

意見書

2021（令和3）年 9 月 19 日

鹿児島地方裁判所民事第1部 御中

福岡高等裁判所第4民事部 御中

巽 好幸 ■■■

原子力発電所の安全性が争われている裁判について、火山の専門家である学者として科学的な立場から以下に意見を述べることにいたします。

1 経歴

私の専門はマグマ学で、学歴・経歴は次のとおりです。

- ・1978年 京都大学理学部卒業
- ・1983年 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（理学博士）

その後、マンチェスター大学・タスマニア大学研究員、京都大学総合人間学部教授、同大学大学院理学研究科教授、東京大学海洋研究所教授、独立行政法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）地球内部ダイナミクス領域・プログラムディレクターなどを経て、2012年より神戸大学に所属し、大学院理学研究科教授、海洋底探査センター教授・センター長、高等研究院海共生研究アライアンス長などを務め、現在神戸大学名誉教授並びに海洋底探査センター客員教授です。

これまでの研究業績などについては、以下に参考情報を記します。

- ・受賞歴：日本地質学会賞（2003年）、日本火山学会賞（2011年）、米国

地球物理学連合 N. L. ボーエン賞 (2012年)。

- ・研究業績 (9月8日時点の Web of Science に基づく) : 論文数、153 ; 被引用数、8831 ; Hi-Index、49。

2 噴火規模に基づく噴火の名称

火山噴火の規模を定量的に表すには噴火マグニチュードという指標を用いるのが適切であります¹、本訴訟においてはVEI (火山爆発指数) を用いているようですので、それに合わせます (表1)。またこれらの噴出物量に基づいて、表1に示すような噴火の名称が火山学分野では一般的です。例えば、噴出物量が10 km³以上100 km³未満であるVEI 6の噴火を巨大噴火、噴出量が100 km³以上であるVEI 7以上の噴火を破局的噴火と呼びます。ここで注意が必要なのは、噴出物量とは火山灰や軽石など密度の低い物質を含んだ体積であり、マグマ噴出量とはこれらをマグマに換算した体積であることです。以下では、特にマグマ噴出量と記載しない限りは噴出物量を指すように記述します。なお、噴出物量はマグマ噴出量のおよそ2.5倍となります。

表1 噴火マグニチュードと噴火の発生確率

火山爆発指数 (VEI)	噴出物量 (km ³)	噴火マグニチュード	噴出物量 (億トン)	マグマ噴出量 (km ³)	名称
2	0.001	2	0.01	0.0004	中規模噴火
3	0.01	3	0.1	0.004	
4	0.1	4	1	0.04	大規模噴火
5	1	5	10	0.4	
6	10	6	100	4	巨大噴火
7	100	7	1000	40	超巨大噴火 (破局的噴火)
8	1000	8	10000	400	
		9	100000	4000	

表1にあるように、「巨大噴火」とはVEI 6または噴火マグニチュード6を、超巨大噴火 (破局的噴火) はVEI 7または噴火マグニチュード7以上の噴火を

¹ 噴火マグニチュードは、噴出したマグマの総重量から算出する数値で、火山爆発指数 (VEI) と異なり、火山砕屑物だけでなく、溶岩も含めた噴出物の総重量を用いる。

指すのが、火山専門家の間では一般的です。一方で、令和元年12月18日に改正された原子力発電所の火山影響評価ガイドでは、「巨大噴火」を、大量の火砕流を伴い噴出量が「数十立方キロメートル程度を超えるもの」としていますが、このような定義は原子力規制委員会・規制庁の独自のものです。

3 マグマの発生と破局的噴火のメカニズム

私の意見を述べる前にまず、その拠り所となる「沈み込み帯におけるマグマの発生と破局的噴火のメカニズム」について、多くの研究者のコンセンサスとなっている考え方を簡潔に示すことにします。

3.1 沈み込み帯におけるマグマの発生

日本列島のように海洋プレートが海溝から地球内部へ落下する「沈み込み帯」は、地球上で最もマグマの生成が盛んで火山が密集する地帯の1つです。海洋プレートが落下するのは海嶺で形成されたプレートが時間と共に冷えて、周囲のマントルより重くなるためですが、それにもかかわらず、熱いマグマが発生する原因は「水」（正確には超臨界状態の H_2O ）にあります。

海洋プレートは海底下のマグマ活動によってできるため、含水鉱物として水を含んでいます。プレートが沈み込むと温度・圧力ともに上がり、その結果プレート内に存在する含水鉱物の一部は脱水分解して水を吐き出します。この水は軽いため、上方へ移動し、周囲のマントルと反応して「含水

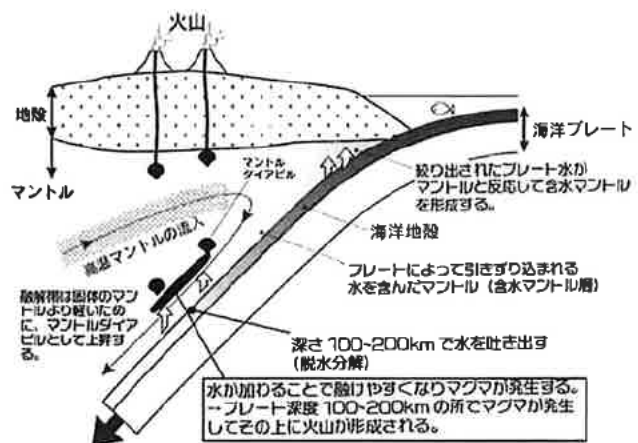


図1 沈み込み帯におけるマグマ発生メカニズム。
Tatsumi et al., (2020) を修正加筆。

マントル」を形成します（図1）。この含水マントルと海洋プレート内の含水鉱物に固定された水は、100～200kmの深さに達するとほとんど全てが脱水分解によって絞り出されます（図1）。

水には、物質の融点を下げる、つまり融けやすくするという大きな特徴があります。そのために、海洋プレートが深さ100～200kmに達して脱水分解すると、その上にあるマントル物質が融けてマグマが発生するのです（図1）。従って、沈み込み帯の火山の多くは、深さ100～200kmの海洋プレートの上に形成されます。

