

令和5年（ウ）第1号 島根原発2号機運転差止仮処分申立事件

債権者 外3名

債務者 中国電力株式会社

準備書面（9）

－広島地裁及び松山地裁における証人尋問の内容と現在の火山学の知見－

2023（令和5）年11月6日

広島高等裁判所 松江支部 御中

債権者ら代理人弁護士 妻 波 俊 一 郎

同 河 合 弘 之

同 中 野 宏 典

同 水 野 彰 子

ほか

目 次

第 1	はじめに.....	4
第 2	火山噴火のメカニズムと活動可能性評価.....	5
1	火山噴火のメカニズム.....	5
(1)	沈み込み帯におけるマグマの生成.....	5
(2)	マントル・ダイアピルの形成と上昇.....	6
(3)	地殻の融解とマグマ溜まりの形成.....	7
(4)	鉱物の種類とマグマの特徴.....	10
(5)	親マグマ溜まりからのマグマの注入と発泡.....	11
2	巨大マグマ溜まりの状態と大規模噴火.....	12
(1)	マグマ溜まりのマグマの状態.....	12
(2)	再活性化とそのタイムスケール.....	13
(3)	マグマ溜まりの検知は困難であること.....	14
3	現在の火山学の水準で、活動可能性（とりわけ噴火規模）を精度良く評価することは困難であること（火山ガイドの不合理性）.....	15
(1)	火山ガイドの定め.....	15
(2)	とりわけ噴火規模の予測（推定）は困難であること.....	16
(3)	小括.....	18
第 3	テフラ（火山碎屑物）の広がりと降灰シミュレーション.....	19
1	噴出量の推定方法とその不確実性.....	19
(1)	噴出量の推定手法 - Legros 法.....	19
(2)	圧密、風化・浸食.....	20
(3)	噴火規模はオーダー（桁）で把握されるべきものであること.....	21
(4)	実際に、噴火規模の上方修正はしばしば行われていること.....	21
2	大規模噴火におけるテフラの広がり（傘型噴煙の形成）.....	22
3	降灰シミュレーション（Tephra2）の不確実性.....	24

(1) Tephra2 について	24
(2) Tephra2 の適用限界① - マニュアルの記載	25
(3) Tephra2 の適用限界② - 萬年氏の記載.....	26
(4) Tephra2 の適用限界③ - 浜田信生氏による学会ポスター掲示	27
(5) 本件と Tephra2 の関係	30
第 4 社会通念について	30
1 町田教授の証言	31
2 巽教授の証言	32
3 まとめ	34

第1 はじめに

2023（令和5）年6月20日、松山地方裁判所において、第四紀学の権威である町田洋・東京都立大学名誉教授（甲169）の証人尋問が実施された（以下「町田尋問」という。）。

また、同年7月5日、広島地方裁判所において、日本地質学会賞や日本火山学会賞の受賞経験もあるマグマ学の権威である巽好幸・神戸大学名誉教授（甲170）の証人尋問が実施され（以下「巽広島尋問」という）、同年10月10日には、松山地方裁判所において、別途巽好幸氏の証人尋問が実施された（以下「巽松山尋問」という。）。

これらの証人尋問は、四国電力・伊方原発の運転差止訴訟におけるものであり、本件と直接の関係はないものの、火山学の現在の水準に基づいて、噴火の基礎やメカニズム、テフラ（火砕流や火山灰などの火山砕屑物）の到達、噴火規模の推定に含まれる不確実性、シミュレーションソフト Tephra2 の不確実性などについて分かりやすく説明し、現在の火山ガイドの不合理性についても述べられており、本件においても極めて重要な意味を持つ。

そこで、本書面では、これらの尋問に関する資料である以下の資料をもとに、火山学に関する現在の水準を踏まえて、噴火のメカニズムと活動可能性の困難性（火山ガイドにおける活動可能性評価の不合理性）、テフラの広がりや降灰シミュレーションの不合理性（火山ガイドにおける降下火砕物影響評価の不合理性）について述べ（以上、第2及び第3）、最後に社会通念についても触れることとする（第4）。

なお、巽松山尋問については、調書作成未了のため、証拠提出は追って行うが、本書面では同尋問の内容も含む。

- ① 2016（平成28）年7月31日・町田洋陳述書（甲171）
- ② 2017（平成29）年2月13日・町田洋陳述書（甲172）
- ③ 広島地裁における仮処分事件の際に提出された2016（平成28）年

8月2日・町田洋作成資料（甲173）

- ④ 2023（令和5）年5月15日意見書（甲174）
- ⑤ 同年6月20日・町田洋証人尋問調書（松山地裁）（甲175）
- ⑥ 同日・町田洋証人尋問の際に示された書証綴り（甲176）
- ⑦ 2021（令和3）年9月19日・巽好幸意見書（甲177）
- ⑧ 2023（令和5）年4月21日・巽好幸意見書（甲178）
- ⑨ 同年7月5日・巽好幸証人尋問調書（広島地裁）（甲179）
- ⑩ 同日・巽好幸証人尋問の際に示された書証綴り（甲180）

第2 火山噴火のメカニズムと活動可能性評価

1 火山噴火のメカニズム

本項では、主として巽教授の意見書及び証言を踏まえ、マグマが地下でどのように生成し、それがどのように地表付近に上がってきて、噴火に至るのかというメカニズムについて述べる。

