評価します。処分地選定調査では地下深部の地質環境特性から生活環境までの様々な情報と、人工バリア等の工学的対応を検討しつつ、将来の地上で生活する人の被ばくの程度を慎重に評価し、地表に到達するまでに放射能が十分減衰していることを確認します。





放射線被ばくの早見図(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構)をもとに作成

オーバーパックが1,000年後に、4万本すべてでその機能が失われる等の保守的な想定をした場合に、地上で生活する人の年間最大被ばく線量は0.000005mSv(処分後80万年時点)と評価されています。

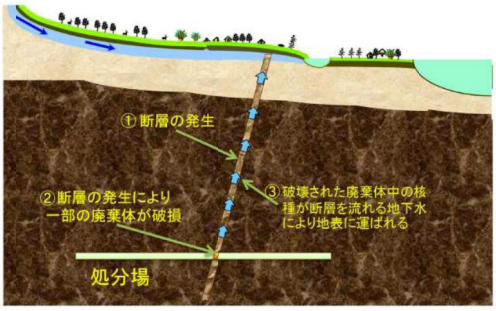
出典:「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 ―地層処分研究開発第2次とりまとめ―」(核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構)、1999)

あたりまえのこと

NUMO, 2016に加筆

方策(3):万一の事態を想定した安全性の評価を実施します

●科学的な知見に基づき、綿密な調査を行い、評価することで閉じ込め機能や隔離機能に係る安全性の確認が可能です。しかし、火山や活断層等が直撃した場合の影響を、コンピュータでシミュレーションし、著しい影響にならないことを念には念を入れて確認します。



処分場を横切るような大規模な断層が発生すると仮定した場合のシミュレーションのイメージ

NUMO, 2016

方策(4):地下施設の安全対策を講じます

●地下施設の坑道は非常に長いので、掘削時に崩落する可能性を低減するため、十分に固まっていない地層(未固結層)等の強度が低い地層の広がりを処分地選定調査により把握し、回避します。
●また、調査地点の特性等を考慮した安全な掘削工法や湧水対策方法を検討します。

掘削工法の一つである
トンネルボーリングマシン

湧水を抑制するためのグラウト施工の様子
(秋田, 2011)

あたりまえのこと

NUMO, 2016に加筆

方策(4):地上施設の安全対策を講じます

●操業中は放射能の高い廃棄物を扱うので、火山活動、断層活動、津波等の自然災害により地上施設が破壊されるようなことは避ける必要があります。そこで、火砕流の分布範囲等を処分地選定調査により把握し、著しい影響を回避します。
●また、調査結果を踏まえて、地上施設の耐震設計・津波対策(必要に応じて、施設設置位置の検討、防潮堤や浸水防止用の水密扉の設置)等の安全対策を施します。

耐震性を高めるための
鉄筋コンクリート壁の実規模大模型
(日本原燃・六ヶ所PR館)

津波時の浸水防止のための水密扉
(東北電力・東通原発)

NUMO, 2016に加筆

日本に原発が一基もなくても南九州のカルデラ巨大噴火いつか起こる.

約3万年前に発生した姶良カルデラの噴火が今起これば, 鹿児島県本土の人, 宮崎県, 熊本県の南部に住む人, 300万人くらいが即死する.

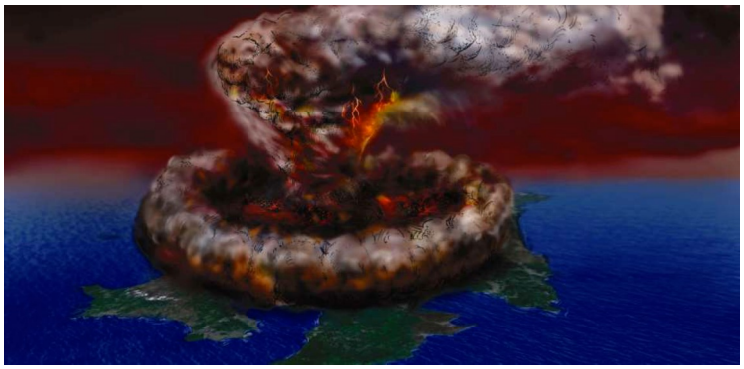
川内原発の問題は再稼動ではなく, その立地の科学的評価.

カルデラ巨大噴火とは？

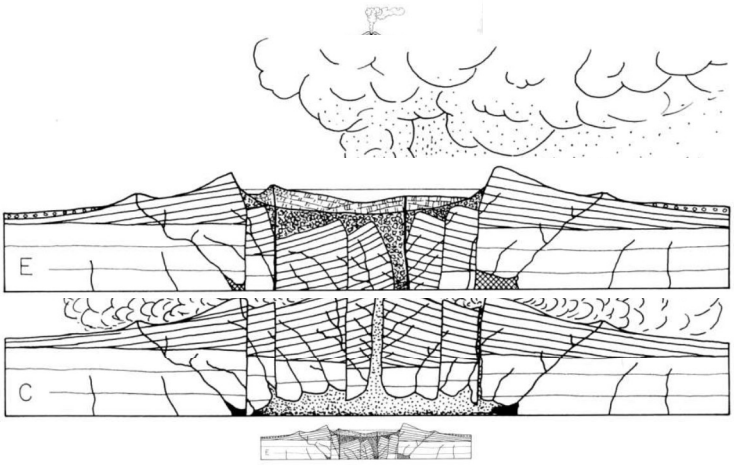
火砕流

BBC製作「SUPER VOLCANO」より

九州の火山とカルデラ



カルデラ火山とは？

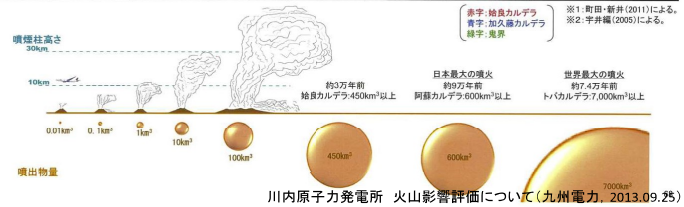


（噴火規模に関する参考資料）

火山爆発度指数※1	VEI1	VEI2	VEI3	VEI4	VEI5	VEI6	VEI7	VEI8
噴出物量※1 (km³)	0.0001～0.001	0.001～0.01	0.01～0.1	0.1～1	1～10	10～100	100～1,000	1,000～
噴煙柱高度※1 (km)	0.1～1	1～5	3～15	10～25	25～			
噴火のタイプ※2	ストロンボリ式				プリニー式			
	ハワイ式	ブルカノ式				ウルトラプリニー式		
規模※1	小噴火	中噴火		大噴火	巨大噴火		破局的噴火	
頻度※1	高頻度					低頻度		
主な噴火	浅間 2004年	浅間山 1973年	雲仙新燃岳 2011年	桜島昭和 946年	St Helens 1980年	Pinatubo 1991年	Tambora 1815年	Toba 約7.4万年前
	有珠 2000年	雲仙新燃岳 1959年	三宅島 1983年	御ケ岳 1929年	桜島大正 1914年	桜島薩摩 約1.3万年前	鬼界アカホヤ 約0.7年前	Yellow stone 約200万年前
	北海道駒ケ岳 1996年		有珠 1977年		桜島安永 1779年	岩戸噴火 約5万年前	姶良Tn噴火 約3万年前	
	雲仙火砕流 1991年				富士 1707年	福山噴火 約9万年前	支笏第一噴火 約4.4万年前	

赤字：姶良カルデラ
青字：加久藤カルデラ
緑字：鬼界

※1：町田・新井（2011）による。
※2：平井編（2005）による。

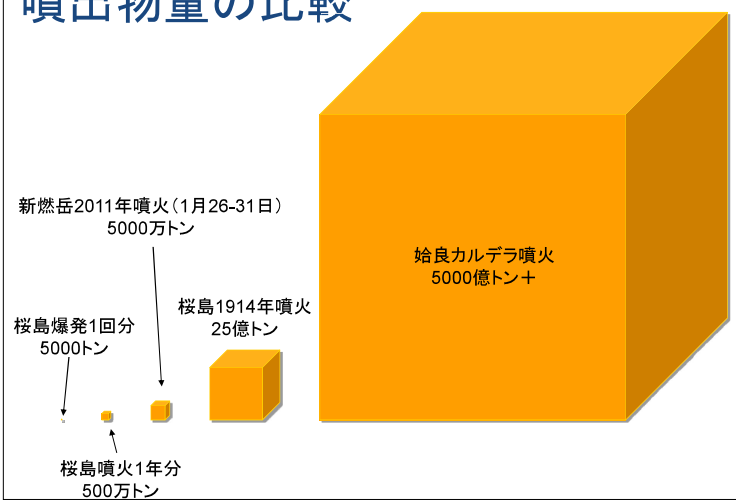


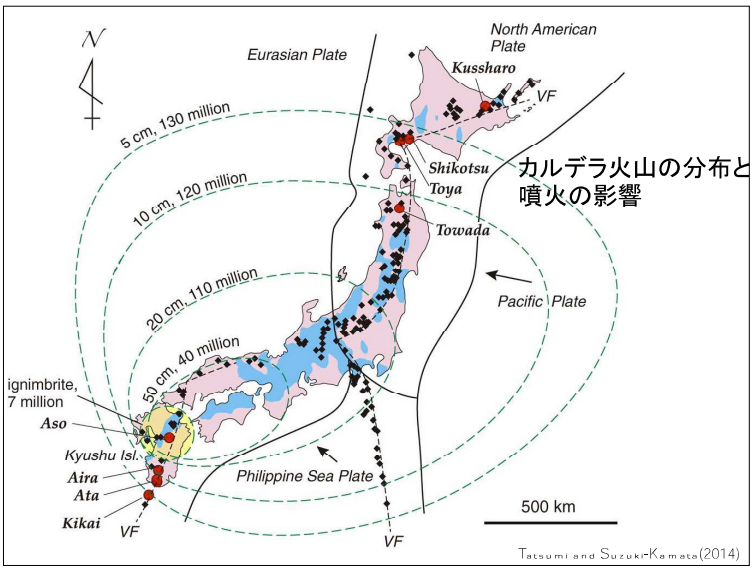
川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.09.25）

噴火の頻度

- 数10000年に1度の噴火
- 数1000年に1度の噴火
  - 雲仙普賢岳1991-95年（平成）噴火
- 数100年に1度の噴火
  - 新燃岳2011年(平成)噴火と1716-17年(享保)噴火
  - 桜島1914年(大正)噴火と1779-82(安永）噴火
- 数10年に1度の噴火
  - 阿蘇1979年噴火
  - 阿蘇2015年噴火