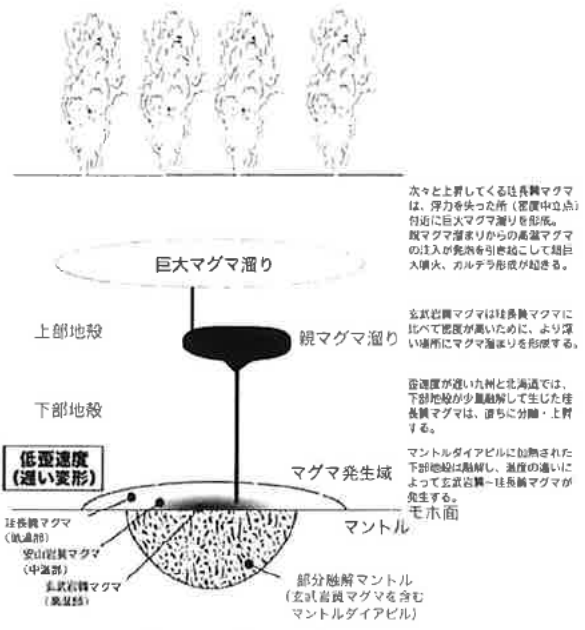
融解したマントル物質は軽い液体のマグマを含むので、融けていない固体のマントルより軽くなります。その結果、重い非融解部（固体部）が軽い融解帯の上に位置するという重力的に不安定な状態となります。この不安定を解消するべく、融解帯の物質は「マントルダイアピル」として上昇するのです（図1）。上昇する経路で、プレートの沈み込みの結果として形成される高温マントル領域を通過することで、マントルダイアピルは1300℃程度的高温となります。そしてこのマントルダイアピルは地殻の底であるモホ面付近まで達すると上昇を停止します。地殻物質はマントルダイアピルより密度が低いからです。マントルダイアピルは上昇を停止しますが、その内部に存在するマグマは固体の地殻物質よりは軽いので、やがて地殻へと上昇して行きます（図1）。

3.2 破局的噴火に至るマグマプロセス

地殻内では様々な要因で多様なマグマ過程が起こりますが、ここでは今回の事案に関係する破局的噴火に至るプロセスを概説することにします。

マントルダイアピルは1300℃程度の高温であり、そのため地殻とマントルの境界（モホ面）まで到達すると、融点が1000℃程度下部地殻物質は融解します。ただし、マントルダイアピルからの距離によって加熱程度

が異なるので、高温部の玄武岩質から低温度部の珪長質まで多様な組成のマグマが形成されます(図2)。この地殻が融解して発生した玄武岩質マグマやマントルダイアピルから地殻内へ上昇した玄武岩質マグマは粘り気が少ないために、マグマ発生領域から容易に上昇することができます。ただし、上部地殻まで上昇すると



すると周囲の密度が小さくなるために密度差がなくなる「密度中立点」付近で停止して「親マグマ溜り」を形成します(図2)。一方で下部地殻で発生した珪長質マグマは粘り気が強いために周囲の物質との密度差によって駆動される上昇は容易ではありません。

しかし地殻の歪速度が小さく変形しにくい性質の地殻ではマグマが上昇する空隙(岩石内の隙間)が潰れにくく、また周囲の岩石に対して相対的にマグマの粘性が下がります。したがって、地殻歪速度が小さい地域では珪長質マグマも上昇しやすくなり、地殻の下部で珪長質マグマが発生すると同時に上昇することができます(図2)。こうして次々と上部地殻へと上昇してきた珪長質マグマは、密度中立点付近に巨大なマグマ溜りを形成することになるのです。日本列島で地質記録がよく残っている過去1.2万年間に破局的噴火が起きたのは九州と北海道に限られていますが、この原因はこれらの地域の地殻歪速度が小さいからです(Tatsumi and Suzuki, 2014)。

なお、珪長質マグマは玄武岩質マグマより密度が小さいために密度中立点は浅くなると予想されます。この場合の中立点深度は、非常に均質かつ単純

な地殻物質を仮定すると、5～10kmとなります。しかしこの深さは、地殻の密度分布（岩石の種類）や物性、それに応力状態などによってはさらに深い位置にマグマ溜まりが形成される可能性も十分にあります。また、破局的噴火を引き起こすマグマは珩長質に限られたものではなく、より密度が大きい安山岩質の場合もあります。噴出物の化学組成と高圧実験や熱力学的なモデルに基づいてマグマ溜まりの深さを推定することは可能ではありますが、現状ではいずれの方法でも誤差が大きい上に、異なる方法で同一の結果が得られない場合も多く、これらが信頼性の高い絶対値を表すとは言えません。

例えば、始良カルデラにおける約3万年前の破局的噴火については、異なるモデルに基づいてそれを引き起こしたマグマだまりの深さは数km～20kmの幅で推定されていますが、どのモデルが絶対値として正しいかは判断できません。したがって、このような推定の一部を用いてマグマ溜まりの深さを議論することは合理性がありません。例えば深さ10kmより深い場所にあるマグマ溜まりは珩長質ではないとは結論することはできません。最終的には、稠密な地球物理学的探査によって個々の火山についてマグマ溜まりの位置を特定することが必要です。

この珩長質のマグマ溜まりへ親マグマ溜まりから高温の玄武岩質マグマが注入されると、珩長質マグマは加熱されてマグマ中の水の溶解度が低下し、マグマ中に溶け込んでいた水がガスとなる発泡現象が起きます。そのことで体積が急増するので、マグマ溜まり内では圧力が高くなり、周囲の地殻物質を破壊することになります。マグマ溜まり上部の地殻が破壊されるとその部分の圧力は下がりますので、ますます発泡が加速されて破壊が広がり、ついにはマグマ溜まり内の多量のマグマが一気に噴出する破局的噴火（超巨大噴火）へと進みます（図2）。またこの噴火過程でマグマ溜まりにできた空洞が陥没して、カルデラが形成されます。

3.3 巨大マグマ溜まりの状態と破局的噴火

破局的噴火が開始するには、巨大なマグマ溜まりが火山の地下に形成されていることが必要です。しかしマグマ溜まりは液体状態のマグマで充填されているとは限りません。マグマは多くの成分から構成されているために、完全に液体となる温度（リキダス温度）と完全に結晶化する温度（ソリダス温度）の間の温度帯では、液体と結晶が存在する状態（部分融解状態）にあります。このことを踏まえて、高温の巨大マグマ溜まりの冷却に伴う進化を模式的に表したものが図3です。(a)は破局噴火直前、あるいは破局噴火直後にまだ相当量のマグマが残っている

状態を示しています。このマグマ溜まりが冷却すると結晶化が進み、(b)のように結晶の沈積・圧縮によってメルトが絞り出されるように上昇して層状に分布するようになると考えられます。さらに温度が下がると、結晶同士が連結するためにはやメルトは移動することが困難となり、(c)のように結晶と結晶の間に存在するようになります。

(a) 高温状態 (メルト > 結晶)



(b) 温度低下 (メルト < 結晶)



(c) 低温状態 (メルト << 結晶)



図3 巨大マグマ溜まりの進化。Backmann and Bergantz (2008) に加筆。

ここで重要なことは、(b)や(c)の状態にあるマグマ溜まりでも、図2に示したように高温のマグマが供給されると図3(a)の状態、すなわち破局的噴火を起こしうる状態へと変化する可能性があることです。この状態変化のタイムスケールは、供給されるマグマの温度や量、それに巨大マグマ溜まりの大きさや温度に依存し、大きく変化すると予想されます。これまでこのような

状態変化を追跡した研究は存在しませんが、Tatsumi et al. (2006)の数値解析を参考にすると、場合によっては10年オーダーで(c)から(a)へと変化して破局的噴火に至ることもあり得ます。したがって、破局的噴火を起こす可能性のある火山については、図3(a)の状態のみならず、(b)や(c)の状態も「マグマ溜まり」と考えておくことが必要であることは間違いありません。