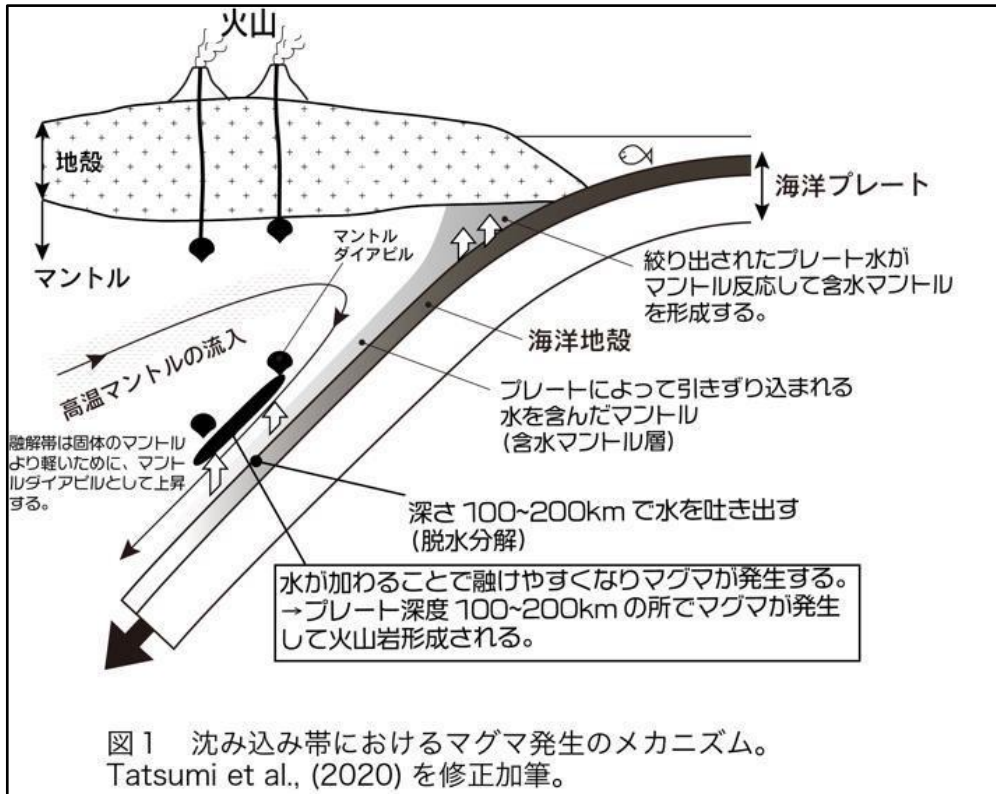
(1) 沈み込み帯におけるマグマの生成

日本列島は、海洋プレートが陸側のプレートの下に沈み込む沈み込み帯に位置している。このような沈み込み帯におけるマグマ生成のプロセスは、概ね次のようなものと考えられている（甲179・7～15頁）。

まず、海洋プレートには多量の水が含まれている。これが沈み込む過程で、圧力等によって絞り出され、周囲のマントルと反応して、「含水マントル」を形成する。

マントルは、岩石の一種ではあるが、高温になっているために流動する。水を含んだマントルはさらに流動しやすくなり、プレート運動によって地下に引きずり込まれる。そして、深さ100～200km付近になると、海洋プレートに含まれていた水分はほぼ絞り出され（脱水分解）、水を含んだことに

よって融点が下がったマントルは、高圧・高温下で融解してマグマが発生する（以上、図表1）。



図表1 沈み込み帯におけるマグマ発生メカニズム（甲177・3頁）

(2) マントル・ダイアピルの形成と上昇

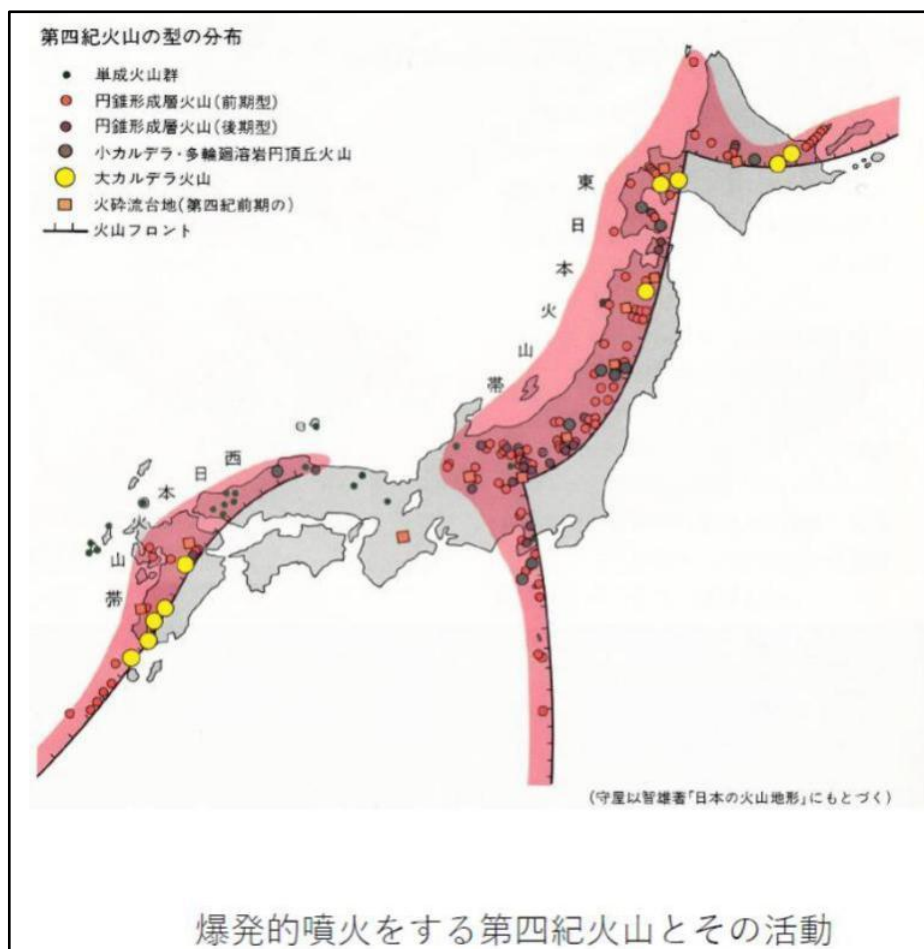
地下深くで生成された液体・高温のマグマは、周辺の個体マントルよりも軽いため、エネルギー的に不安定さを解消しようと、マントル・ダイアピルとして、周辺のマントル物質を溶かしながら上昇する。マントル・ダイアピル内のマグマは超苦鉄質～苦鉄質が中心で、温度は、1300℃程度の高温である。

これは、卑近な例でいえば、モーショントランプの原理と同じであり、ランプの中の球体が、マントル・ダイアピルであるイメージすればよい（図表2）。



図表2 モーショントランプのイメージ

マントル・ダイアピルは、地殻とマントルの境界面である「モホ面」まで上昇することもあるが、そこまで上昇しない場合もある。日本列島において、火山フロント¹（火山前線）と呼ばれる火山活動の盛んな地域（図表3）では、マントル・ダイアピルがモホ面まで上昇していると考えられている。