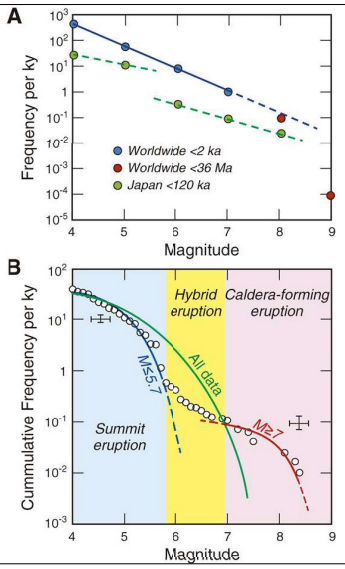
噴出物量の比較





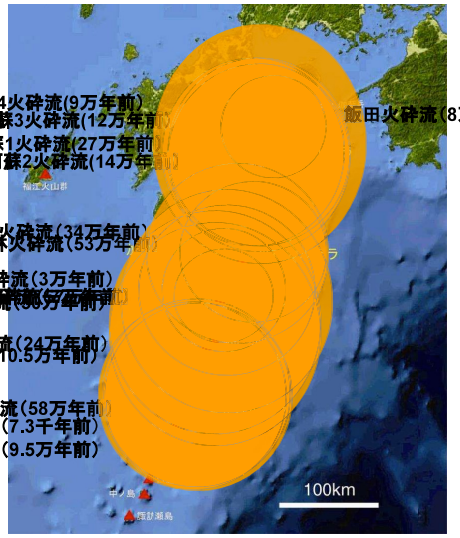
カルデラ火山の分布と噴火の影響

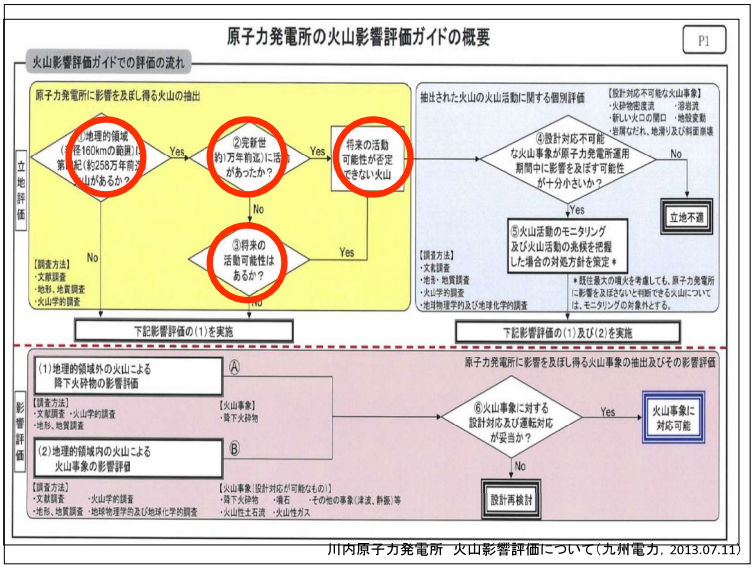
Tatsumi and Suzuki-Kamata(2014)



火山噴火の規模と発生頻度

Tatsumi and Suzuki-Kamata(2014)



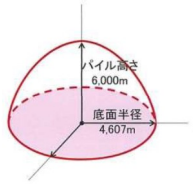


川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.07.11）

2．1　入戸火砕流堆積物の再現性

・入戸火砕流堆積物を対象としたパラメータスタディ（パイル形状、底面摩擦係数）の結果、既往の火砕流堆積物の到達範囲及び層厚を概ね再現できることを確認した。

計算条件	九州電力（ケース②-6）	「火山防災マップ作成指針※1」における参考文献※2の一例
対象噴火	入戸火砕流堆積物（姶良カルデラ）	Cerro Machin Volcano
シミュレーションコード	TITAN-2D	TITAN-2D
噴出物量（km³）	200※3	0.3
パイル形状（m）	高さ：6,000　底面半径：4,607	記載なし
底面摩擦係数	0.02	0.27
内部摩擦角（°）	30	34
初速度（m/s）	0	120
地形	現地形（200mメッシュ）	現地形（10mメッシュ）



パイルのイメージ（高さ6,000mの場合）

※1 内閣府（防災担当）・消防庁・国土交通省水管理・国土保全局砂防部・気象庁（平成25年3月）
※2 H.F.Murcia,M.F.Sheridan,J.L.Macias,G.P.Cortes (2010) : TITAN2D simulations of pyroclastic flows at Cerro Machin Volcano,Colombia:Hazard Indications. *Journal of South American Earth Sciences*, vol.29, 161-170.
※3 町田洋・新井房夫（2003）：新編火山灰アトラス－日本列島とその周辺．東京大学出版会．

〔再現計算結果〕 評価方法：給源から遠く、かつ火砕流堆積物が厚く残存している五木村を評価地点として、到達の有無と層厚を確認

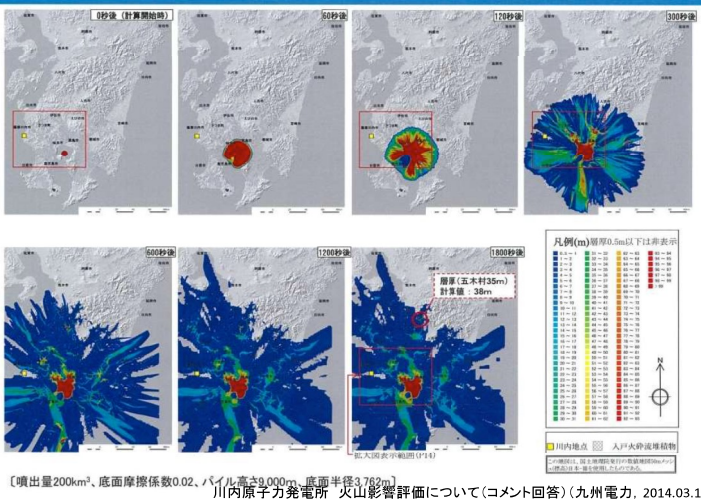
噴出量：200km³			底面摩擦係数			
	高さ	底面半径	0.01	0.02	0.03	0.06
パイル形状（m）	3,000	6,515	－	× （ケース②-3）	－	－
	6,000	4,607	◎ （ケース①-6）	○ （ケース②-6）	× （ケース③-6）	× （ケース⑥-6）
	9,000	3,762	－	◎ （ケース②-9）	◎ （ケース③-9）	－

◎：五木村（給源より約90km）まで到達し、層厚も概ね再現　○：五木村まで到達　×：五木村まで到達しない

川内原子力発電所　火山影響評価について（コメント回答）（九州電力，2014.03.19）

カルデラ巨大噴火による噴出物の分布

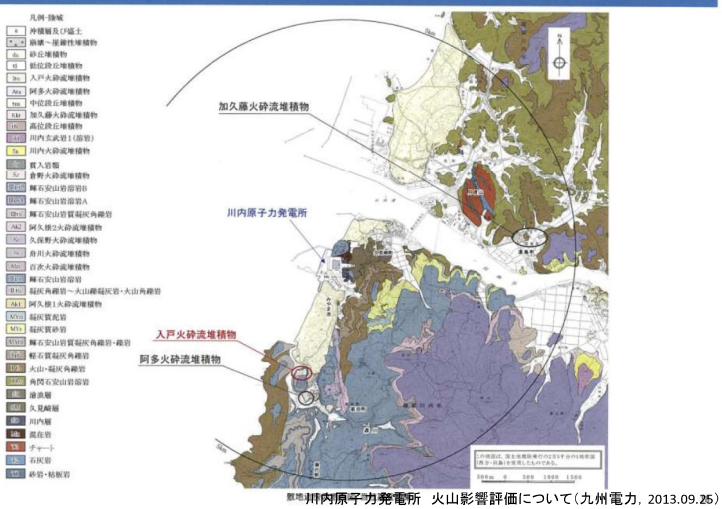
2．1　再現計算結果：ケース②-9　〔評価：◎〕



〔噴出量200km³、底面摩擦係数0.02、パイル高さ6,000m、底面半径3,762m〕

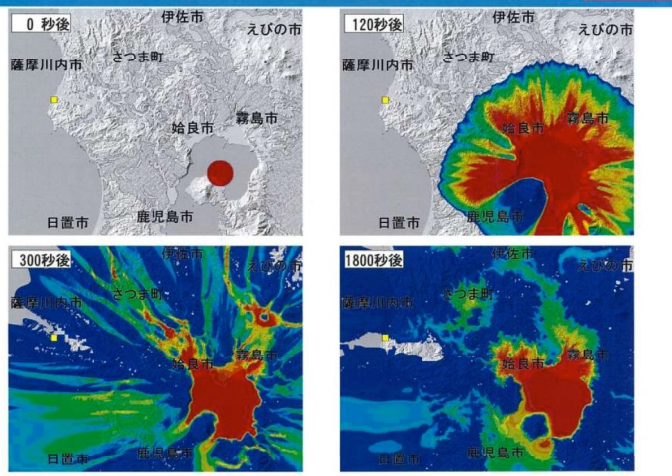
川内原子力発電所　火山影響評価について（コメント回答）（九州電力，2014.03.19）

3．2（2）姶良カルデラ〔概要〕

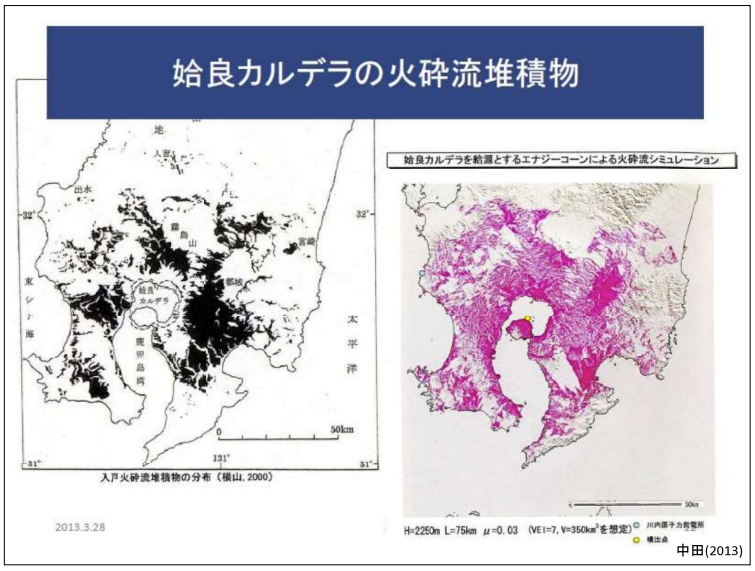


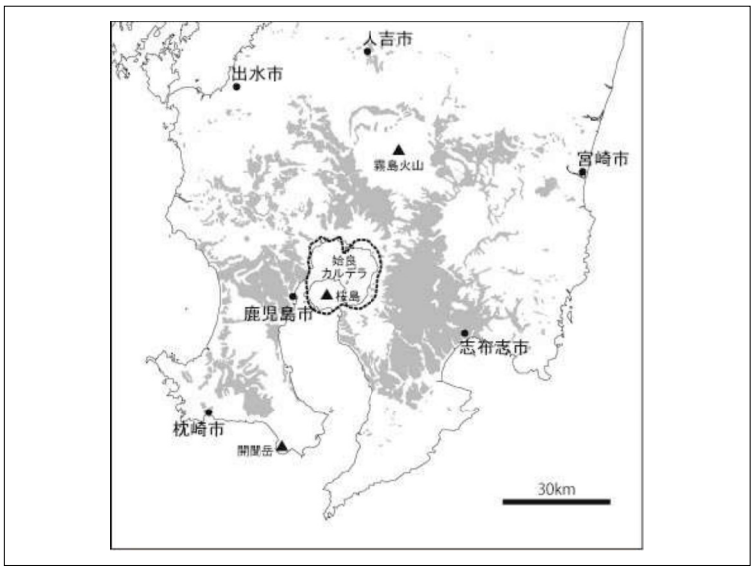
川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.09.25）