では、図2や図3に示したような巨大マグマ溜まりを、観測によって検知することは可能でしょうか？このような観測は、原理的には病院のCT検査と同じ方法で、X線の代わりに例えば地震波を用いて行うことができます。米国のイエローストーンやインドネシアのトバ火山では、広範囲に稠密に配置した地震計を用いた長期間の観測などの方法を用いて、地下に巨大なマグマ溜まりが存在しているらしいことが示されています。残念ながら日本列島の火山については、このレベルの観測はまだ行われていません。

ただこれらの自然地震を用いた観測では、地震数が少ないために正確にマグマ溜まりの位置や大きさ、形状を求めることは困難です。さらに高精度な推定を行うには、人工地震を用いた高密度・大規模な観測が必要です。ただこのような人工地震を用いた大規模火山地下構造探査は、これまで世界では例がありません。そこで、巨大マグマ溜まりが地下に潜む可能性が高い鬼界カルデラ火山において、神戸大学とJAMSTECが連携して、世界初の人工地震を用いた大規模地下構造探査を行なっているところです。

一方でこのような観測が実現したとしても、例えば図3の(b)や(c)の状態にあるマグマ溜まりを捉えることができるかどうかは現時点では分かりません。結晶の割合が増えた部分熔融状態と、周囲の固体の地殻を物性の違いによって識別することは相当に困難であるからです。

結論を申し上げますと、少なくとも現時点では、過去に破局的噴火を起こした日本列島の火山の地下に、近い将来破局的噴火を起こす可能性のある巨大なマグマ溜まりが存在しないことを示す科学的知見は存在しません。さらに、

このようなマグマだまりの存在を否定することは科学的に極めて困難であります。

3.4 破局的噴火の周期性

噴火によって噴出される火山灰が地層内に比較的良好に保存されている過去12万年間では、日本列島で少なくとも11回の破局的噴火が起きています(図4)。この事実に基づいて、日本列島では破局的噴火は約1万年の周期で発生するという見解があります。しかしこの考え方は、次の2つの点で統計学的に誤りです。

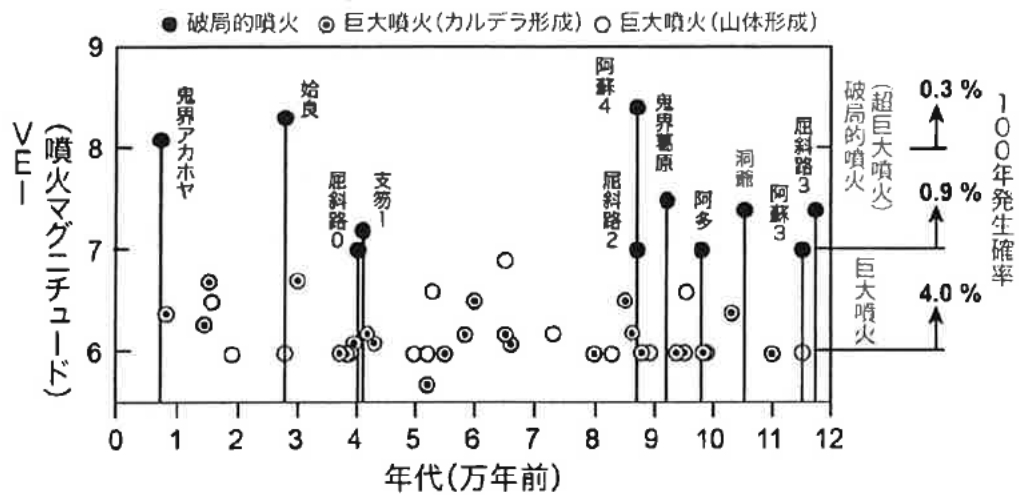


図4 過去12万年間に日本列島で起きた巨大噴火と破局的噴火、及びそれらの発生確率。巽(2019)を修正・加筆。

- 独立した事象から平均周期を求めていること：火山は、互いになんら相互作用なく独立に活動をしており、このようなランダムに起きる事象のデータ全体を用いて平均周期を求めることは無意味です。一方でこのような場合については、それぞれの火山活動が例えばポアソン過程に従うとして発生確率を求めることはできます(図4)。
- 誤差：仮に平均周期を求めることができる場合でも、同時にその誤差も

考慮すべきです。上述の日本列島の破局的噴火について参考までに「平均周期」と誤差を求めると、 $1万967 \pm 1万3704$ 年となり、平均値より誤差が大きい無意味な数字となります。

上述のように、異なる火山の活動をまとめて用いて周期を求めることは無意味です。一方で、同一火山に対しては、活動の周期を求めることは将来の噴火を予測する上で意味がある可能性があります。しかしながら日本列島の火山において、噴出量と噴出年代のデータに基づいて3度以上破局的噴火が発生したことを確認できるのは、阿蘇カルデラと屈斜路カルデラのみです。しかしいずれも4度しか破局的噴火を起こしていませんので、このデータから普遍性のある活動周期を求めることができるかどうかは判断の分かれるところです。そこで試しにこれらの破局的噴火の平均周期と誤差を求めると、それぞれ、 $5万6000 \pm 5万7000$ 年と $1万2000 \pm 7万8000$ 年となります。このように誤差の大きい結果では、両火山については、破局的噴火に周期性を認めることはできないと結論せざるを得ません。なお当然のことですが、過去に破局的噴火を2度しか起こしていない火山に対して、周期を求めることは不可能であると同時に、これらの火山における破局的噴火に対して「活動間隔」や「休止期間」という概念も全く適用できません。

したがって現時点では、過去に破局的噴火が発生した時期に基づいて、将来予測も行うことは不可能であると結論されます。

最後に、複数の火山で発生した、つまり互いに因果関係がない独立した事象である破局的噴火について、これらがポアソン過程に従うとして求めた発生確率（図4）について補足説明を加えます。過去12万年前のデータに基づけば、日本国内（実際には北海道と九州）で今後100年間に破局低噴火が起きる確率は約1%です。ここで問題となるのが、この一見低い確率が差し迫った状況を示すか否かです。この点について私たち地球科学の専門家がたびたび例としてあげるのが、1995年の兵庫県南部地震（阪神淡路大震

災)です。地震発生後に地質調査などによって、震源断層について過去の地震発生周期や地震の規模について調査が進みました。このデータに基づいて、地震発生直前の100年地震発生確率を求めるとほぼ0～数%となります。しかし実際には地震が発生したのです。すなわち、破局的噴火についても低確率であるから切迫した状況にない、ということはありません。

4 「原子力発電所の火山影響評価ガイドにおける「設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価」に関する基本的な考え方について(平成30年3月7日)」における巨大噴火の可能性評価について

原子力規制庁の資料「原子力発電所の火山影響評価ガイドにおける「設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価」に関する基本的な考え方について(平成30年3月7日)」において示されている2つの基本的考え方について意見を述べます。結論を先に述べておくと、いずれの考え方も不合理です。

基本的考え方1：巨大噴火の可能性評価に当たっては、火山学上の各種の知見を参照しつつ、巨大噴火の活動間隔、最後の巨大噴火からの経過時間、現在のマグマ溜まりの状況、地殻変動の観測データ等から総合的に評価を行い、火山の現在の活動状況は巨大噴火が差し迫った状態にあるかどうか、及び運用期間中に巨大噴火が発生するという科学的に合理性のある具体的な根拠があるかどうかを確認する。