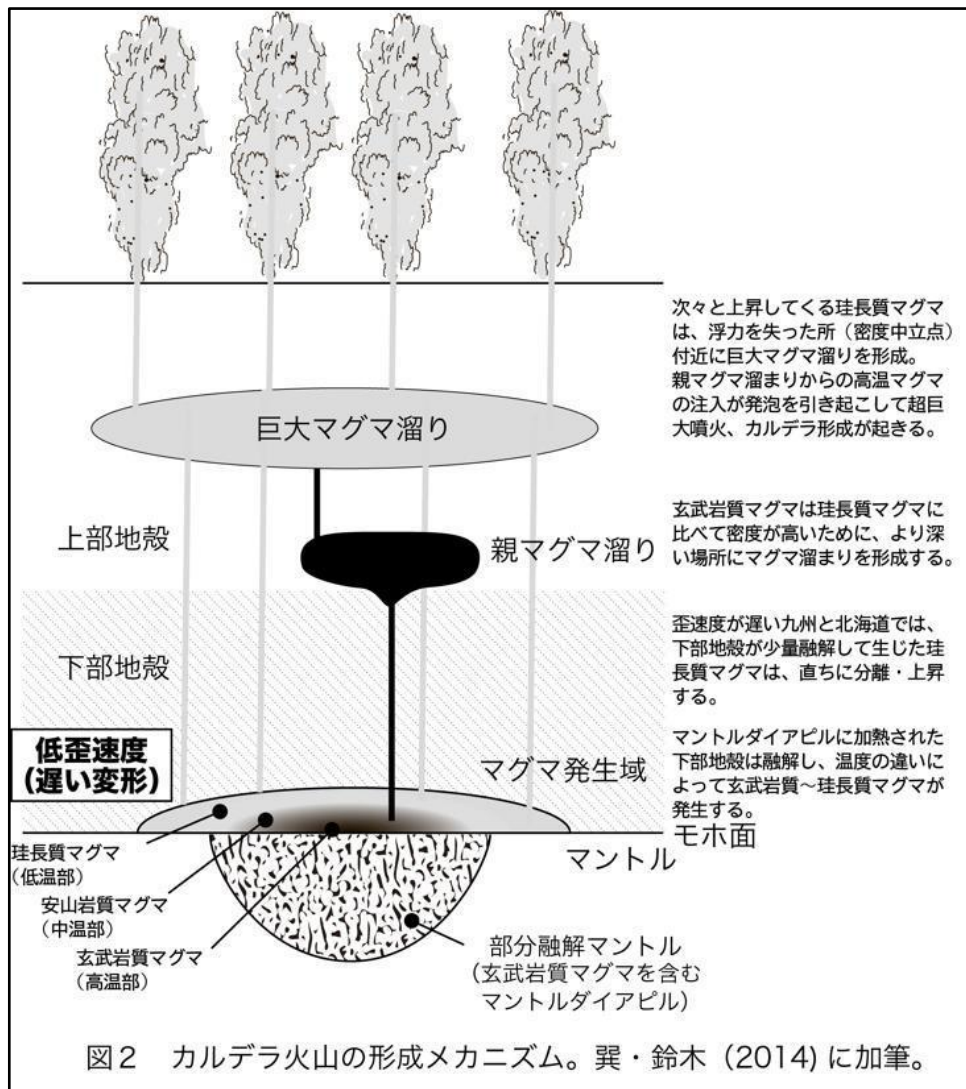


図表3 火山フロント（火山前線）と火山（甲176・9頁）

(3) 地殻の融解とマグマ溜まりの形成

モホ面まで上昇したマントル・ダイアピルは、地殻の下部を熱して地殻を融解する（図表4）。

¹ 正確には、火山フロントは、それよりも海側では火山活動がみられなくなる境界であり、火山フロントよりも陸側（日本でいえば概ね西側）で活発な火山活動がみられる。



図表4 巨大噴火の形成メカニズム (甲177・4頁)

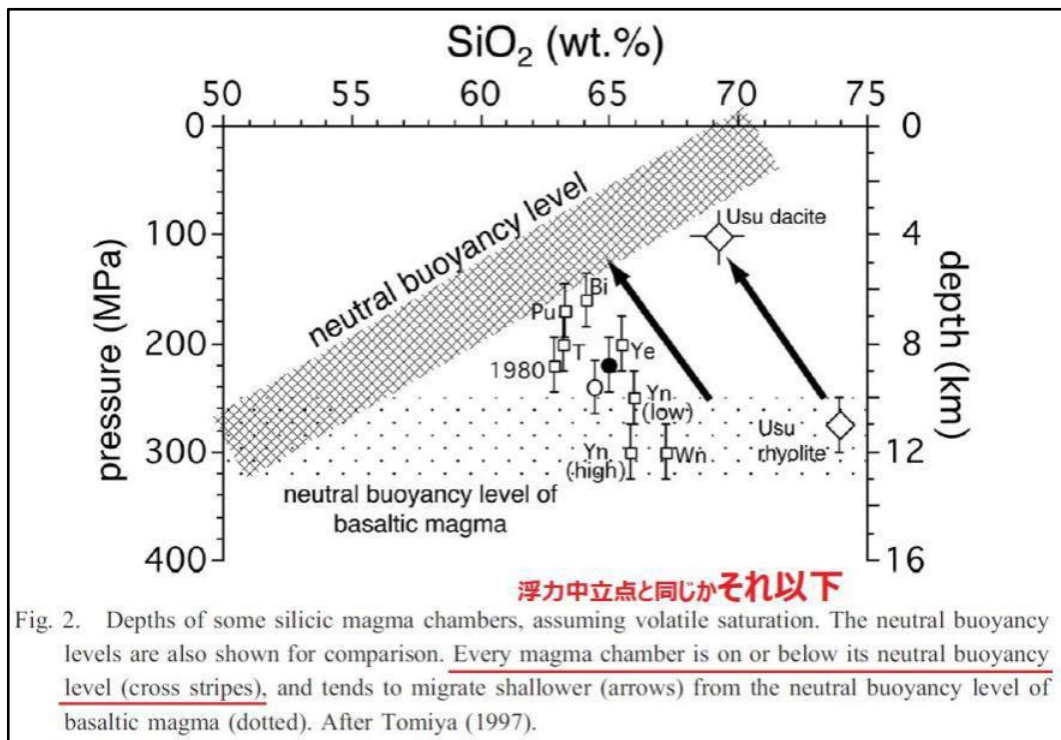
マントル・ダイアピルに近い部分は高温になり玄武岩質マグマ（苦鉄質マグマ）となり、マントル・ダイアピルから遠い部分は低温の流紋岩質マグマ（珪長質マグマ）になるなど、多様な組成のマグマが形成される。