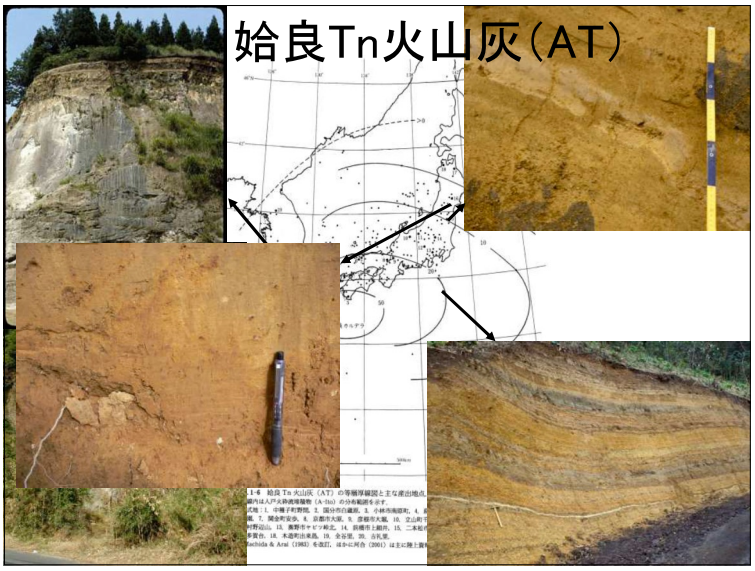
2．1　再現計算結果：ケース②-9　〔評価：◎〕　拡大図

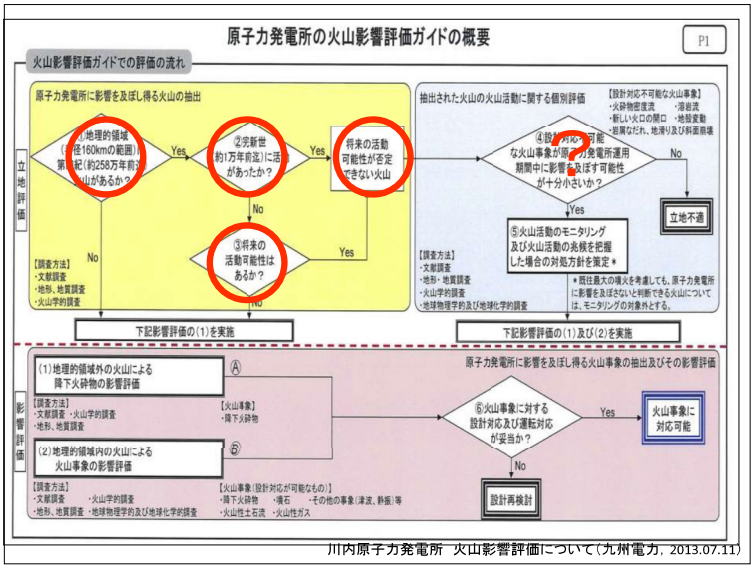


川内原子力発電所　火山影響評価について（コメント回答）（九州電力，2014.03.19）


姶良カルデラの火砕流堆積物
姶良カルデラを給源とするエナジーコーンによる火砕流シミュレーション
入戸火砕流堆積物の分布（横山, 2000）
2013.3.28
H=2250m L=75km μ=0.03 (VEI=7, V=350km³を想定)
川内原子力発電所
横出点
中田(2013)

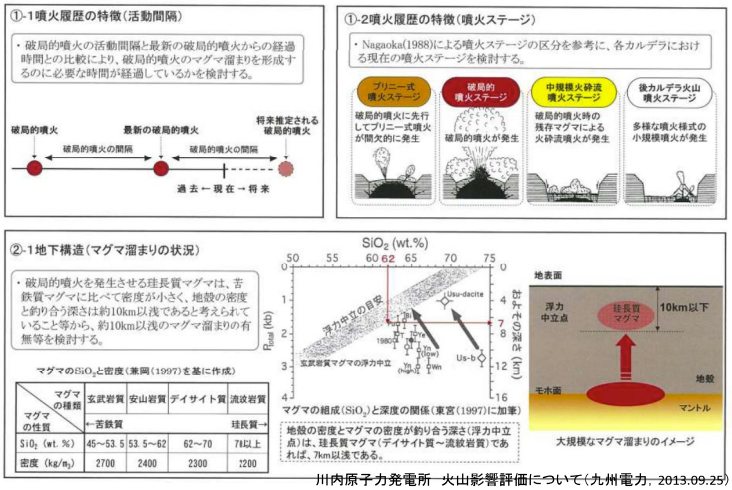

人吉市
出水市
霧島火山
宮崎市
姶良
カルデラ
桜島
鹿児島市
志布志市
枕崎市
開聞岳
30km


姶良Tn火山灰（AT）



川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.07.11）

3.1　評価方法

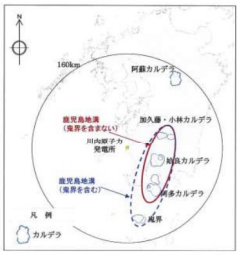


川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.09.25）

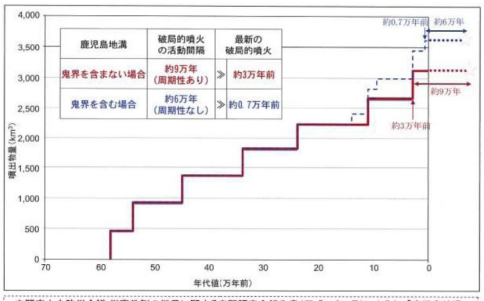
カルデラ巨大噴火発生の可能性

3.1（1）南部九州におけるカルデラの概要

- 鹿児島地溝においては、約60万年前以降に破局的噴火が複数回発生している。
- 鬼界を含まない鹿児島地溝における破局的噴火の活動間隔は約9万年であり、当該地域における最新の破局的噴火は約3.0万年前である。
- 鬼界を含む鹿児島地溝における破局的噴火の活動間隔は約6万年であり、当該地域における最新の破局的噴火は約0.7万年前である。
- 鹿児島地溝については、鬼界を含む、含まないに関わらず、破局的噴火の間隔は、最新の破局的噴火からの経過時間に比べて十分長く、運用期間中における破局的噴火の可能性は十分低いと考えられる。



九州におけるカルデラの位置

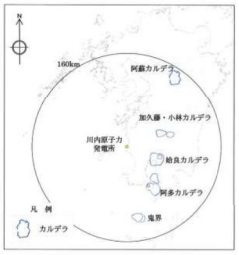


・内閣府中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書（平成23年3月）によると、「鹿児島地溝の内部には、巨大なカルデラが連なっている。北から加久藤カルデラ、姶良カルデラ、阿多カルデラであり、その南方には鹿児島地溝との関係は不明であるが鬼界カルデラが存在する。」とされている。
・地質学会編(2010)日本地方地質誌.九州・沖縄地方によると、「加久藤から阿多カルデラが連なる南北の地域は鹿児島地溝帯である。(中田節也)」とされている。

川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.09.25）

3.1　評価方法

- 将来の活動可能性がある火山のうち、過去に破局的噴火を発生させたカルデラについては、運用期間中の噴火規模を検討した。
- カルデラにおける運用期間中の噴火規模については、①噴火履歴の特徴、②地下構造から、現在のマグマ溜まりが破局的噴火直前の状態にあるかを検討し、現在の噴火ステージにおける既往最大規模の噴火を考慮した。
- その他の火山における運用期間中の噴火規模については、既往最大規模を考慮した。

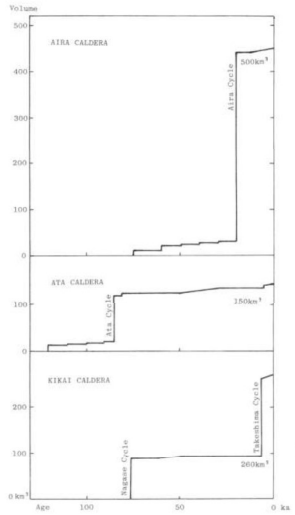


九州におけるカルデラの位置

運用期間中の噴火規模の評価

対象火山	運用期間中の噴火規模の評価概要	運用期間中の破局的噴火の可能性に関する検討項目	
カルデラ	運用期間中の破局的噴火の可能性を検討し、現在の噴火ステージにおける既往最大規模の噴火を考慮	① 噴火履歴の特徴	①-1 活動間隔 ①-2 噴火ステージ
		② 地下構造	②-1 マグマ溜まりの状況
その他の火山	運用期間中の噴火規模として既往最大規模の噴火を考慮		

川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.09.25）



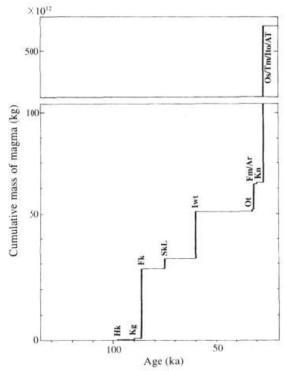
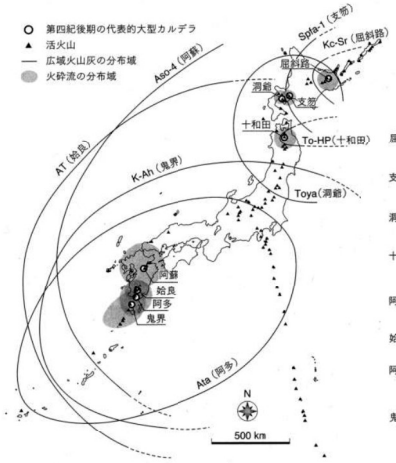


Fig. 19. Cumulative discharge mass of magma from Aira caldera volcano during 100–27 ka.

Fig. 49 Cumulative volume plotted against time for all magmatic materials erupted from the Aira, Ata and Kikai caldera volcanoes

Nagaoka(1988)，長岡ほか(2001)



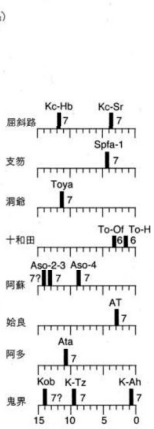


図 1―第四紀後期に形成された大型カルデラ（直径 ＞10 km）の位置と，代表的な大規模カルデラ噴火による広域火山灰と火砕流の分布[7]

活火山の分布も同時に示してある。右側は各火山で発生した大規模カルデラ噴火の年代および広域火山灰の名称。数字は火山爆発指数（VEI）。

次の鬼界アカホヤ噴火級の噴火は？

鬼界カルデラは7300年前にアカホヤ噴火をおこしており，それまでの履歴を考慮すると，この場所で次のカルデラ噴火がすぐに到来するとは考えにくいかもしれない。しかし日本列島ではカルデラ噴火がおよそ1万年に1回の頻度で繰り返し発生していること，最新の噴火からすでに7300年が経過していることから，日本列島全体でみれば次のカルデラ噴火は徐々に迫っていると言えるであろう。また，鬼界カルデラを含め，個々の火山ではカルデラ噴火が必ずしも特定の周期で発生しているわけではないようにも見える（図1）。ここでたとえばカルデラ噴火がランダムに発生しており，ポアソン分布モデルに従う事象であるという仮定をした場合[7]，今後100年でVEI 7級の噴火が日本列島でおこる確率は1%である。一方世界では，このクラスの噴火は最近2000年間で少なくとも4回発生しており，今後100年での発生確率は18%である。VEI 7のタンボラ噴火から200年経つが，同規模の噴火が近い将来おこる可能性は決して低くはない。もしVEI 7の噴火がおこればその影響は全球規模で何らかの異常現象として見えられるはずである。カルデラ形成噴火の発生頻度は低いが，われわれが生きている間に経験する可能性はあると考えるべきである。