この考え方についてまず強い違和感を感じざるを得ないのは、運用期間中に巨大噴火が発生すると科学的に合理性がある具体的な根拠があるかどうかを確認する、という基本的な姿勢です。そもそも原子力発電所の安全な運用を担保するのであれば、運用期間中に巨大噴火が発生する可能性がないことを、科学的に合理的な根拠によって示すことが必要でしょう。しかも次に述べるように、現時点では「運用期間中に巨大噴火が発生すると科学的に合理性がある具体的な根拠」

を示すことは科学的には不可能です。

では、巨大噴火の可能性を総合的に評価するための材料として挙げられている項目について検討することにします。なお、この意見書の第2章で述べたように、原子力規制委員会の「巨大噴火」の定義が一般的に私たち火山の専門家が使うものとは異なりますので、曖昧な議論を避けるために、「巨大噴火」を「破局的噴火」($VEI \geq 7$)と読み替えて検討いたします。当然ですが、破局的噴火の方が原子力規制委員会の巨大噴火より大規模かつ原子力発電所への影響も大きいものです。

破局的噴火の活動間隔、最後の破局的噴火からの経過時間: これらについては、すでに前章で述べたように、将来の破局的噴火の予測には使うことはできません。その根拠を要約すると次の2点です: (1) 現状では、統計的に意味のある単一火山における破局的噴火の活動間隔を求めることはできない、(2) 活動間隔が不明である以上、休止期間はなんら予測につながる情報は与えない。

現在のマグマ溜まりの状況: この点に関してまず重要なことは、マグマ溜まりとは「この程度の深さに、この程度の大きさのマグマ溜まりが存在すると考えれば、観測・観察事実を説明することができる」というものに過ぎないのが現在の調査研究の水準で、様々な可視化技術を用いて正確にその存在や形状が示された例はないということです。このような現状で、「マグマ溜まりの状況」を正確に把握して、破局的噴火の予測を行うことは不可能と言わざるを得ません。さらに前章でも述べたように、破局的噴火に関わるマグマ溜まりには、ある程度結晶化が進んでいるが高温マグマの注入により破局的噴火を引き起こすことが十分に考えられるマグマ溜まり(図3の(b)や(c))を考える必要があります。しかし現状ではこのようなマグマ溜まりを科学的に検出することは不可能です。

地殻変動の観測データ: これまでに発生した破局的噴火に対しての地殻変動の観測データが無い以上、運用期間中に巨大噴火が発生するという合理性がある具体的な根拠の有無を地殻変動の観測データに基づいて示すことは原理的に不可

能であることは明白です。

同様に、破局的噴火直前の観測データが存在しない以上、「火山の現在の活動状況は巨大噴火が差し迫った状態にあるかどうか」を判断することも不可能です。地震に関しては「前兆現象を基にした直前予知」が不可能であることは学界では周知の事実であり、それゆえに政府は「確率論的地震発生予測」を行なっています。当然ながら破局的噴火については、科学的に根拠のある前兆現象は認識されていません。また、個々の火山については過去における破局的噴火の回数が少ないために、統計的に優位な「確率論的噴火発生予測」を行うことは極めて困難です。仮に先に述べたポアソン過程に基づいて、今後 100 年間に破局的噴火が日本で起きる確率を求めると 1%程度となります。この値と、兵庫県南部地震発生直前の地震発生確率を比較すると、我が国では破局的噴火はいつ起きてもおかしくない、すなわち切迫した状態にあることとなります。

以上指摘したように、この原子力規制委員会の火山影響評価に関する基本的な考え方は、現状では不可能なデータを示さない限り「破局的噴火の噴火の可能性は考慮する必要がない」というものであり、国民の安全を担保するという観点からは全く不適切です。

基本的考え方2：巨大噴火は、広域的な地域に重大かつ深刻な災害を引き起こすものである一方、その発生の可能性は低頻度な事象である。現在の火山学の知見に照らし合わせて考えた場合には運用期間中に巨大噴火が発生する可能性が全くないとは言い切れないものの、これを想定した法規制や防災対策が原子力安全規制以外の分野においては行われていない。したがって、巨大噴火によるリスクは、社会通念上容認される水準であると判断できる。

この考え方には根本的に誤りがあります。それは「破局的噴火を想定した法規制や防災対策が行われていない現状では、破局的噴火によるリスクは社会通念上容認される」という判断です。この社会通念上という言葉は法解釈などで1つの

判断材料になっていますが、破局的噴火に関しては社会一般の常識が欠如していると言わざるを得ません。そのことを以下に説明いたします。

災害や事故などに関してリスク評価を行う際に、重要な判断基準として考えねばならない指標の1つは、想定される被害と発生確率を乗じた「危険値」です。統計学ではこの概念は「期待値」と呼び、例えば宝くじなどを購入する際にどの商品が有利であるかの判断に使われます。当選頻度（確率）が低くても賞金が高い商品は、当選頻度が高くとも賞金が少ないものより有利な場合があることを数字として示すことができます。ただここでは、災害や事故に対しては危険値の方が適切な名称と考えこの用語を使用します。ここでいう危険値とは、当該災害や事故で毎年平均するとどの程度の数の死亡者が出るかを表すこととなります。

表2に、いくつかの災害や事故に関する危険値を示します。台風・豪雨被害は毎年見舞われる災害であり、水難事故や交通事故も毎年多くの死亡者がでています。これらは頻度が

表2 事故や災害の危険値

	想定死亡者数 (人)	年間発生確率 (%)	危険値 (人/年)
台風・豪雨災害	250	100	250
水難事故	800	100	800
交通事故	4,000	100	4,000
首都直下型地震	23,000	4	900
南海トラフ巨大地震	330,000	4	13,000
富士山大噴火	14,000	0.1	15
富士山山体崩壊	350,000	0.02	70
九州破局的噴火	120,000,000	0.003	3600

高いこともあり、その被害を軽減することが必要であることは社会通念となっており、実際に対策が講じられています。これらに比較して、首都直下地震や南海トラフ巨大地震は発生確率の低いにもかかわらず被害が大きい、いわゆる「低頻度大規模災害」です。これらについては、阪神淡路大震災や東日本大震災を経験した私たちはそのリスクの高さを認識しており、まだ十分とは言えないまでも対策を講じることの必要性は社会通念上認められているように見えます。火山災害に関して眺めると、首都圏が被害対象となることもあって、富士山噴火は社会的関心が高く、ハザードマップの作成も進められています。一方で、噴火よりも低頻度ではあるものの、一度起きると甚大な被害を及ぼす富士山山体崩壊について

は、直近の事例が有史以前の2万900年前に発生したこともあって、このリスクを社会が共有しているようには感じられません。しかしながら、その危険値は富士山噴火と同程度またはそれを凌ぐ値であることは認識すべきでしょう。