このようなマグマのうち、玄武岩質マグマは、粘り気が少なく、マグマ発生領域から容易に上昇して、周囲の地殻物質との密度が中立になる付近（ないしそれより深い位置）で親マグマ溜りを形成する。

他方、珪長質マグマは、粘り気が強く、玄武岩質マグマと比較すると上昇しにくいものの、玄武岩質マグマよりも密度が小さいため、条件によってよ

り浅い位置まで上昇し、周囲の地殻物質との密度が中立になる付近（ないしそれより深い位置）で巨大なマグマ溜まり（子マグマ溜まり）を形成する。図表 4 は破局的噴火を念頭に置いたものであり、本件のように、これよりも一回り～二回り規模の小さい V E I 5～6 程度の噴火であれば、マグマ溜まりの大きさは当然小さくても足りる。

また、マグマは、自身の密度よりも周辺の密度が小さい浅さまで上昇することはできないが、逆に、周辺の密度が大きい位置で定置することはあり得る（図表 5）。



図表 5 浮力中立点とマグマ溜まりの定置²（甲 1 8 0 ・ 1 0 頁）

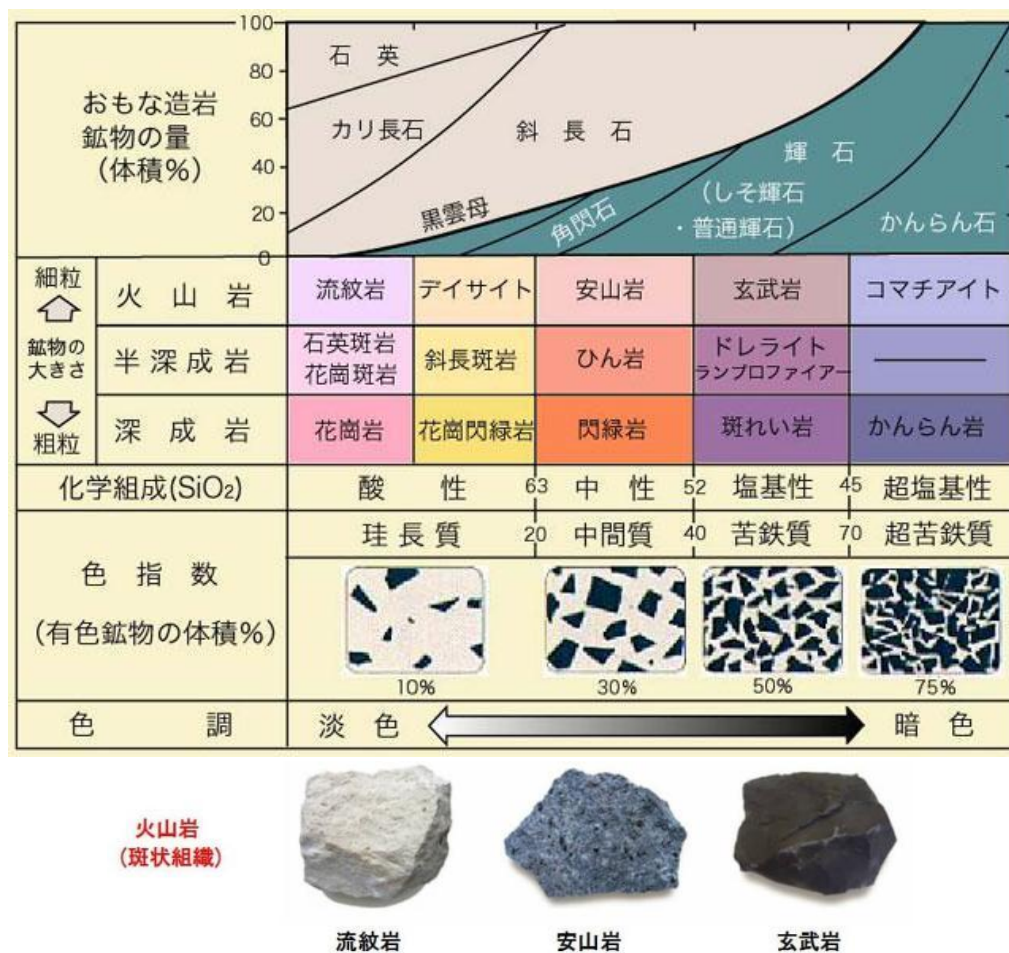
例えば、地殻内に硬い岩盤など上昇を妨げる環境があれば、それ以上上昇することができなくなることもある。その意味で、マグマ溜まりの位置は、「浮力中立点と同じか、それ以下」とされるのである。

² 東宮昭彦 2016 『マグマ溜まり：噴火準備過程と噴火開始条件』（甲 1 8 1）・284 頁の図 2 を基に作成。

したがって、浮力中立点の深さだけを調査しても、必ずしも、噴火につながるマグマ溜まりがないことにはならない。

(4) 鉱物の種類とマグマの特徴

ここで、鉱物（とりわけ火山岩）の種類についても説明しておく（甲179・5～7頁）。火山岩は、主に二酸化ケイ素（ SiO_2 ）がどの程度含まれるかによって、流紋岩～デイサイト～安山岩～玄武岩と分類される（流紋岩の方が二酸化ケイ素の含有割合が多い。図表6）。



図表6 鉱物の種類と火山岩

流紋岩質（珩酸や長石に富むことから「珩長質」とも呼ばれる）のマグマは二酸化ケイ素に富み、色は白っぽく、粘性が大きい。

他方、玄武岩質（苦土（マグネシウム）や鉄に富むことから「苦鉄質」とも呼ばれる）のマグマは二酸化ケイ素が少なく、色は黒っぽく、粘性が小さい。鉄が含まれているため、比重は重くなる。一般に、玄武岩質マグマの方が、珪長質マグマよりも温度が高い。