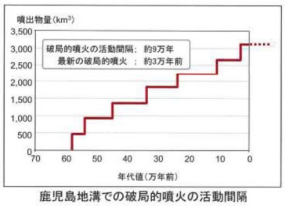
カルデラとは何か：鬼界大噴火を例に（前野　深　科学，2014年1月号）

3.2（4）阿多カルデラ〔噴火履歴による検討〕

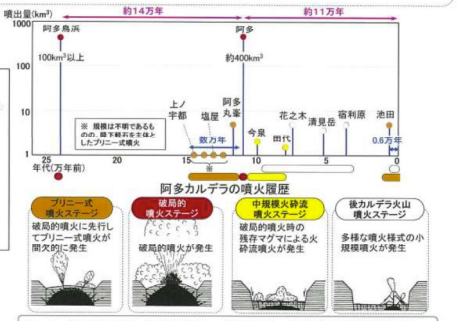
○ 前述の鹿児島地溝における破局的噴火の活動間隔に関する検討から、運用期間中における破局的噴火の可能性は十分低いと考えられる。

○ 破局的噴火の活動間隔（約14万年）は、最新の破局的噴火からの経過時間（約11万年）に比べて長いこと、現在、破局的噴火に先行して発生するプリニー式噴火ステージの兆候が認められるものの、過去のプリニー式噴火ステージの破局的噴火までの継続期間（数万年）は、池田噴火からの経過時間（約0.6万年）に比べて十分長いことから、破局的噴火までには、十分な時間的余裕があると考えられる。

○ 阿多カルデラにおける現在の噴火活動は、開聞岳における後カルデラ火山噴火ステージ若しくは池田におけるプリニー式噴火ステージの初期段階と考えられる。



鹿児島地溝での破局的噴火の活動間隔



・Nagaoka(1988)によると、過去にプリニー式噴火ステージ、中規模火砕流噴火ステージが認められ、現在の開聞岳の活動は後カルデラ火山噴火ステージとされ、池田につ[illegible]ステージの開始を示す噴火である可能性があるとされている。

31

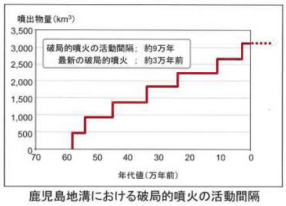
川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.09.25）

3.2（2）姶良カルデラ〔噴火履歴による検討〕

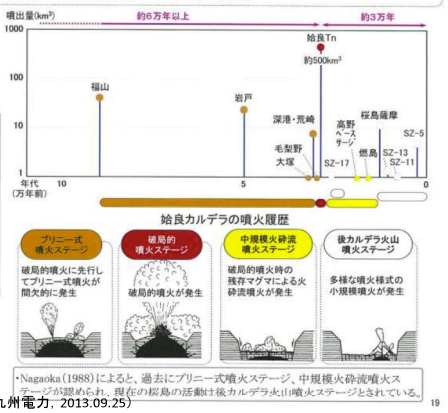
○ 前述の鹿児島地溝における破局的噴火の活動間隔に関する検討から、運用期間中における破局的噴火の可能性は十分低いと考えられる。

○ 破局的噴火の活動間隔（約6万年以上）は、最新の破局的噴火からの経過時間（約3万年）に比べて十分長いこと、現在、破局的噴火に先行して発生するプリニー式噴火ステージの兆候が認められないことから、破局的噴火までには十分な時間的余裕があると考えられる。

○ 姶良カルデラにおける現在の噴火活動は、桜島における後カルデラ火山噴火ステージと考えられる。



鹿児島地溝における破局的噴火の活動間隔



・Nagaoka(1988)によると、過去にプリニー式噴火ステージ、中規模火砕流噴火ステージが認められ、現在の桜島の活動は後カルデラ火山噴火ステージとされている。

19

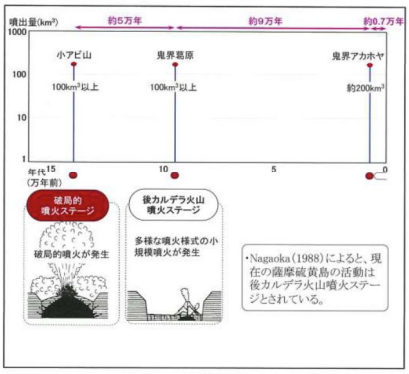
川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.09.25）

3.2（5）鬼界〔噴火履歴及び地下構造による検討〕

○ 破局的噴火の最短の活動間隔（約5万年）は、最新の破局的噴火からの経過時間（約0.7万年）に比べて十分長いことから、破局的噴火までには十分な時間的余裕があると考えられる。

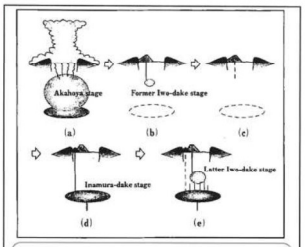
○ 鬼界における現在の噴火活動は、薩摩硫黄島における後カルデラ火山噴火ステージと考えられる。

○ 鬼界アカホヤ噴火時に蓄積されていたマグマは全て出尽くしており、現在の活動は、その後の新たな活動であることから、大規模なマグマ溜まりは蓄積していないと考えられる。



・Nagaoka(1988)によると、現在の薩摩硫黄島の活動は後カルデラ火山噴火ステージとされている。

鬼界の噴火履歴



・前野ほか(2001)によると、全岩化学組成等に基づき、火山活動史と鬼界カルデラにおけるマグマ溜まりの進化の関係について検討を行った結果、鬼界アカホヤ噴火後の硫黄谷前期の活動（薩摩硫黄島の5.2ka以降の活動）は鬼界アカホヤ噴火時と同じマグマによる活動、その後の稲村岳の活動（薩摩硫黄島の3.6ka～2.6kaの活動）は新たな苦鉄質マグマによる活動、硫黄岳後期の活動は前期と異なるマグマによる活動とされている。

岩石学的情報によるマグマ溜まりの変遷（前野ほか 2001）

川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.09.25）

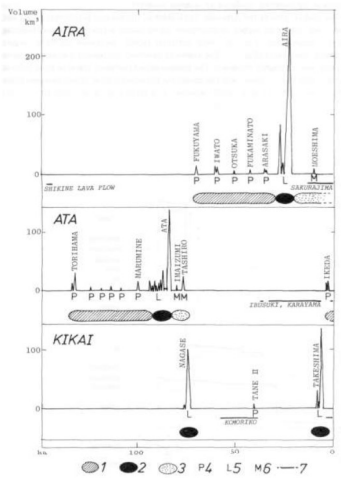


Fig. 48 Late Quaternary multi-cycles of the Aira, Ata, and Kikai Caldera Volcanoes
1: Plinian stage; 2: Large-scale pyroclastic flow stage; 3: Moderate-scale pyroclastic flow stage; 4: Plinian-eruptive cycle; 5: Large-scale pyroclastic flow eruptive cycle; 6: Moderate-scale pyroclastic flow eruptive cycle; 7: Post-caldera volcanism

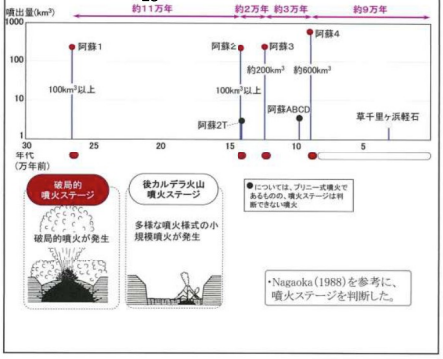
Nagaoka(1988)

3.2（6）阿蘇カルデラ〔噴火履歴及び地下構造による検討〕

○ 破局的噴火の最短の活動間隔（約2万年）は、最新の破局的噴火からの経過時間（約9万年）に比べて短いため、破局的噴火のマグマ溜まりを形成している可能性、破局的噴火を発生させる供給系ではなくなっている可能性等が考えられる。

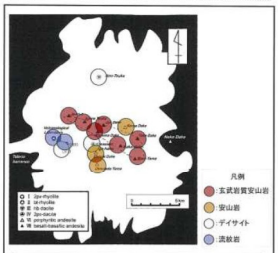
○ 阿蘇カルデラにおける現在の噴火活動は、最新の破局的噴火以降、阿蘇山において草千里ヶ浜軽石等の多様な噴火様式の小規模噴火が発生していることから、阿蘇山における後カルデラ火山噴火ステージと考えられる。

○ 苦鉄質火山噴出物及び珪長質火山噴出物の給源火口の分布から、大規模な珪長質マグマ溜まりはないと考えられる。



・Nagaoka(1988)を参考に、噴火ステージを判断した。

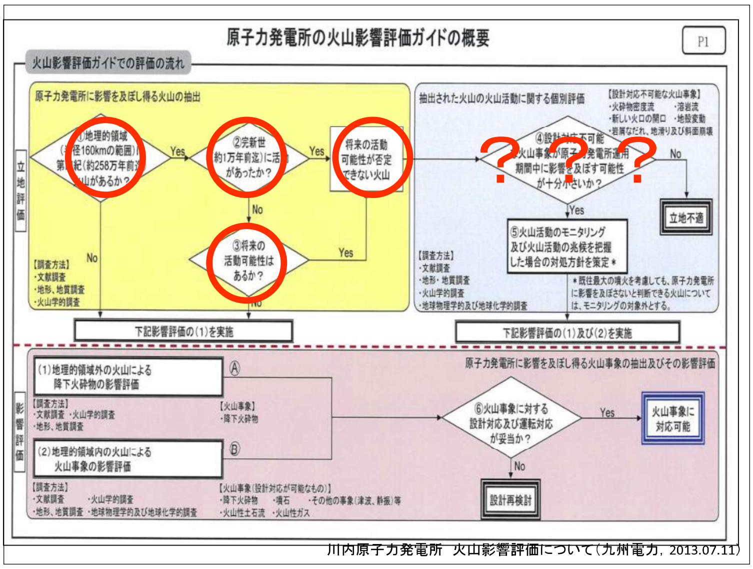
阿蘇カルデラの噴火履歴



・三好ほか(2005)によると、全岩化学組成等を基に、マグマ供給系について考察を行った結果、苦鉄質火山噴出物の供給火口がカルデラ中央部に分布し、その周囲により珪長質な火山噴出物の給源火口が分布する傾向から、大規模な単一のマグマ溜まりは後カルデラ形成期には存在しなくなったと考えられるとしている。

岩石学情報による大規模マグマ溜まりの存否

川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.09.25）



川内原子力発電所　火山影響評価について（九州電力，2013.07.11）

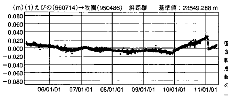


図2―えびの-牧園間の基線長変化
国土地理院による。2009年末から伸びに転換していたが，2011年1月26日から急激に短縮，その後数日でふたたび伸びに転換。基線長の伸びは地下のマグマだまりの膨張に起因する。

れない。さらに休止期間の長さにかかわらず，1例を除いて前兆が現れてから数十分から1週間以内には噴火に至っている。中でも1日以下のケースが多い。したがって，富士山のような玄武岩質マグマの火山では，300年以上の長期間噴火を休止していても，群発地震などの前兆現象が現れてから噴火に至るまで，せいぜい1週間程度しかないと考えたほうがよい。