さてそれでは、破局的噴火の危険値を考えてみましょう。ここでは、破局的噴火に伴う火山灰の拡散や降灰、それに火砕流の分布などについて最も地質学的なデータが揃っている始良カルデラで2万9000年前に起きた破局的噴火が、被害が最も大きくなる九州中部で発生した場合、すなわち最悪の被害を想定しています（Tatsumi and Suzuki, 2014）。この破局的噴火では、北海道と沖縄を除く日本列島の大部分が10cm以上の火山灰で覆われ、気象庁や米国の国立学術文化研究機関であるスミソニアン協会の資料にもあるようにこの領域のライフラインは完全にストップします。現状ではこのライフラインの復旧対策が講じられていないために、最悪この領域に暮らすすべての人たちは生き残ることができません。このようなまさに破局的な被害をもたらすために、他の災害に比べて圧倒的に低頻度（低確率）であるにもかかわらず、その危険値は交通事故と同程度に高くなります。

このような重大な危険性があるにもかかわらず、破局的噴火を想定した法規制や防災対策が行われていないのは、単に立法府や行政府、ひいては社会全体の認識不足にすぎません。また、前述した「危険値」の考え方からすれば、危険値の大きい災害に対しては通常よりも保守的な想定をすべきであり、他に破局的噴火を想定した法規制がないということが、原発の安全評価においても破局的噴火を想定しなくてよいという根拠にはなり得ません。破局的噴火によるリスクは社会通念上許容される水準であるとの結論は明らかに不合理です。

5 事業者による火山活動の影響評価について

平成26年4月23日に示された、事業者（九州電力）による火山活動の影響

評価について意見を述べます。

5.1 将来の活動可能性

将来の活動可能性の評価方法の判断根拠①として挙げられている、最後の活動終了からの期間が過去の最大休止期間よりも長いということ、および判断根拠②として用いられている、火山の寿命（平均数十万年）という見解に基づいて約100万年前以降の活動が認められない場合は将来の活動可能性

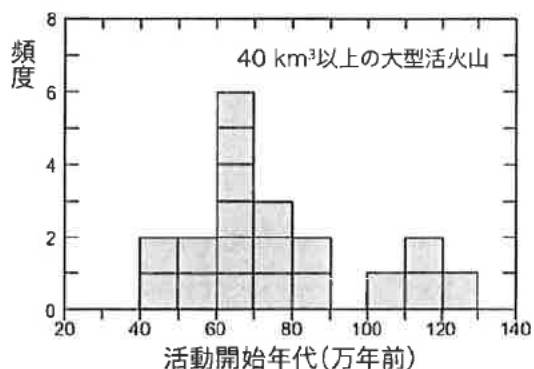


図5 日本列島の大型活火山が活動を開始した年代。データは産業技術総合研究所編集のWeb公開データベース「日本の火山」による。

はない、ということ是不適切です。なぜならば、最新のデータによると、図5に示すように、体積が40km³を超える大型成層火山ではその寿命は100万年以上であり、最後の活動終了からの期間が100万年より長いとしても、将来の活動可能性がないと判断する根拠にはなりません。

また判断根拠③として、火山活動が東へ移動したことから川内原発敷地周辺では今後火山活動の可能性はないと評価しています。確かに、火山フロントより海溝から遠くプレート震度が深い場所、つまりこの地域では火山フロントの西側の火山活動（火山の形成）は、火山フロントに比べて火山がまばらに分布することは世界中の沈み込み帯で認められます。しかし、この地域の地下140kmにはフィリピン海プレートが存在していることは地震学的に明らかにされており、3.1で述べたように、この領域ではプレート上面付近でマグマが発生しているのが合理的です。川内、北薩火山群などは1つの大型の山体を形成する成層火山ではなく比較的小型の単発的な活動を繰り返す単成火山群であり、最後の活動は約100万年前とされています。個々の単成火山の活動継続期間（寿命）は成層火山に比べると短いのですが、例えば山口県阿武単成火山群のように、100

万年近い休止期の後活火山として活動することもあります。すなわち、過去に火山フロントが東へ移動したことは事実であります。このことが将来川内原発周辺で火山活動が起きないことを意味するわけではありません。科学的には、「現在は活動は見られないが、今後活動する可能性はある」と結論することが妥当です。

以上のことから、将来の活動可能性の評価方法には明かな欠陥があり、このことを考慮すると、将来の活動可能性のある火山として、川内原発周辺の川内火山、北薩火山群、薩摩丸山、蘭牟田火山などを加えることが必要です。

5.2 運用期間中の噴火規模

事業者は、過去に破局的噴火を起こしたカルデラ火山について運用期間中の噴火規模を検討しています。その評価方法①-1が破局的噴火の活動間隔と直近の破局的噴火からの経過時間の比較ですが、すでに3章で明らかにしたように、この方法は科学的な意味を持ちません。個々のカルデラ火山については次の節で具体的にその不合理性を指摘することにします。

評価方法①-2では、噴火ステージ(Nagaoka, 1988)という概念を用いて現在および将来におけるカルデラ火山の破局的噴火の発生可能性を検討しています。具体的には、後カルデラ火山噴火ステージにある火山では破局的噴火の可能性は十分に低いと評価するものです。しかしこの評価方法は以下に述べる点で合理性のあるものとは言えません：

- Nagaoka (1988) が述べているように、この噴火ステージモデルは暫定的(tentative)なもの、すなわち作業仮説であり、破局的噴火やカルデラ形成を伴う火山に対して定量的かつ普遍的に成立するかどうかを検証されたものではありません。論文中にも鬼界カルデラはこのモデルが適用できないことが述べられています。
- 仮に大局的にはこのような噴火ステージの変遷が認められたとしても、一つの火山で同じようなサイクルが繰り返す保証は全くありませんし、

またその時間スケールについても不明です。例えば、プリニー式噴火ステージというものがどの程度継続するのか、また後カルデラステージがどれくらいの期間継続して次の破局的噴火に至るのかについては、個々の火山について求められているわけではありません。したがって、たとえ後カルデラステージにあることが確実に認定されたとしても、運用期間中に破局的噴火の可能性が十分に低いとは結論できません。

評価方法②-1では、巨大マグマ溜まりが形成される可能性が高い約10km以浅におけるマグマ溜まりの有無を評価するとしています。この約10km以浅という値は、珪長質マグマが密度中立点で浮力を失い停止する深さですが、先にも述べたように、地殻内の力学的状態によってはさらに深い場所に巨大マグマ溜まりが形成される可能性も考慮しなければなりませんし、マグマ溜まりの深さを正確に求めることは現状では極めて困難です。さらに図に示されているように、事業者は、マグマ溜まりはマグマで充填されていると考えています。これはあまりにも古典的な認識で、現在では3.3で述べたように、結晶化（固化）が進行した状態のマグマ溜まり（図2(b)(c)）も考慮する必要があります。

5.3 評価結果

(1) 南部九州のカルデラの概要

鹿児島地溝内の破局的噴火の活動間隔を求めて、それが直近の破局的噴火からの経過時間より長いことから運用期間中に破局的噴火が起きる可能性は十分に低いと結論しています。しかし3.4で述べたように、異なる火山で起きた破局的噴火を用いて活動間隔を求めることは科学的には全く意味がありません。したがってこの値と経過時間を比較することも同様に無意味であり、得られた結論も何ら合理性がありません。