流紋岩質マグマの方が粘性が大きいため、爆発的な噴火を起こしやすいが、流紋岩質マグマでなければ起こさないわけではなく、中間的なマグマ（安山岩質マグマ）で破局的噴火を発生させた例もある（阿蘇2や阿蘇3など）。

(5) 親マグマ溜まりからのマグマの注入と発泡

現在、多くの火山学者が噴火の引き金になると考えているのは、深部にある親マグマ溜まりから浅部（といっても地下5000～1万m程度のこともある）にある子マグマ溜まりへ高温の玄武岩質マグマが注入されるというメカニズムである。

高温の玄武岩質マグマの注入によってマグマ溜まり全体の温度が上がると、液状マグマに溶けることのできる気体（水蒸気）の量が減り、過剰な圧力がかかる³（あたかも蓋をした炭酸飲料を温めることにより、過剰圧が発生するのに似ている）。

この過剰圧に周囲の岩盤が耐え切れなくなると、亀裂が走り、そのスペースの分だけ圧力が下がり、水蒸気が発生する（発泡現象）。発泡により、さらに膨張が進んで、割れ目が広がっていく。

この繰り返しによって火道（地表までのマグマの通路）が広がり、ついにマグマは地表に達して噴火へと至る。炭酸飲料の蓋を開けてスペースができると、圧力が下がって発泡し、爆発的な噴出に至ることを想起されたい。

カルデラ噴火では、この噴火過程でマグマ溜まりがほとんど空になるまで

³ 液体に溶解できる気体の体積Vは、圧力Pに比例し、温度Tに反比例する。

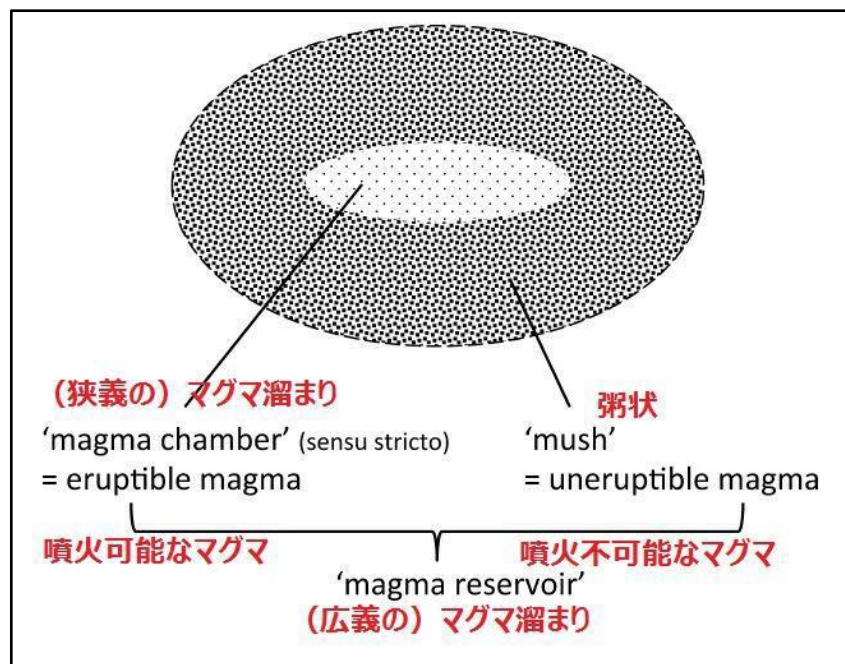
噴出し、これによって生じた空洞部分が陥没して、カルデラが形成される。
ただし、1回の噴火で、必ずマグマ溜まりが空になるとは限らない。

2 巨大マグマ溜まりの状態と大規模噴火

(1) マグマ溜まりのマグマの状態

噴火が開始するには、その規模に見合うだけのマグマ溜まりが火山の地下に形成されることが必要であるが、完全に液体の状態で充填されているとは限らない（甲179・20～25頁）。

東宮2016によれば、近年、マグマ溜まりの大部分はマッシュ状（粥状）と考えられるようになったという（図表7）。

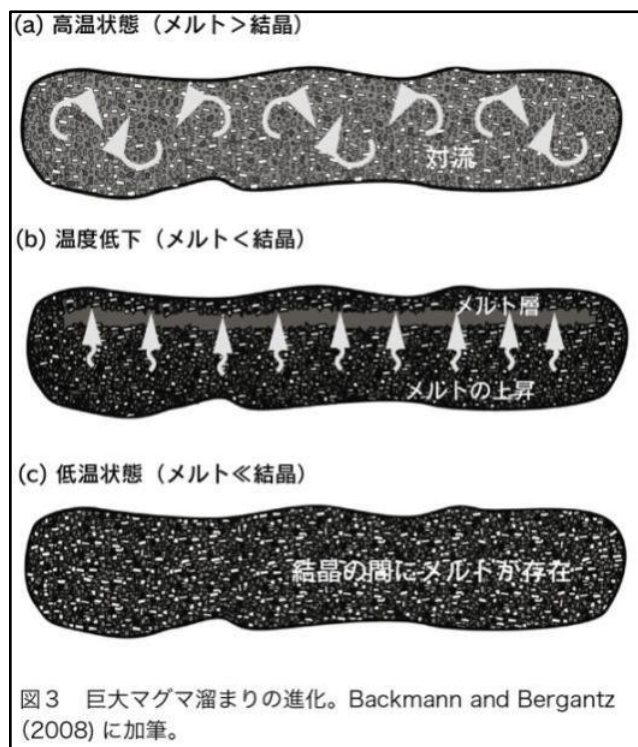


図表7 マグマ溜まりの模式図（甲180・11頁左図、甲181・283頁）

（広義の）マグマ溜まりのうちで、直ちに噴火可能な（狭義の）マグマ溜まりは一部で（ないこともあり得る）、大部分（ないし全部）は直ちには噴火不可能なマッシュ状だということである。

この（狭義の）マグマ溜まりは、メルト部分が結晶よりも多く、高温状態

の(a)のようなマグマである (図表 8)。(c)は低温状態でメルトよりも結晶が多く、メルトは結晶の隙間に存在し、流動性に乏しい状態である。(b)は、その中間的な状態と考えられる。マッシュ状というのは、(b)や(c)の状態をいう。