一方，デイサイトや流紋岩などのシリカに富むマグマの場合，Passarelli と Brodsky[2] も噴火前休止期間と前兆期間の相関関係が存在すると認めている。もしそうならばカルデラ噴火のように1万年単位の休止期間をもつ噴火の場合，10年以上前に前兆現象が現れることになる。しかし，2008年チリ南部のチャイテン火山で9400年ぶりに発生した流紋岩質マグマの噴火では，前兆期間が27時間しかなかった(Basualto et al., 2008)[3]ことを考えると，休止期間の長いカルデラ噴火といえども，前兆期間が長いとは限らないと考えるべきであろう。また，群発地震が発生したとして，その後噴火直前までの10年間近く何事も生じなかったとしたら，その群発地震が将来のカルデラ噴火の前兆だと判断できるかどうか疑わしい。

火山噴火の前駆異常現象を前兆と認識できるか

マグマ噴火が始まってみると，噴火前に発生していたさまざまな異常現象が噴火の前兆現象に相当するものだったと指摘されることが多い。そのような例として，2011年1月26, 27日に準プリニー式の爆発的噴火を引き起こした霧島山新燃岳噴火の際の山体膨張があげられる。噴火に先立つ2009年12月ころから，霧島山西方のえびの高原を挟むおよそ20 kmのGPS基線長が伸長を続けていた(図2)。このことはえびの高原の地下でマグマの蓄積が行われていて，霧島山の山体が膨張していることを示していた。2011年1月の新燃岳からのマグマ噴火発生に同期して，伸長を続けていた基線長が急速に短縮した(図2)ことから，膨張を続けていたマグマだまりは新燃岳に直結していたマグマだまりであることが明らかになった。噴火後の時点で考えれば，マグマだまりの膨張は新燃岳噴火の前兆であったことになる。しかし，噴火の3カ月前に開かれた火山噴火予知連絡会ではこのマグマだまりの膨張は新燃岳の噴火の要因だとは考えられていなかった。膨張源は新燃岳の北西10 km，深さ9 kmほどの地下にあり，むしろえびの高原近傍の別の火口からの噴火が懸念されていたのである。

一般に，マグマだまりの膨張が把握されたとしてもどこまで膨張すると噴火に至るのかは自明ではないので単独では噴火時期の特定には使えない。たとえ，噴火の約1年前から開始していたマグマだまりの膨張が新燃岳の噴火準備過程であることがわかっていたとしても，どこまで膨張すれば噴火が開始するのかという閾値は定まっていないので，噴火の時期を特定することはできなかったはずである。

桜島では1914年の大正噴火で2 km³のマグマを噴出したが，100年後の現時点では噴出した総量の9割に相当するマグマが地下10 kmの深さにあるマグマだまりに再蓄積していると考えられている。このことは水準測量による地盤変動観測で把握されたものだが，GPS観測でも同様の結論が導かれている。この程度マグマがたまっているとすると，今すぐにでも大正噴火クラスの噴火を生じても不思議はないが，現在と同じように少量ではあるがマグマをほぼ連続的に放出し続ける可能性もある。地下でのマグマ蓄積量が判明した場合，その量に見合った規模の噴火の可能性があることはわかるが，それだけで噴火の規模や時期を予測することは不可能なのである。この問題の解決には，マグマ蓄積から噴火に至る過程のモデル化が必要であるが，今はまだできていない。

ところで，霧島山新燃岳では，マグマだまりの膨張が続いていた2010年の3月から7月にかけて断続的に水蒸気爆発が発生していた。2011年1月26日のマグマ噴火発生以降，これらの水蒸気爆発がマグマ噴火の前兆現象の一つだったと指摘する研究者が多いが，水蒸気爆発の発生当時は準プリニー式噴火に移行する可能性を指摘した者はいなかった。1783年の浅間天明噴火の場合も，クライマックスの数カ月前から断続的に小規模噴火が発生し，周辺の村落では降灰を経験していた。このような小規模噴火が8月の大噴火の前兆であったことは，噴火を経験したあとでは納得できるが，事象が進行している時点では，同様の小規模噴火が継続するのか，あるいは大噴火に移行することがあるのか判定がつかなかったはずである。このように，噴火前に生じるさまざまな異常現象が大規模噴火に展開する前兆であるかどうかの判定は進行時点では難しいが，いわゆる「あと知恵」であっても，このような事例を積み重ねると，将来は事前に噴火の前兆現象として認識できるようになる可能性があるので重要である。防災の観点からは，一定程度マグマの蓄積が行われていることが把握されていて小規模な噴火が断続的にでも発生する場合，やがて大噴火に移行するかもしれないと警戒を強めることは意義があるかもしれないが，空振り情報となる可能性もある。

巨大カルデラ噴火の前兆

巨大カルデラ噴火の頻度は低く，ほとんどは有史以前のものであるので，巨大カルデラ噴火の前兆を物理観測によって捉えた例はない。

カルデラ噴火としてはごく小規模なものではあるが，フィリピン，ピナツボ火山の1991年噴火では地震計などによる近代的な観測が行われた。ピナツボ噴火は事前に避難勧告がおこなわれ，そのため5〜10 km³程度の噴出物を放出した大規模噴火にもかかわらず，犠牲者数は800人程度と比較的少なかったことで知られている。この噴火では，6月に発生した最大噴火の3カ月前に群発地震と水蒸気爆発が発生しており，カルデラ噴火の前兆現象であったとみなされている。しかし，この水蒸気爆発が発生した時点では巨大噴火が予想されたわけではない。最大噴火の約1週間前からはじまった異常なほど多数の地震活動や火山ガス濃度の急変などを受けて，大噴火発生が予測されたのである。当然のことながらかなりの規模の地盤変動を伴ったことが予想されるが，当時ピナツボ火山では系統的な地盤変動観測が行われておらず，噴火前にどのような地盤変動が発生したのかは不明である。ちなみに先のデータベースでは3カ月前の群発地震が前兆発生とみなされている。

有史時代の巨大カルデラ噴火は事例が少ないが，インドネシアのクラカタウ1883年噴火とタンボラ1815年噴火が有名である。いずれも破局的な噴火が突然始まるのではなく，少なくとも2〜3カ月前から小規模噴火が発生していた(高田，2010)[4]。さらに，この2例の巨大噴火では小規模噴火が発生していた時期の特徴として，数km規模の広い範囲に，噴火口や噴気口が生じたというのである。しかし，このような前駆的な小規模噴火が発生した時点で，巨大カルデラ噴火の発生を想定するのは困難であろう。おそらく，巨大カルデラ噴火の直前の数週間ないし数日前には地震活動や急激な地殻変動などのさまざまな顕著な事象が観

私たちは本当の巨大噴火を経験していない（藤井敏嗣　科学，2014年1月号）

カルデラ巨大噴火を事前に知ることができるか

測され，正確な規模は特定できないまでも，大噴火の接近を予測することは可能であろうが，噴火の数カ月前に発生するかもしれない小規模噴火などの異常現象がその発生時点で大噴火に至る兆候であるかどうかを判定することは困難である。

巨大カルデラ噴火の準備段階の認識

巨大カルデラ噴火の発生時期は比較的直前になるまで判明しないとして，発生が予想される地域を特定できるだろうか。つまり，巨大噴火の準備段階を認識する手立てはあるだろうか。巨大カルデラ噴火の最大の特徴は大量のマグマをごく短時間に噴出することにある。このことは噴火直前には地下に噴出マグマに相当する量以上のマグマを準備していることを意味する。このマグマの存在を物理観測により確認できれば，将来，巨大カルデラ噴火がおこりうる地域であることを認識できるはずである。

たとえば100 km³程度のマグマが直径10 km程度の円盤状に集積する場合，マグマの厚さは数km以下である。この程度の大きさの領域を，地殻内の構造探査に用いられる地震波によって探査することは簡単ではない。地震波の波長が厚さの数分の1程度であるので，通常の観測方法でマグマ集積の程度を探査することは容易ではない。

しかし，このような大量のマグマが比較的浅所に蓄積されると，その直上では大きな地盤変動が予想される。たとえば100 km³のマグマを地下10 kmの深さに直径10 kmの円盤状に蓄えたとすると，その直上では最大300 m以上の隆起が生じることになる。このマグマ蓄積に，カルデラ噴火のくりかえし周期である数万年以上の期間が必要だとすると，最大変動量は年間1 cm程度で，通常よりは大きいものの，極端に大きな値ではない。この程度の隆起が観測された場合に，巨大噴火が準備されていると断定するのは困難であろう。しかし，マグマ集積がさらに短期間で生じるならば異常に大きな地盤変動が生じるはずである。

この点に関して，最近興味深い研究結果が公表されている。カルデラ噴火による噴出物の岩石学的解析からマグマ集積の時間が推定されているのである。岩石中の斑晶鉱物の元素拡散パターンを解析した結果，カルデラ噴火前のマグマ蓄積は数千年以内(Gualda et al., 2012)[5]あるいは100年以内(Druitt et al., 2012)[6]という非常に短い時間であったという報告が相次いでいる。もしマグマ蓄積が100年程度で完了するとしたら，年間当たり数m程度の隆起が観測されることになる。目視ですら充分把握できる異常隆起であり，巨大カルデラ噴火がおこりそうな地域の特定に使えそうである。日本のカルデラ噴火噴出物については，このような解析が行われた例はないが，各地のカルデラで，カルデラ噴火の発生前のマグマ蓄積率を明らかにし，このような短期的蓄積が普遍的なものかどうかを確かめる必要がある。

もちろん，マグマの短期蓄積によってカルデラ噴火の前にこのような異常な隆起が観測されるにしても，どれだけ隆起すれば破局的噴火に至るのかは自明でない。カルデラ噴火を事前に予知するためには，マグマ蓄積から噴火に至るまでのモデル化によって，どのような前兆が期待されるのか，破局に至るまでの時間変化などを明らかにする必要がある。これまでの火山噴火予知はあくまでも経験にもとづいている。巨大カルデラ噴火については，被害が甚大すぎるので，経験してからでは間に合わない。

文献
1―石原和弘：科学，65, 708(1995)
2―L. Passarelli & E. E. Brodsky: Geophys. J. Inter., 188, 1025(2012)
3―D. Basualto et al.: EOS, Trans. Am. Geophys. Un., 89, Fall Meet. Suppl., Abst. V43D-2178(2008)
4―高田亮：地質学雑誌，116, 473(2010)
5―G. Gualda et al.: PLoS ONE, 7, e37492(2012)
6―T. H. Druitt et al.: Nature, 482, 77(2012)

LETTER

doi:10.1038/nature10706

Decadal to monthly timescales of magma transfer and reservoir growth at a caldera volcano

T. H. Druitt[1,2,3], F. Costa[4], E. Deloule[5], M. Dungan[6] & B. Scaillet[7]

Caldera-forming volcanic eruptions are low-frequency, high-impact events capable of discharging tens to thousands of cubic kilometres of magma explosively on timescales of hours to days, with devastating effects on local and global scales[1]. Because no such eruption has been monitored during its long build-up phase, the precursor phenomena are not well understood. Geophysical signals obtained during recent episodes of unrest at calderas such as Yellowstone, USA, and Campi Flegrei, Italy, are difficult to interpret, and the conditions necessary for large eruptions are poorly constrained[2,3]. Here we present a study of pre-eruptive magmatic processes and their timescales using chemically zoned crystals from the 'Minoan' caldera-forming eruption of Santorini volcano, Greece[4], which occurred in the late 1600s BC. The results provide insights into how rapidly large silicic systems may pass from a quiescent state to one on the edge of eruption[5,6]. Despite the large volume of erupted magma[4] (40–60 cubic kilometres), and the 18,000-year gestation period between the Minoan eruption and the previous major eruption, most crystals in the Minoan magma record processes that occurred less than about 100 years before the eruption. Recharge of the magma reservoir by large volumes of silicic magma (and some mafic magma) occurred during the century before eruption, and mixing between different silicic magma batches was still taking place during the final months. Final assembly of large silicic magma reservoirs may occur on timescales that are geologically very short by comparison with the preceding repose period, with major growth phases immediately before eruption. These observations have implications for the monitoring of long-dormant, but potentially active, caldera systems.