3.4でも述べたように、異なる火山では独立事象である噴火現象の可能性が低いか高いかは、確率として評価すべきです。例えばこれらの独立事象の発生

がポアソン過程に従うと仮定して、過去60万年間のデータ（産業総合研究所のデータベース）に基づく、鹿児島地溝内で8回、阿蘇を入れると12回の破局的噴火（マグマ噴出量 $> 40 \text{ km}^3$ ）が発生している、今後100年の発生確率はそれぞれ、1.2%と2%となります。この確率は、例えば日本の直下型地震（1995年兵庫県南部地震、2014年熊本地震など）の発生前日の発生確率と同程度です。すなわち、九州中南部では、川内原発運用中に破局的噴火が起きる可能性は十分にあると結論できます。

(2) 始良カルデラ

ア 噴火履歴に基づく検討

事業者はまず鹿児島地溝における3座のカルデラ火山について求めた破局的噴火の平均間隔（約9万年）と始良カルデラにおける直近の破局的噴火からの経過時間（約3万年）を比較して、破局的噴火は差し迫った状況になると述べていますが、破局的噴火が周期的に発生するということが実証されたことは未だありません。鬼界を含む4座を考えれば周期性なしとしていますが、周期性がないにもかかわらず破局的噴火の活動間隔（約6万年）が最新の破局的噴火からの経過時間（約0.7万年）よりも十分長いことから運用期間中の破局的噴火は起きないと結論するのは科学的に意味がありません。3章で述べたように、現時点では過去に破局的噴火が発生した時期に基づいて、科学的な将来予測も行うことは不可能です。

次に、Nagaoka(1988)に基づいて、破局的噴火に先行するプリニー式噴火ステージの兆候が現在認められないことから、破局的噴火までは十分な時間的余裕があるとしています。しかし先に指摘したようにNagaokaの噴火ステージの概念は、未だ確立されたものではありません。すなわちプリニー式噴火が破局的噴火の前兆であることが科学的に実証されていませんし、この噴火からは破局的噴火へ至る時間スケールが、十分な地質学的証拠によって検証されているわけではありません。したがって、事業者が導いた結論は科学

的に合理性があるとは認められません。

また事業者は、現在の桜島などの始良カルデラにおける火山活動は Nakagao (1988) の後カルデラ火山活動に相当するとして、破局的噴火ステージまでは十分な時間的余裕があるとしています。5.2 で述べたように、この論拠にも科学的合理性はありません。

イ 地下構造に基づく検討

地殻変動の観測データに基づいて始良カルデラの中央部直下 12 km に変動を引き起こす圧力源があるとする井口ほか (2011) の推定を論拠に用いていますが、最新の研究 (Ilickey et al., 2016) によると、圧力源の中心は 9.9 ~ 15 km、厚さは 4 ~ 5 km とされています。また 5.3 で述べたように密度中立点で形成される珪長質の巨大マグマ溜まりの深さは 10 km より深い可能性もあることを考慮すると、圧力源となっているマグマ溜まりが珪長質でないと結論することは科学的には不合理です。

ウ まとめ

以上 (1) ~ (3) で述べたことから、噴火履歴と地下構造に基づいて出された事業者の結論は不合理なものであります。他の火山に対する評価にも言えることですが、この程度の論拠に基づいて得られる唯一の結論は、運用期間中に破局的噴火が発生する可能性を否定することはできない、というものでしょう。

また事業者は、現在の始良カルデラが破局噴火直前の状態ではなく、後カルデラ火山噴火ステージにあると判断し、運用期間中の最大規模の噴火として桜島薩摩噴火を考慮するとしています。もちろんこれまでに述べてきたように前提となる 2 つの検討結果 (噴火履歴、地下構造) に合理性はありません。さらに言えば、この事業者の結論は、新火山ガイドによる「過去に巨大噴火が発生した火山については、当該火山の最後の巨大噴火以降の最大の噴火規模とする」という指針に沿って出されたものですが、この指針に科学的

な根拠を見つけることはできません。火山噴火や地震のように、地質学的には短時間にエネルギーを放出する現象では、エネルギー量（噴火規模や地震マグニチュード）はその発生頻度との間には負の相関があることがよく知られています。このことは日本列島の火山活動においても確認されています（Tatsumi and Suzuki, 2014）。つまり、「巨大噴火以降の最大規模の噴火」を検討対象とする科学的根拠は全くありません。巨大噴火より規模が小さい噴火の中で起きる可能性のある最大規模の噴火は、巨大噴火の定義以下の最大規模の噴火であるべきです。

(3) 加久藤・小林カルデラ

ア 噴火履歴に基づく検討

事業者の1番目の結論、鹿児島地溝では破局的噴火が起きる可能性は十分低いというものは、すでに指摘したように科学的に誤りです。

当該カルデラ火山に対して、過去に2度起きた破局的噴火の年代から、活動間隔を20万年としています。これを周期と認定することはとてもできません。もちろん、これまでも述べたように、単一の火山で周期的に破局的噴火が発生したことが確認された例はありません。したがって、直近の破局的噴火から33万年経過していることに対して、論理的な解釈を与えることはできません。

3番目の結論（Nagaoka, 1988の噴火ステージ）については、既に指摘した通り、この手法で評価を行うことはできません。

イ 地下構造に基づく検討

この検討に関してまず指摘すべき点は、比抵抗構造のみに基づいて、マグマ溜まりが存在するか否かについて確定的な結論を出すことはできません。巨大マグマ溜まり（固化が進んだ状態も含む）の存在を否定することは現時点では科学的に不可能です。可能性が高くないことを示すためには、人工震源を用いた大規模稠密探査などと併せた検討が必要不可欠です。

なお、まだ論文は発表されていないようですが、長岡ほか(2018：学会発表)は、地震波干渉法を用いて、霧島連山の地下数キロから十数キロにかけて幅15キロ程度の大きさを持つマグマ溜まりの存在を示唆する研究成果を発表しています。

ウ まとめ

以上述べたことから、噴火履歴と地下構造に基づいて出された事業者の結論は不合理なものであります。また、始良カルデラに関して指摘したように、これまでの霧島火山の噴火を超える規模の噴火が将来起きないとする結論に至った論拠が示されていませんし、論理的にこの結論を導くことはできません。

(4) 阿多カルデラ

ア 噴火履歴に基づく検討

事業者の1番目の結論、鹿児島地溝では破局的噴火が起きる可能性は十分低いというものは、すでに指摘したように科学的に誤りです。

当該カルデラ火山に対して、過去に2度起きた破局的噴火の年代から、活動間隔を14万年としています。これを周期と認定することはとてもできません。もちろん、これまでも述べたように、単一の火山で周期的に破局的噴火が発生したことが確認された例はありません。したがって、直近の破局的噴火から11万年しか経過していないことは、運用期間中に破局的噴火が起きる可能性が十分に低いことを担保しません。