図表 8 マグマ溜まりの進化 (甲 1 7 7・7 頁)

(a)は噴火直前か、噴火直後の状態であり、これが冷却されると結晶化が進み、(b)の状態になる。さらに温度が下がると、結晶同士が連結してメルトの移動は困難となり、(c)のように結晶と結晶の間にメルトが存在する状態になる。各種の探査は、マグマがメルトであることを前提とするものであるから、(b)や(c)の状態では、各種の探査等によってマグマ溜まりの存在を確認することは困難である。

(2) 再活性化とそのタイムスケール

(b)や(c)の状態は、東宮 2 0 1 6にあるように、直ちに噴火することは不可能なマグマであるが、だからといって噴火しないマグマではない。

(b)や(c)の状態にあるマグマ溜まりも、親マグマ溜まりから高温のマグマが供給されて、温度が上がると、(a)の状態、すなわち噴火可能な状態へと変化する。これを「再活性化」と呼ぶ。

この再活性化のタイムスケールは、供給されるマグマの温度や量、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ている。規模が大きい噴火になればなるほど、長期間のタイムスケールが必要であるが、巽教授によれば、VEI 7の破局的噴火であっても、場合によっては10年オーダーで(c)から(a)へと変化して噴火に至ることもあるという。これよりも一回り～二回り小さいVEI 5～6の噴火であれば、より短時間で噴火可能な状態に変化することも十分に起こり得る（甲179・24～27頁、甲177・7～8頁、甲178・5～6頁）。

したがって、図表8の(a)だけでなく、(b)や(c)の状態も、再活性化によって噴火するポテンシャルをもったマグマ溜まりと考える必要がある。仮に、現在の火山の状態に照らして、噴火可能なマグマ溜まりが確認できないとしても、そこにはマッシュ状の、いわば隠れマグマ溜まりが存在する可能性があり、それが原発の運用期間中に噴火可能な状態へと再活性化して噴火に至るという可能性が否定できないのである。

(3) マグマ溜まりの検知は困難であること

ア 地下のマグマ溜まりを調査して検知することは、原理的には、病院のCT検査のように、地震波などを用いて行うことが可能である。

実際、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で、自然地震を長期間観測する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知られている。

しかし、日本列島の火山では、このレベルの観測は行われていない（甲179・17～20頁、甲177・8頁）。

また、イエローストーンのように自然地震を用いた観測は、地震の数が少ないため、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、実際、正確な体積が把握できているわけではない。高精度の推定を行うためには、人工地震を用いた高密度・大規模な観測が必要だが、このような調査はまだ世界に例がない。これは、中田節也教授が、とりわけ噴火の規模について、「我々はまだできていないと考えています」と発言しているとおりであり（申立書第7章第4の4(2)、甲46・4頁）、また、巽教授が、「現時点でマグマ溜まりの位置、形、それに大きさを正確に捉えた例はない」と指摘するとおりであり（申立書第7章第5の3(2)、甲49・214頁）。

イ さらに、このような観測が実現したとしても、これによって観測が可能なのは図表8の(a)の状態にあるマグマであり、(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、現時点では分からないとされる。結晶の割合が増えた部分と、周囲の固体の地殻を識別することは相当に困難だからである。

ウ 巽教授は、上記のような理解をもとに、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せず、マグマ溜まりの存在を否定することは科学的に極めて困難だと結論付けている（甲179・25～27頁、甲177・8～9頁、甲178・4～5頁）。

3 現在の火山学の水準で、活動可能性（とりわけ噴火規模）を精度良く評価することは困難であること（火山ガイドの不合理性）

(1) 火山ガイドの定め

本件火山ガイドは、旧火山ガイドを変更し、「敷地及び敷地周辺で確認され

た降下火砕物の噴出源である火山事象が同定でき、これと同様の火山事象が原子力発電所の運用期間中に発生する可能性が十分に小さい場合」に、そのような火山事象を考慮対象から除外できることとした（本件火山ガイド5章柱書、甲43・11頁）。

これは、申立書にも記載したとおり、従来噴出源たる火山の噴火可能性に着目していた火山ガイドを改悪し、特定の規模の火山事象が原発の運用期間中に発生する可能性を問題とするものである。本件に即していえば、三瓶山という噴出源の噴火可能性ではなく、特定の火山事象たる三瓶木次テフラ(SK)と同様の火山事象が発生する可能性を検討し、それが十分に小さければ、この規模の噴火は想定しなくてよいという内容である。

なお、旧火山ガイドに規定されていた「噴出源」という語の意義について、町田教授は、「噴出源と言えば、当然爆発的な噴火がありますから、穴が、火口があるわけです。火口がでかくなるとカルデラと呼ばれますけど、それが噴出源ですよ」「(噴出源というのは、基本的には特定の場所を指す言葉という感覚か、という質問に対し)そういうことですね」と述べている（甲175・38～39頁）。このことから、火山ガイドの内容が改悪されたことがうかがえる。

(2) とりわけ噴火規模の予測（推定）は困難であること

ア しかしながら、本書面で述べたような噴火のメカニズムに照らせば、地下のどのような位置に、どのような形状、大きさのマグマ溜まりが存在するのかを正確に把握することは現在の火山学の水準に照らして困難である。

また、巽好幸教授の指摘は、基本的には破局的噴火を念頭に置いたものではあるが、これは、伊方原発における争点が破局的噴火の発生可能性だったためであり、この理は、本件のような破局的噴火には至らない規模の噴火にも妥当する。むしろ、破局的噴火については、原規委が旧火山ガイ

ド策定時に、「大規模だから何らかの兆候が見られる」と誤解していたように、短期的には何らかの前兆現象が捉えられる可能性があるが、これに至らない規模の噴火については、そのような前兆現象すら見られない可能性も否定できず（例えば、2014年の御嶽山噴火を想起されたい）、よりいっそう予測（推定）が困難といえる。

イ これらは、本件火山ガイドの定める各種の調査（解説-12.ないし-16. 甲43・10～11頁）や、債務者の主張するような各種の調査をいくら行ったところで同様であり、特定の規模の火山事象が発生しないという噴火規模の予測（推定）ができることを前提としている点で、本件火山ガイドの不合理性は明白である。