Crystals in volcanic rocks provide records of magma reservoir processes and timescales before eruptions[7]. A crystal growing from a magmatic melt incorporates trace elements in quantities governed by thermodynamic and kinetic laws[8,9]. If the crystal is subsequently mixed into another melt, trace elements that diffuse sufficiently fast will begin to re-equilibrate with the new host melt, generating intra-crystalline diffusion gradients than can be used to obtain time information[10–12] (Supplementary Fig. 1).

A novel technique for extracting multiple timescales from single crystals has been applied to plagioclase crystals in rhyodacitic (71–72 wt% SiO_2) pumices from the Minoan eruption. The pumices from all four phases of the eruption (phase 1, Plinian; phases 2 and 3, phreatomagmatic; phase 4, ignimbrite[13]) contain ~10 vol% crystals set in rhyolitic[13] (73–74 wt% SiO_2) glass. Plagioclase is the dominant crystalline phase, the others being orthopyroxene, clinopyroxene, magnetite, ilmenite and apatite. It occurs as zoned crystals, whose compositional variations are dominated by charge-coupled solid solution between the endmembers, anorthite (An, $CaAl_2Si_2O_8$) and albite ($NaAlSi_3O_8$).

Two types of plagioclase have been recognized from examination of about 300 crystals (Fig. 1 and Supplementary Figs 2 and 3). A dominant type (type 1) has euhedral to partly resorbed cores of An_{58-43} (58–43 mol% An) overgrown by variably developed, euhedral rims of An_{43-36} containing multiple dissolution surfaces (Fig. 1a–d). The cores and rims form compositionally distinct populations (Fig. 1g). In some crystals, the cores also contain euhedral to anhedral inner cores of An_{88-59} ('calcic inner cores'; Fig. 1a, c). A spectrum of type-1 crystals is observed, from those with thick rims (up to 100 μm) to those with thin rims to those in which the rim is absent (Fig. 1f). In rimmed type-1 crystals, the plagioclase in contact with the host glass is $An_{\sim 40}$, whereas in rimless ones it is $An_{\sim 56}$ (that is, the core composition). Rimmed type-1 crystals occur in pumices from all four eruptive phases, but rimless ones have only been observed in pumices from phase 4. Type-2 crystals are very rare; they are reversely zoned, with cores of

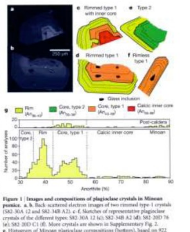


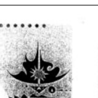
Figure 1 | Images and compositions of plagioclase crystals in Minoan pumice. **a, b**, Back-scattered electron images of two rimmed type-1 crystals (S82-30A 12 and S82-34B A2). **c–f**, Sketches of representative plagioclase crystals of the different types: S82-30A 12 (**c**); S82-34B A2 (**d**); S82-20D 76 (**e**); S82-20D C1 (**f**). More crystals are shown in Supplementary Fig. 2. **g**, Histogram of Minoan plagioclase compositions (bottom), based on 922 analyses, showing the different compositional groups. A histogram of plagioclase compositions from the post-caldera lavas[14–17] (top) is shown for comparison.

©2012 Macmillan Publishers Limited. All rights reserved

私たちは本当の巨大噴火を経験していない（藤井敏嗣　科学，2014年1月号）

特集日本をおそった巨大噴火

私たちは本当の巨大噴火を経験していない
――噴火予知の現状と課題



藤井敏嗣 ふじい としつぐ
NPO法人 環境防災総合政策研究機構 環境・防災研究所長，東京大学名誉教授

私たちが地震計などによる火山の物理観測をはじめてから，まだ100年程度しか経過していない。しかし，日本人が最後の巨大カルデラ噴火を経験してから既に7300年が経過している。私たちは本当の巨大噴火を観測したことはないのである。私たちが培った火山噴火予知のレベルで巨大噴火を予知できるのだろうか。

・・

巨大カルデラ噴火が生じると周辺地域への壊滅的な影響もさることながら，地球規模の気候変動も生じかねない。事前に噴火時期や規模を予測し，対策を講じて被害を軽減する努力をすべきである。

火山噴火は地下深部で生成された高温のマグマが地表に接近するか噴出することによって引き起こされる。ある一定量の1000℃近辺の温度をもつ溶融体が常温の地表近くに移動するので，噴火前には何らかの前兆となる現象を引き起こす。このため，地下の岩盤が突然破壊されることによって生じる地震に比べて，事前に噴火時期を特定することは容易だと考えられがちである。実際，2000年有珠山噴火の際に群発地震の発生をもって火山噴火発生を予測し，1万6000名の住民・観光客を噴火前に安全地域まで避難させた実績があることから，火山噴火予知は実用化も近いと誤解されることも多い。しかし，現実には火山噴火予知も実用的なレベルからははるかに遠い。本論では，この噴火予知の現状を確認し，巨大噴火の予知にむけて何が必要かを考えたい。

We have never observed super eruptions: Can we predict super eruptions in the future?
Toshitsugu FUJII

日本における火山噴火の予知の現状

1974年に火山噴火予知計画が発足して以来，日本の火山観測体制は順次整備され，火山体地下での火山性地震の増加やマグマの貫入にともなう山体膨張などの地殻変動など火山活動の高まりを検知すると，さらにさまざまな観測手段を投入して，噴火の時期を予測するための研究を続けてきた。その結果，何度かの噴火を経験した複数の火山では，事前に噴火の兆候を捉え，気象庁から種々の火山情報として公表を行うとともに，関係自治体に噴火のおそれがあることを伝達するなど，事実上の噴火予知に成功してきた。その例を表1に示す。もちろん，これまでに噴火したすべてのケースが予知できたわけでない。21年ぶりのマグマ噴火となった浅間山2004年噴火では，9月1日の最初の噴火を予知するにはいたらなかった。しかし，その後の数回の爆発的噴火の観測経験を積むことにより，2009年噴火の予知に成功したのである(表1)。

伊豆大島1986年噴火や霧島火山新燃岳2011年噴火のように，事前に火山情報を出すことなく

表1―事前に噴火の兆候を捉えた火山噴火

噴火火山	観測された前兆	発現期間
1977年有珠山	群発地震	31時間前
1983年三宅島	群発地震	1時間半前
1986年伊豆大島	群発地震，地盤変動	2時間前(割れ目噴火)
1989年手石海丘	微動	2日前
2000年有珠山	群発地震	数日前
2000年三宅島	群発地震	13時間前
2009年浅間山	傾斜変化，群発地震	13時間前

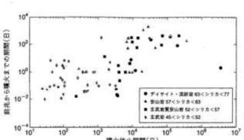


図1―噴火休止期間と前兆 期間の関係
L. Passarelli & E. E. Brodsky

噴火に至った例もある。あるいは，ほぼ噴火に至ると判断して火山情報が出されたが，近隣地での地震発生に伴って，マグマ移動が停止し，噴火未遂に終わった岩手山の1998年の例などもある。表には含まれていないが，最近はほぼ連日，しかも1日に複数回の爆発的噴火を行うことも多い桜島では，爆発に至る数十分ないし十数時間前から山体が膨張し，地震回数が増加することがわかっており(たとえば，石原，1995[1])，時間の特定にまではいたらないものの，ほぼ確実に爆発的噴火を予測できる。

このように，ある程度観測体制が整い，その体制下で噴火を経験した火山では，前兆現象の把握方法がわかるため，噴火の発生を予測することが可能になっている。別の言い方をすれば，いかに観測体制を整えても，初めての噴火を観測する際には，火山活動の高まりは把握できても，噴火時期の絞り込みは困難であるかもしれない。

ところで，表1に示した発現期間は噴火のどの程度前に前兆が把握されたかを示しており，ほとんどが数時間ないし数日前である。このように，噴火の予知が可能なのは噴火の比較的直前であり，数カ月や数年前といった非常に早い時期から噴火の発生を予測できるわけではない。

休止期間の長い火山では前兆を早くから検知できるか

日本では20世紀初頭の桜島大正噴火や北海道駒ヶ岳噴火以降噴火活動も比較的不活
乏しい。このため，上に示した例は，
前の休止期間が短く，数十年おきくら
繰り返しているような火山に限定され
兆が現れてから噴火までの時間が短い
はこのような事情を反映している可能
で，世界の噴火事例をみてみよう。

Passarelli と Brodsky[2] は主に群発地
て生じる前兆現象に着目し，噴火前休
兆が現れてから噴火に至るまでの時間
関係を検討した。ごくまれに数年前と
るが，前兆が現れるのはほとんどが噴
前から1年前である(図1)。先に挙げ
ける例よりは，前兆が現れる時期がや
が多いようである。これは，このデー
は休止期間が長い火山が含まれている
れない。この図ではバラツキは大きい
火前休止期間と前兆期間との間に正の
ようにみえる。噴火前休止期間が長い
兆が早期から現れる傾向がある。こ
立するならば，最近話題に上ることの
では300年の休止期間があるので，
カ月前に前兆現象が現れることになる
の関係にはマグマの化学組成の影響も
意が必要である。

この図のもとになるデータベースの
岩質マグマの噴火事例は噴火前休止
以内のものしか含まれていないが，こ
噴火前休止期間と前兆期間との間に相

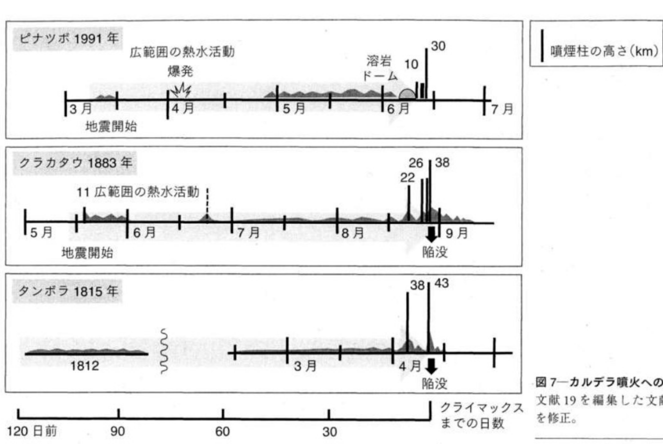


図7―カルデラ噴火への前兆現象
文献19を編集した文献18の図を修正。

過去1000年間に3回も巨大噴火が起こったインドネシアから学ぶこと（高田　亮・古川竜太　科学，2014年1月号）

噴火予測が困難であった例

1. 1986年伊豆大島：噴火開始時期＋推移予測（前駆地震・地殻変動の判断）
2. 1991年雲仙普賢岳：推移予測（火砕流発生）
3. 2000年有珠山：噴火開始場所＋推移予測（火砕流不発生）
4. 2000年三宅島：推移予測（マグマの横移動・山頂陥没）
5. 2011年新燃岳：噴火開始時期（山体膨張，前駆的水蒸気噴火かの評価不十分）