3番目の結論(Nagaoka, 1988の噴火ステージ)については、既に指摘した通り、この手法で評価を行うことはできません。

イ 阿多カルデラの地下構造に基づく検討

西ほか(2001)では5kmの深さに低速度異常が認められることを事業者は引用しています。それにもかかわらず、大規模なマグマ溜まりはないと結論する論理が理解できません。

ウ まとめ

噴火履歴と地下構造のいずれに関しても、運用期間中の破局的噴火の発生を否定するものではありません。

また、想定する噴火規模に関しても、他の火山と同様に科学的に不合理な想定となっています。

(5) 鬼界カルデラ

ア 最新の研究成果

日本列島では最も直近に破局的噴火を起こした鬼界海底カルデラについては、神戸大学を中心とした海域陸域統合探査によって、新しい知見が蓄積されつつあります。ここでは、鬼界カルデラにおける今後の破局的噴火を評価する上で重要な点を、すでに国際誌（Nature Scientific Reports）に公表され（Tatsumi et al., 2018）、カルデラ火山の活動様式に関して

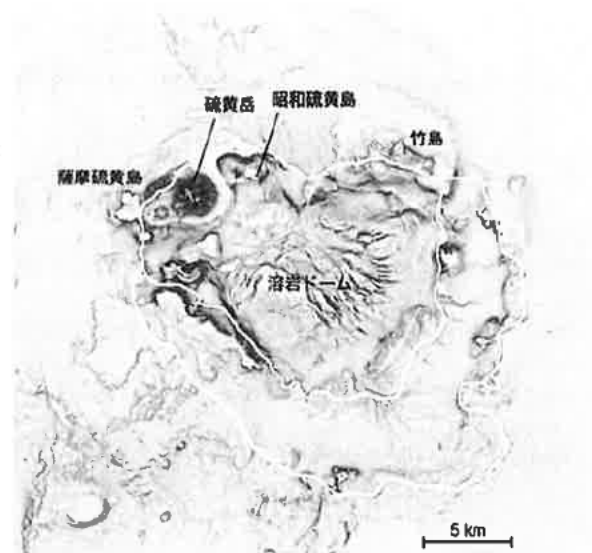


図6 鬼界海底カルデラの立体地形図。白線は地形と反射法構造探査で明らかになったカルデラ縁。カルデラ内の隆起域は、地下構造探査および最終した資料から、7300年前の破局的噴火とカルデラ形成以降に形成された溶岩ドーム。

大きな注目を集めた(全分野の論文でアクセス数がトップ10)論文に基づいて紹介します。

第一に、7300年前の破局的噴火（鬼界アカホヤ噴火）とカルデラの形成以降に、カルデラ内に少なくとも40km³のマグマが海底に噴出して溶岩ドームを形成したことです（図6）。現時点ではこの噴火に伴う火砕物（火山灰や軽石）は認識できていませんので、VEIに基づいて規模を表現することはできませんが、噴火マグニチュード7を超える破局的噴火であることは確

かです。また、活動時期については現時点では特定することができませんので、7300年前以降としか言えません。しかしながら、鬼界カルデラ火山においては、過去3度の破局的噴火に加えて、7300年前以降に破局的噴火が起きたことは、過去の噴火履歴としては極めて重要な点です。

次に重要な点は、この溶岩ドームを形成したマグマは珪長質であり、また鬼界アカホヤ噴火を起こしたマグマとは化学的特性が異なることです(図7)。このことは巨大溶岩ドームを形成したマグマは、鬼界アカホヤ破局的噴火を起こしたマグマの残存マグマではなく、7300年前以降に新たに供給されたことを意味します。したがって、この桁外れに高い供給率を示すマグマ供給系が、現在も鬼界カルデラの地下に維持されている可能性があります(図8)。改めて指摘する必要はないかもしれませんが、カルデラ形成以降の「後カルデラ期」が火山活動の静穏な時期であり、破局的噴火は起こらないというような安直な考え方は成り立ちません。

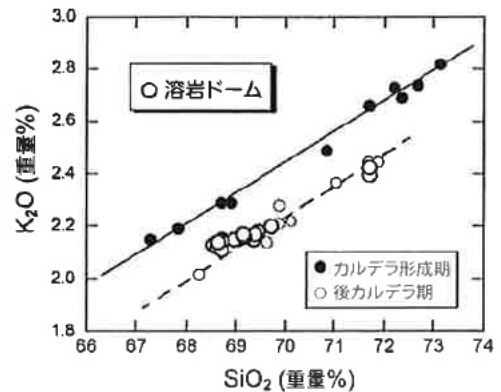


図7 溶岩ドームと鬼界アカホヤ噴火(カルデラ形成期)及び後カルデラ期(硫黄岳、昭和硫黄島など)の岩石の化学的特徴。

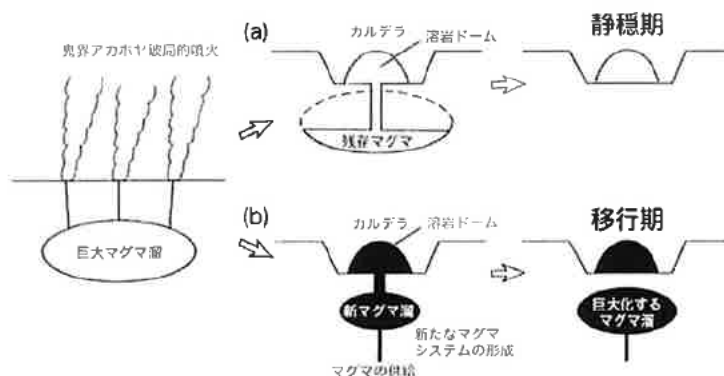


図8 破局的噴火に続いて巨大な溶岩ドームを形成する2つのシナリオ。(a)では破局的噴火を起こした残存マグマがドームを形成する。この場合はカルデラ形成後マグマ活動は「静穏期」にある可能性がある。一方(b)では、新たなマグマシステムが造られ、マグマの供給によって新たなマグマ溜が成長する過程で溶岩ドームが形成される。この場合は、高いマグマ供給率が現在も継続し、次の破局的噴火への「移行期」である可能性がある。

それではこれらの新しい知見も踏まえて、事業者の評価を検証することになります。

イ 噴火履歴に基づく検討

これまで何度も指摘したように、そもそも破局的噴火の活動間隔という概念は誤りであり、また噴火ステージに基づく評価は科学的に意味があるとは言えません。さらに、上述の最新の知見に基づけば、事業者の3つの検討結果は不合理で、次のように記述すべきです：

- 破局的噴火の最短の活動間隔 (< 7300年) は、最新の破局的噴火からの経過時間 (< 7300年) と同程度以下である可能性があり、破局的噴火の発生が切迫している可能性がある。
- 鬼界におけるカルデラ形成以降の活動では、カルデラ形成時 (7300年前) と異なるマグマが高い供給率を示しており、巨大マグマ溜まりが形成されている可能性がある。
- 鬼界アカホヤ噴火時に蓄積されていたマグマは出尽くした可能性が高く、現在の活動は供給率の高い新たなマグマ供給系によって引き起こされている。したがって、現在次の破局的噴火への移行期にあり巨大マグマ溜まりが形成されている可能性がある。