なお、本件火山ガイドには、「設計対応不可能な火山事象が発生する時期及びその規模を的確に予測できることを前提とするものではな」とされているが（解説-3. 甲43・6頁）、地震波速度構造探査等によって地下のマグマ溜まりの規模や位置を把握できることを前提としているのは明らかであり（4. 2項。甲43・10頁）、少なくとも、マッシュ状のマグマ溜まりを把握できないという知見を見落としているのは間違いない。

準備書面(8)で示した4つの基準に照らせば、①行政庁は、ガイド策定時において利用可能で、信頼されるデータ・情報を全て検討していないということに該当する。

債務者が、本件火山ガイドが合理的であるというためには、本件火山ガイドが、マッシュ状のマグマ溜まりの存在について考慮してもなお、特定の噴火規模の火山事象の発生可能性だけを否定できることを主張立証しなければならないが、本書面で述べたメカニズムを前提とする限り、そのような主張立証は不可能である。

(3) 小括

したがって、「敷地及び敷地周辺で確認された降下火砕物の噴出源である火山事象が同定でき、これと同様の火山事象が原子力発電所の運用期間中に発生する可能性が十分に小さい場合」に、そのような火山事象を考慮対象から除外できることとした本件火山ガイドの定めは、利用可能で、信頼されるデータ・情報であるマッシュ状のマグマ溜まりの存在を考慮せず、各種調査によって地下のマグマ溜まりの存在が把握できることを前提としている点で不合理であり、本件では、三瓶山における過去最大の噴火規模である三瓶木次テフラ（S K）と同規模の噴火についても考慮しなければならないことになる。

しかし、基準適合性審査においては、S Kは考慮対象から除外して審査が行われており、深層防護との関係で、「各防護レベルが独立して有効に機能する」とは評価し得ない。本件では、深層防護の徹底に不備があるというほかに、原発に内在する危険（リスク）が、許容せざるを得ないといえる程度にまで低減されていると評価できない、すなわち、安全と評価できない。

そうである以上、安全が確保されていない本件原発の稼働により、周辺住民たる債権者らの人格権侵害の具体的危険が存在するということになる。

4 できる調査やシミュレーションすら尽くされていないこと

なお、巽好幸教授は、四国電力との関係ではあるが、電力事業者はできる調査やシミュレーションすら尽くしていないと指摘する。

例えば、巽教授は、別の火山に関してではあるが、再活性化までのタイムスケールをシミュレーションしたことがあるという。このシミュレーションにおいては、もともと存在していたマッシュ状マグマ溜まりの大きさ、温度、化学組成、地下から流入する玄武岩質マグマの量、温度、化学組成等、適切なパラメータを設定することが重要となるが、これらのパラメータには、不確実性が

伴うため、保守的なパラメータが設定されるのが不可欠であるものの、このようにできる調査やシミュレーションすら電力会社は尽くしていない、というわけである（甲179・25～26頁、54～55頁）。巽教授は、今の原子力規制が、できること、すべきことをすべてしているというふうに思うかという質問に対し、「いいえ、それは思いません」と明確に回答している（甲179・45頁）。

本件火山ガイドも、このようなシミュレーションを行うことを求めておらず、現在の火山の状態だけ把握すればよいかのような定めとなっている。この点でも、火山ガイドは不合理というべきである。

第3 テフラ（火山碎屑物）の広がりと降灰シミュレーション

ここからは、想定を上回る規模の火山事象が発生した場合に、具体的に、降下火砕物（火山灰）が敷地に到達し、深刻な事態を引き起こすような影響を与えるのか、債務者が行っている評価では足りず、深刻な事態が引き起こされかねないことについて述べる。

1 噴出量の推定方法とその不確実性

(1) 噴出量の推定手法 - Legros 法

まず、大前提として理解しておく必要があるのは、火山学で扱われている噴火規模（噴出量）の推定方法と、そこには相当大きな不確実性が存在するという点である。

一般に、噴出量の推定は、現時点における等層厚線をもとに、閉じられた一本の等層厚線で囲まれた部分の面積に、層厚と係数を乗じる方法で体積を求めている（図表9・左下の図参照）。

現在一般的に用いられている手法として、Legros（2000）の方法があるが（甲182の1、2）、これは、最小体積を計算するための簡単な方法であり、

実際の噴出量は、これを上回る可能性が大きい。

噴出物の体積（≒噴火規模）を求めるLegros法は「最小体積」を計算するもの

高浜原発の例

2.4.2 降下火砕物の噴出量の算出結果について
2.3 で作成した等層厚線図を基に Legros 法と Hayakawa 法の 2 つの手法を用いて DNP の降下火砕物の噴出量を算出した。両手法とも閉じられた 1 本の等層厚線で囲まれた部分の面積に層厚と各係数を乗じて降下火砕物の全体積を算出する方法である。

第 2.4.2.1 表 Legros 法を用いた DNP の降下火砕物の噴出量算出結果

降灰層厚(cm)	25	50	100
面積(km ²)	3,589	1,646	474
噴出量(km ³)	3.4	3.1	1.8

Journal of Volcanology and Geothermal Research 96 巻 25-32 頁 2000 年 2 月

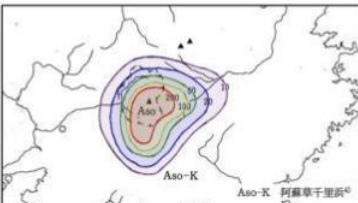
Minimum volume of a tephra fallout deposit estimated from a single isopach

Enomoto et al.

単一アイソパッチから推定される降下火砕物堆積物の最小体積
フランソワ・レグロス

Abstract
A simple method is presented to calculate the minimum volume of an exponentially-thinning fall deposit for which only one isopach is available. This method exploits the fact that the product of the area enclosed within an isopach (A) and its thickness (T) reaches a maximum value (TA)_{max} for a certain isopach. It is shown that the minimum volume is V_{min}=3.69TA, which is equal to the actual volume when TA=(TA)_{max}. Calculation of V_{min} for 327 isopachs from 74 fallout deposits shows that it is often just a bit lower than the volume calculated from all the available isopachs. It is therefore proposed that V_{min} provides a useful minimum volume estimate for fallout deposits for which only one isopach is available.