推移予測の難しさ

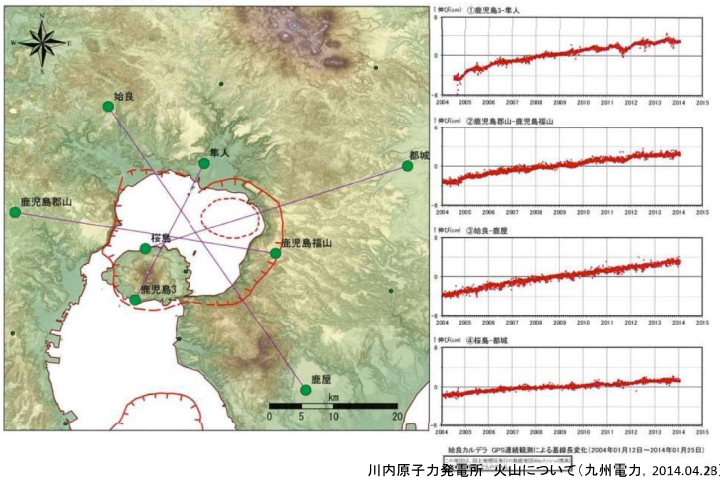
可能性のある噴火事象を網羅したイベントツリー（噴火事象系統樹）
→ 噴火シナリオ

2013.3.28

中田(2013)

5.6 既存の観測網による観測データ

GPS観測：基線長変化（姶良カルデラ）

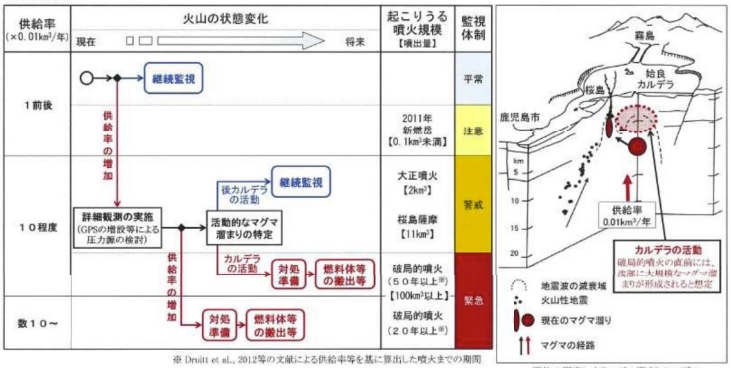


川内原子力発電所 火山について（九州電力，2014.04.28）

5.3 監視体制の移行判断基準（姶良カルデラの例）

○ 破局的噴火と供給率の関係に関する知見（Druitt et al., 2012等）を踏まえ、地殻変動の観測結果を基に、マグマ溜まりの位置、供給率等を把握できることから、モニタリングによる破局的噴火の兆候に関する判断基準を検討した。
○ なお、今後も破局的噴火の兆候等に関する知見を収集し、火山専門家等の助言を得ながら、破局的噴火の評価手法の高度化を継続的に行うことで、判断基準の精度向上に努めていく。

〔判断基準〕



川内原子力発電所 火山について（九州電力，2014.04.28）

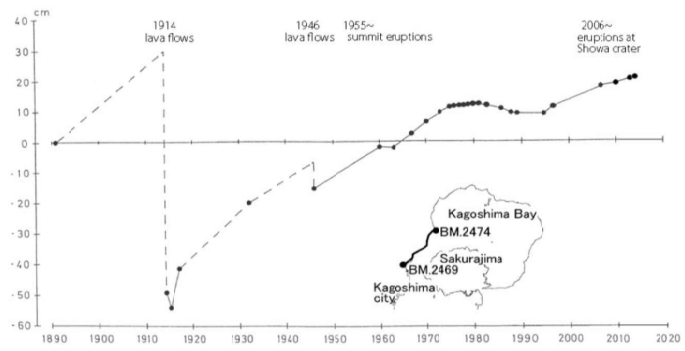


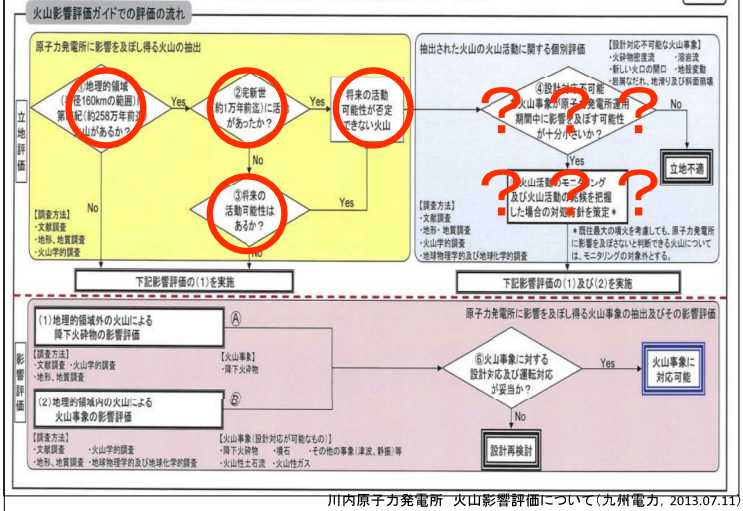
Fig. 6 Secular changes of relative heights of BM.2474 referred to BM.2469 and volcanic activity at Sakurajima volcano (modified from Fig. 1 in Eto et al., (1997)).

山本ほか(2014)

原子力発電所の火山影響評価ガイドの概要

P1

火山影響評価ガイドでの評価の流れ



川内原子力発電所 火山影響評価について（九州電力，2013.07.11）

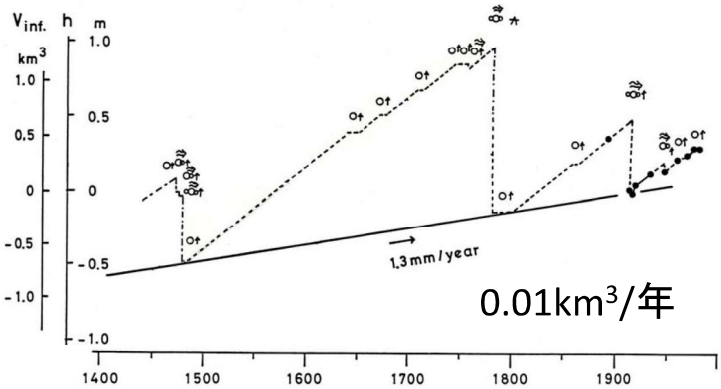


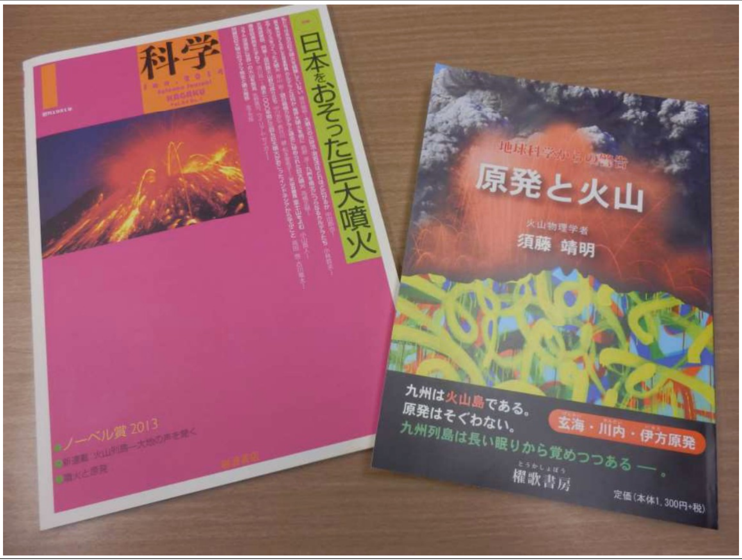
図１－16　歴史時代の推定地盤変動　出典：加茂・石原, 1980；泉ほか, 1991
$V_{inf.}$ はカルデラの隆起容量, h は鹿児島市街地の標高変化のスケールを示す。

内閣府(2013)に加筆

カルデラ巨大噴火が発生するとどうなるか

以上，自然災害の国―日本で原発の存在がいかに危険であるかについて火山研究者の立場から略述した。とくに北海道・東北・九州のカルデラ火山が巨大噴火を起こせば，その被害は人命・資産とも，3.11 東日本大震災とはけた違いの規模に達しよう。国家としての存続すら危ぶまれる。これらの大噴火は多分かなり明瞭で観測可能な前兆現象(地盤変動・地熱活動・長周期微動など)をともなうと予想され，事前避難も可能と考えられるが，被災地域が恐ろしく広域のため避難する場所の確保に問題が起こる。九州 6 カルデラ火山中の 1 個が巨大噴火すれば伊方・玄海・川内の 3 原発は完全に破壊され，西南日本全体が放射能汚染で，万年単位で事実上永久に立ち入り禁止区域になる。

噴火と原発（守屋以智雄　科学，2014年1月号）



The pyroclastic flows were very hot when emplaced, and heat retained in the deposits throughout 1991 profoundly affected subsequent geomorphic processes. The preeruption magma temperature at Mount Pinatubo was estimated to be 800±20°C (Rutherford and Devine, 1991), and the emplacement temperature of the pyroclastic flows was probably not much below this. Temperatures around 300°C were measured 30 cm below the deposit surface shortly after deposition (R. Hoblitt, U.S. Geological Survey, oral commun., 1991). During the 1991 monsoon season and continuing through the 1992 and 1993 seasons, numerous secondary phreatic explosions occurred almost daily, particularly during or shortly after rainstorms, due to rapid vaporization of water trapped beneath the hot pyroclastic valley fills (see Rowley and others, 1981; Moyer and Swanson, 1987). Explosions commonly sent ash eruption columns 3 to 4 km high, sometimes higher, and left explosion craters up to hundreds of meters in diameter. This activity regularly destabilized the valley-fill deposits during the rainy season and at times remobilized them as secondary pyroclastic flows (Torres and others, this volume). Erosion of the valley fills was facilitated by this phreatic activity through dilation of pyroclastic deposits (making them more vulnerable to erosion), disruption of surface crusting, and transport of loose debris directly into active channels.