ウ 噴火履歴に基づく検討

事業者は、顕著な地殻変動が認められないという観測に基づいて最近数年は地下深部からのマグマの供給はないとの結論を導いています。しかし仮にそうであったとしても、この状況が今後も続くことを示すことはできません。

さらにはこの事実に基づいて、カルデラ形成以降に大規模なマグマ供給がなかったとする評価は、溶岩ドームを形成する破局的噴火が起きたことと矛盾しているので誤りです。

また、現在存在しているマグマ溜まりは玄武岩質であり破局的噴火を起こさないとする評価も、現実に珪長質マグマによる破局的噴火が7300年前

以降に起きた事実と矛盾するので、明らかに不合理です。

エ まとめ

以上述べたように、最新の知見も考え合わせると、事業者による評価のまとめは全て不合理であり、鬼界カルデラでは7300年前の破局的噴火とカルデラの形成以降にも破局的噴火を起こした活発なマグマ供給系が存在する可能性が高く、運用期間中にもアカホヤ噴火に相当する規模の噴火を考慮する必要がある、とすべきでしょう。

(6) 阿蘇カルデラ

ア 噴火履歴に基づく検討

これまでも指摘したように、破局的噴火の活動間隔、噴火活動ステージに基づく評価には科学的意味はありません。また事業者が論拠としてあげている三好ほか(2005)では、ほぼ固化した、しかし高温マグマの注入によって直ちに破局噴火を引き起こす状況へと変化するマグマ溜まりの存在は否定できません。すなわち、事業者による、破局的噴火の可能性は十分に低いとする評価は合理的ではありません。

イ 地下構造に基づく検討

事業者が根拠として示している地震波トモグラフィーによる結果「地下6 kmに存在する小規模の低速度領域」について、図3の(b)(c)のような状態ではないことを示さない限り、破局的噴火に繋がる巨大マグマ溜まりの存在を否定することはできません。現時点ではこのような目的での探査は実施されていません。また比抵抗構造を用いた探査結果については、著者自身がマグマ溜まりが存在する可能性が高いにもかかわらず観測でそれが確認できなかったと述べて、さらなる検討が必要と結論しています。それにもかかわらず事業者が、マグマ溜まりはないと結論しているのは誤りです。

6 事業者によるモニタリングについて

事業者は、火山におけるマグマ活動が破局的噴火へ進展するか否かを判断するため、すなわち前兆現象をとらえるためにモニタリングを実施するとしています。この際に前提としているのが、一般的な（破局的噴火に比べるとはるかに小規模で観測の経験がある）噴火で認められる現象、例えば地下深部からマグマが供給されることによりマグマ溜まりが膨張して起きる地盤の隆起・伸張などが破局的噴火においてもその前兆として発生することです。

しかしこの前提は科学的に受け入れることはできません。その理由は以下の2点です：

- 破局的噴火についての観測が皆無であり、したがって噴火の前兆となるいかなる現象も確認されていない。
- 破局的噴火を引き起こす巨大マグマ溜まりの場合は、深部からのマグマの供給によって膨張するかどうかは全くわからない。これまで地殻変動などの噴火に先立つ現象が観測された火山活動では、地球物理学的観測によって可視化された例はないものの、そのマグマ溜まりは地下数 km 以浅に存在することが予想されています。このような最上部地殻ではマグマ溜まりの圧力が増加することで周囲の地殻物質が弾性的に変形する、すなわちマグマ溜まりが膨張する場合もあると考えられます。しかしながら、具体的な数値は分からないものの、小規模噴火に比べると深い場所に形成される大規模なマグマ溜まりの場合、周囲の地殻はそもそも最上部地殻より高温である上に大規模マグマ溜まりによって加熱されるために、流動的な変形を行うことが十分に考えられます。この場合、地表において地殻変動は観測されない可能性が高くなります。

すなわち現状では、モニタリングによって破局的噴火の前兆をとらえることが可能かどうかすらわかりません。したがって、事業者が示したモニタリング計画自体が無意味であると言わざるを得ません。

このような状況では、事業者が示す「5.2 モニタリングの方針と体制」は全く評価に値するものでないことは明白ですし、ましてや「5.3 監視体制の意向判断基準（始良カルデラの例）」では、他の火山で推定され、モデルに依存するために一般的に適用できることが保証の限りでない「マグマ供給率」を判断基準の拠り所にしてはいますが、このことは不合理です。

引用文献

Bachmann, O. and G. Bergantz (2008) The magma reservoirs that feed supereruptions, *Elements*, 4, 17-21.

Hickey, J., J. Gottsmann, H. Nakamichi and M. Iguchi (2016) Thermomechanical controls on magma supply and volcanic deformation: application to Aira caldera, Japan, *Scientific Reports*, 6, 32691 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep32691>.

井口正人・高山鐵朗・山崎友也・多田光宏 鈴木敦生・植木貞人・太田雄策・中尾 茂 (2008) GPS 観測から明らかになった桜島のマグマ活動, 京都大学防災研究所年報, 51, 241-246.

三好雅也・長谷中利昭・佐野 貴司 (2005) 阿蘇カルデラ形成後に活動した多様なマグマとそれらの成因関係について, *火山*, 50, 269-283.

Nagaoka, S. (1988) The late quaternary tephra layers from the caldera volcanoes in and around Kagoshima bay, southern Kyushu, Japan, *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 23, 49-122.

巽好幸 (2019) 火山大国日本 この国は生き残れるか, さくら舎, 229pp.

巽好幸・鈴木桂子(2014) 焦眉の急, 巨大カルデラ噴火 ―そのメカニズムとリスク,

岩波科学, 84, 1208-1216.

Tatsumi, Y., N. Suenaga, S. Yoshioka, K. Kaneko and T. Matsumoto (2021) Contrasting volcano spacing along SW Japan arc caused by difference in age of subducting lithosphere, *Scientific Reports*, 10, 15005 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72173-6>.

Tatsumi, Y., K. Suzuki-Kamata, T. Matsuno, H. Ichihara, N. Seama, K. Kiyosugi, R. Nakaoka, K. Nakahigashi, H. Takizawa, K. Hayashi, T. Chiba, S. Shimizu, M. Sano, H. Iwamaru, H. Morozumi, H. Sugioka and Y. Yamamoto (2018) Giant rhyolite lava dome formation after 7.3 ka supereruption at Kikai caldera, SW Japan, *Scientific Reports*, 8, 2753 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21066-w>.

Tatsumi Y., T. Suzuki, H. Kawabata, K. Sato, T. Miyazaki, Q. Chang, T. Takahashi, K. Tani, T. Shibata and M. Yoshikawa (2006) The Petrology and Geochemistry of Oto-Zan Composite Lava Flow on Shodo-Shima Island, SW Japan: Remelting of a Solidified High-Mg Andesite Magma. *Journal of Petrology*, 47: 595-629.

Tatsumi, Y. and K. Suzuki-Kamata (2014) Cause and risk of catastrophic eruptions in the Japanese Archipelago, *Proceedings of the Japan Academy, Ser. B*, 90, 347-352.

以上