Pierson et al.(1996)

噴火と原発

守屋以智雄
もりや いちお
金沢大学名誉教授

2011 年 3 月 11 日に東北地方を襲った $M9.0$ の巨大地震・津波による東京電力福島第一原子力発電所事故をきっかけに，原発の存続・撤廃をめぐる議論が激しく行われている[1]。議論の根底にある，経済優先と地震・津波のような人知を超えた自然現象に対する原発の安全性確保に関する認識のずれが，対立を生み出している。しかしこれまで地震・津波のみが原発の安全性を脅かす存在とされ，噴火・地すべりなど他の危険な自然現象に関してはほとんど顧慮されずに議論がなされていることは承服しがたい。ここでは噴火による原発への危険性についてのべる。

世界の火山分布と噴火の性質

火山はこの地球上に等密度で分布しているわけではなく，北米中東部，豪州中西部，ロシア中西部などのように広範囲にわたってまったく火山が存在しない場所もあれば，日本列島のように数十 km おきに火山がほぼ全土にわたって噴出している地域もある。またテクトニクスの違いや，噴火の種類・規模・発達段階の違いによって，噴火の仕方が爆発的で，周囲に大きな被害をもたらす雲仙岳や浅間山・磐梯山のような火山もあれば，静かな噴火を行い，周囲にほとんど被害を与えないハワイ・キラウエア火山やイタリア・エトナ火山のようなものもある。地球規模でみると，火山が密集し，爆発的で危険な火山が多い地域として西太平洋の沈み込み帯群は飛び抜けている[2]。そこは，ロシアのカムチャツカ半島・千島列島から始まり，日本列島・フィリピン・インドネシア・ニューギニア・ソロモン・バヌアツ・トンガ・ニュージーランドなど，8000 万年前に南米沖合で形成された古く，厚く，冷たく，H_2O を構成岩石中に多く含んだ海洋プレートが，巨大な海溝型地震を起こしながら，マントル内数百 km の深さまで沈み込む場所である[3,4]。それに次ぐのは中南米太平洋沿岸，グアテマラからチリ・アルゼンチンに続く沈み込み帯である。これら沈み込み帯の下 100 km 前後の深さまで沈み込んだプレートから，高温・高圧の環境下で分解した結晶から放出された H_2O が，島弧と沈み込みプレートの間に形成された高温のマントルウェッジ内に浮上，強力な溶剤としてマントル物質の一部を融解してマグマを形成する。このようにして形成されたマグマ中には H_2O が多く含まれ，そのマグマが地表まで上昇すると大規模火砕流を発生させるような爆発的噴火を行うことになる[5]。

一方，大西洋・インド洋の大部分は周囲のアフリカ大陸・南極・米大陸を太平洋側に押しやり，一部を除いて沈み込み帯を造らないので，それらの大陸の沿岸部の大部分は地震・噴火は稀で安定しており[6]，原発をつくっても自然災害に気を病むことは少ない。東太平洋東部の海洋プレートは南北米大陸西縁部で大陸下に沈み込むが，プレート拡大軸が米大陸の近くに偏っているため，米大陸下に沈み込むプレートは新しく，薄く，熱く，H_2O を構成岩石中に少ししか含んでいないため，その多くは深くマントル内に沈み込まず，大陸地殻直下にへばりついていると考えられている[7]。さらに北米大陸西縁部では場所によって，プレート拡大軸自身が，大陸下に沈み込んでいる[8]。こ

が広範囲に飛散という事態が発生，住民全員の避難を余儀なくさせられる危険性が大きい。この問題については現在考察が十分でないので深くは立ち入れないが，今後非常に綿密に検討すべき重要課題である。

＊　＊

以上，自然災害の国―日本で原発の存在がいかに危険であるかについて火山研究者の立場から略述した。とくに北海道・東北・九州のカルデラ火山が巨大噴火を起こせば，その被害は人命・資産とも，3.11 東日本大震災とはけた違いの規模に達しよう。国家としての存続すら危ぶまれる。これらの大噴火は多分かなり明瞭で観測可能な前兆現象(地盤変動・地熱活動・長周期微動など)をともなうと予想され，事前避難も可能と考えられるが，被災地域が恐ろしく広域のため避難する場所の確保に問題が起こる。九州 6 カルデラ火山中の 1 個が巨大噴火すれば伊方・玄海・川内の 3 原発は完全に破壊され，西南日本全体が放射能汚染で，万年単位で事実上永久に立ち入り禁止区域になる。

八甲田・十和田カルデラ火山のいずれかで巨大噴火が起こった場合，北海道の泊原発，下北半島の東通原発・六ヶ所村核物質貯蔵施設，女川原発などが破壊されよう。支笏・洞爺カルデラ火山の巨大噴火でも泊・東通原発と六ヶ所村貯蔵施設が危険に曝される。

日本国民全員が日本列島を退去，いずれかの受け入れ国に避難という事態も想定される。その時中国・朝鮮半島・ロシア・アメリカなどが 1 億 2000 万人の日本人をどれだけ受け入れてくれるであろうか。加えて巨大噴火によって原発のいくつかが破壊され炉心爆発→放射性物質広域汚染という事態が起これば，避難先からほぼ永久に戻れなくなる。以前のユダヤ民族のように流浪の民として異国をさまようことになるのだろうか。多分それだけでは済まされない。日本をはじめカムチャツカ・フィリピン・インドネシアなどの巨大爆発的噴火を行う火山が複数存在する地域に，原発とそこから生まれる核廃棄物を長期間貯蔵する施設をつくれば，いつか必ず大量の核汚染物質が巨大噴火とともに世界中に「死の灰」を降らせ，人類そのものの存亡が危ぶまれる事態に陥るであろう。高エネルギー核物質をより安定した大陸に移送・保管する国際体制を一刻も早く実現することが望まれる。

文献

1—大島堅一・河野一郎・吉井英勝: 科学, 82, 517(2012) http://www.iwanami.co.jp/kagaku/Kagaku_201205_Oshima_etal.pdf
2—守屋以智雄: 世界の火山地形, 東京大学出版会(2012)
3—横山隆則・久城育夫: 科学, 51, 499(1981)
4—巽好幸: 沈み込み帯のマグマ学, 東京大学出版会(1995)
5—巽好幸: 安山岩と大陸の起源, 東京大学出版会(2003)
6—R. A. Duncan & M. Storey: Geophys. Monograph, 70, 91(1992)
7—G. P. Eaton et al.: Science, 186, 787(1975)
8—T. Atwater: Bull. Geol. Soc. Amer., 81, 3513(1970)
9—J. G. Souther: Canadian J. Earth Sci., 7, 533(1970)
10—守屋以智雄: 世界の地形, 東京大学出版会(1997) pp. 76–90
11—奥野充・他: 名古屋大加速器質量分析計業績報告書, No. 5, 252(1996)
12—守屋以智雄: 地理評, 52, 479(1979)
13—守屋以智雄: 世界の火山地形, 東京大学出版会(1983) p. 135
14—守屋以智雄: 西村地理学退官論集, 古今書院(1980) pp. 214–219
15—L. Siebert et al.: Bull. Volcanol., 49, 435(1987)
16—町田洋・新井房夫: 科学, 46, 339(1976)
17—岡口雅子: 火山, 23, 231(1978)
18—松本哲一・他: 日本火山学会講演会予稿集, 1991(2), 73(1991)
19—小野晃司・渡辺一徳: 火山地質図 4, 地質調査所(1985)
20—町田洋・新井房夫: 火山, 28, 206(1983)
21—宇井忠英・渡辺一徳: 火山, 42, 403(1997)
22—原山智・山本明: 超火山「槍・穂高」, 山と渓谷社(2003)
23—勝井義雄・他: 北海道における火山に関する研究 6, 北海道防災会議(1977) p. 82
24—守屋以智雄: 地理評, 52, 479(1979)
25—T. Simkin & R. Fiske: Krakatau 1883, Smithonian Inst. Press (1983)
26—S. Aramaki: J. Geophys. Res., 89, 8485(1984)
27—町田洋・新井房夫: 新編火山灰アトラス, 東京大学出版会(2011)
28—高橋正樹: 破局噴火, 祥伝社(2008)
29—S. Nagaoka: Geogr. Rept. Tokyo Metropol. Univ., 23, 49(1988)
30—新東晃一: どるめん, 19, 40(1978)

噴火と原発（守屋以智雄　科学，2014年1月号）

審査の矛盾

川内原発が火砕流に襲われる確率

- 過去10万年に2回（阿多火砕流・入戸火砕流）に襲われている．→今年襲われる確率1/50000（50000年に1回ではない）
- これからの50年に火砕流に襲われる確率．1/50000×50＝1/1000＝0.1%
- 50年以内に発生確率0.1%と言うのは，活断層と同じレベル．

科学者の意見

降下火砕物に関する文献調査

29

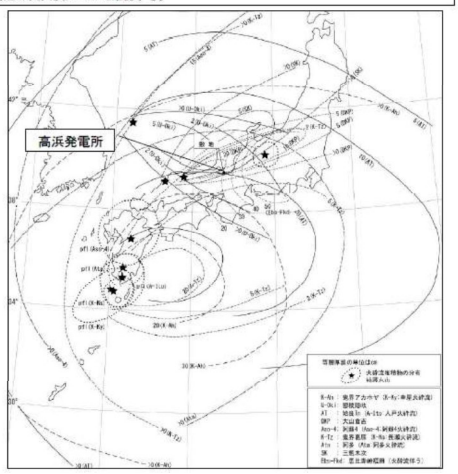
地質調査結果に加え、文献調査によっても敷地周辺の火山灰について確認する。

文献に記載の主な広域火山灰

「新編火山灰アトラス」によれば、敷地周辺における火山灰の分布厚さとして、

・姶良Tnテフラ（約20cm）
・大山倉吉テフラ（約5-10cm）

が記載されている。



「新編　火山灰アトラス」（2003）に追記

高浜発電所　火山影響評価について（関西電力，2013.10.09）

原発名	噴火被害リスク	再稼働反対
川内（鹿児島県）	29	19
泊（北海道）	25	15
東通（青森県）	18	11
玄海（佐賀県）	16	9
伊方（愛媛県）	11	5
女川（宮城県）	9	3
福島第1（福島県）	7	2
福島第2（同）	7	2
東海第2（茨城県）	7	2
島根（島根県）	7	3
浜岡（静岡県）	6	2
柏崎刈羽（新潟県）	5	1
志賀（石川県）	5	1
敦賀（福井県）	5	1
美浜（同）	5	1
大飯（同）	5	1
高浜（同）	4	1
どれもない	9	—
無回答	12	—

影響評価に用いる降下火砕物の条件

32

高浜発電所の降下火砕物による影響評価に用いる条件について、地質調査結果に文献調査結果も参考にして、以下のとおり設定する。

項　目	条　件	設定根拠
堆積厚さ	20cm	津波堆積物調査結果からは約10cmであるが、保守的に文献調査結果も参考にして設定
粒径	0.2mm ～ 1.0mm	津波堆積物調査結果、文献調査結果から設定
密度	乾燥状態　湿潤状態 0.7g/cm^3 ～ 1.5g/cm^3	津波堆積物調査結果、文献調査結果から設定

高浜発電所　火山影響評価について（関西電力，2013.10.09）

巨大噴火の予測と監視に関する提言

巨大噴火の予測や火山の監視は，内閣府の大規模火山災害対策への提言（平成25年5月16日）や，原子力発電所の火山影響評価ガイド（平成25年6月19日）等により，重要な社会的課題となっている．

- 巨大噴火（≥VEI 6）の監視体制や噴火予測のあり方について
  - 日本火山学会として取り組むべき重要な課題の一つと考えられる．
  - 巨大噴火については，国（全体）としての対策を講じる必要があるため，関係省庁を含めた協議の場が設けられるべきである．
  - 協議の結果については，原子力施設の安全対策の向上等において活用されることが望ましい．
- 巨大噴火の予測に必要となる調査・研究について
  - 応用と基礎の両面から推進することが重要である．
  - 成果は，噴火警報に関わる判断基準の見直しや，精度の向上に活用されることが重要である．
- 火山の監視態勢や噴火警報等の全般に関して
  - 近年の噴火事例において表出した課題や，火山の調査・観測研究の将来（技術・人材育成）を鑑み，国として組織的に検討し，維持・発展させることが重要である．
  - 噴火警報を有効に機能させるためには，噴火予測の可能性，限界，曖昧さの理解が不可欠である．火山影響評価ガイド等の規格・基準類においては，このような噴火予測の特性を十分に考慮し，慎重に検討すべきである．

日本火山学会原子力問題対応委員会　平成26年11月2日（日）

鹿児島大学　井村隆介

MBC南日本放送　ニューズナウ（2014.01.08放送）

日本大学　高橋正樹　教授

MBC南日本放送　ニューズナウ（2014.01.08放送）

東京大学　地震研究所　中田節也　教授

MBC南日本放送　ニューズナウ（2014.01.08放送）

東京大学　地震研究所　中田節也　教授

MBC南日本放送　ニューズナウ（2014.01.08放送）