指数関数的に薄くなる降下火砕物堆積物について、1 つのアイソパッチ（等層厚線）しか入手できないものの**最小体積を計算する簡単な方法**を紹介する。等層厚線に囲まれた面積（A）と厚み（T）の積が、ある等層厚線では最大値（TA）_{max} になることを利用した方法である。TA = (TA)_{max} のとき、最小体積 V_{min} = 3.69TA となり、実際の体積と等しくなることが分かる。74 個の降下火砕物堆積物から得られた等層厚線について V_{min} を計算すると、利用可能な全ての等層厚線から計算した体積よりも少し低くなることが多いことが分かる。したがって、V_{min} は、1 つの等層厚線しか利用できない降下火砕物堆積物の最小体積の推定値として有用であることが提案される。



図表 9 噴出物の体積を求める方法と Legros（2000）の記載

(2) 圧密、風化・浸食

ア また、前述したとおり、この方法は、噴火後相当期間の経過した現在確認できている等層厚線を前提とした体積であって、堆積当時の厚さがそのまま残っているわけではないことにも注意が必要である。一般に、噴火から相当期間が経過すると、自らの重みや、その上に新たに積もった堆積物の重みによって、火山灰層が圧縮され、薄くなっていく。これは、「圧密」と呼ばれる現象で、場合によっては、堆積当時の 3 分の 2 から半分程度にもなると考えられている。町田教授は、圧密についても細かいところまでは議論できないことを証言している（甲 175・21～22 頁）。

イ このほか、降下火砕物は時間の経過とともに風化・浸食されて層厚が減少することが分かっており、この点からも、現在の層厚は、堆積当時のものよりも小さくなると考えられる（甲 175・19～21 頁）。

ウ そうすると、現在の等層厚線を前提とした体積は、堆積当時の体積に及

ばない（実際の噴出量の方が大きい）可能性が高い。

(3) 噴火規模はオーダー（桁）で把握されるべきものであること

我が国における火山砕屑物（テフラ）研究の第一人者である町田洋教授は、この噴火規模の推定方法の不確実性について、証言している。

すなわち、町田教授は、現在確認できるテフラは、堆積当時のまま残っているとは限らず、浸食や風化によって当然に減ってくる、したがって、正確な数値は出せず、オーダー（桁）の面で誤差がある、火山の専門家も、噴出量についてはオーダー（桁）で議論せざるを得ない、などと証言している（甲175・3～5頁）。

火山ガイドや電力事業者は、例えば、三瓶山の噴火規模について、三瓶浮布テフラ（S U k）の4.15 km³とし、これ以上の規模の噴火は発生しないかのような前提に立っているが、この噴出量の推定事態に非常に大きな誤差があり、少なくとも、原発の安全審査において、「これ以上の規模の噴火が発生しない」といえるような精度の高いものではない。

(4) 実際に、噴火規模の上方修正はしばしば行われていること

ア 実際、噴火規模が上方修正されることはしばしばある。

本件との関係でも、大山の生竹噴火（D N P）の噴火規模が上方修正され、従来約6 km³だった噴出量が、現在では約11 km³と、倍近くにまで増えている。

噴出量を計算する仕組みに照らしても、噴出量は、現在確認できている堆積物の等層厚線をつないで求めるため、新たに大量の降下火砕物堆積層が発見されると、噴出量が従来考えられていたよりも大きくなることはしばしばあり得るのである。

反対に、新たな発見によって、噴出量が下方修正されることは滅多にな

い。仮に、どこかの地点で、現在考えられているよりも薄い堆積層が見つかったとしても、それは風化や浸食、圧密の影響によって薄くなったと考えられるため、噴出量に影響を及ぼさないからである。

イ また、近年の研究で、阿蘇4や始良カルデラの噴出量も大幅に上方修正されている。

例えば、約3万年前の始良T_n噴火の噴出量については、従来よりも1.5倍大きい940～1040km³にも上ることが明らかになった（2023年の原子力規制委員会資料）。

また、約9万年前の阿蘇4噴火の噴出量についても、従来よりも数倍大きい840～1640km³にも上ることが明らかとなった。これら2つの噴火は、従来VEI7（噴出量100km³以上）と考えられていたが、この研究結果によれば、いずれもVEI8（噴出量1000km³以上）に達する可能性がある。

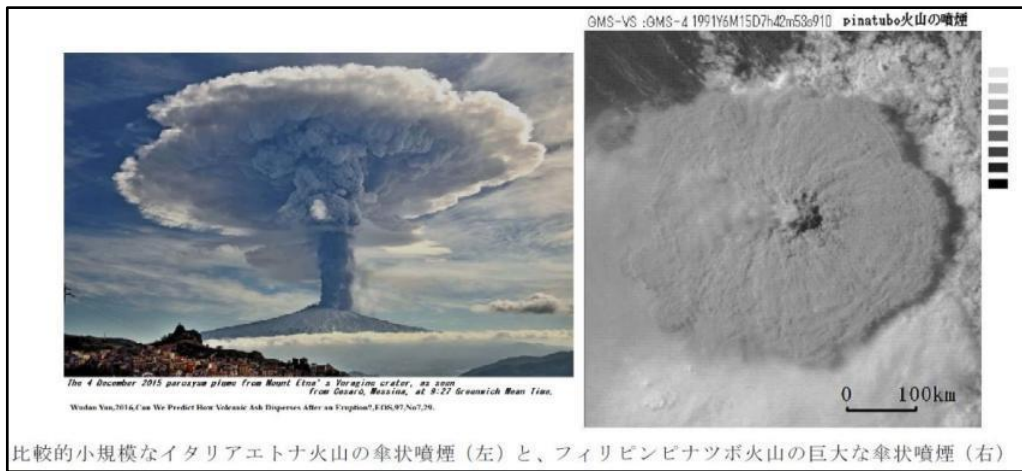
ウ このように、火山における噴出量の推定は大きな不確実性を含んでおり、今後上方修正される可能性も存在する。

本件においては、それだけで、直ちに本件火山ガイドが不合理であると主張するものではないが、噴出量の推定にこのような大きな不確実性が存在する以上、敷地に到達する降下火砕物の層厚や気中降下火砕物濃度には十分な保守性が見込まれなければならないということを肝に銘じる必要がある。

2 大規模噴火におけるテフラの広がり（傘型噴煙の形成）

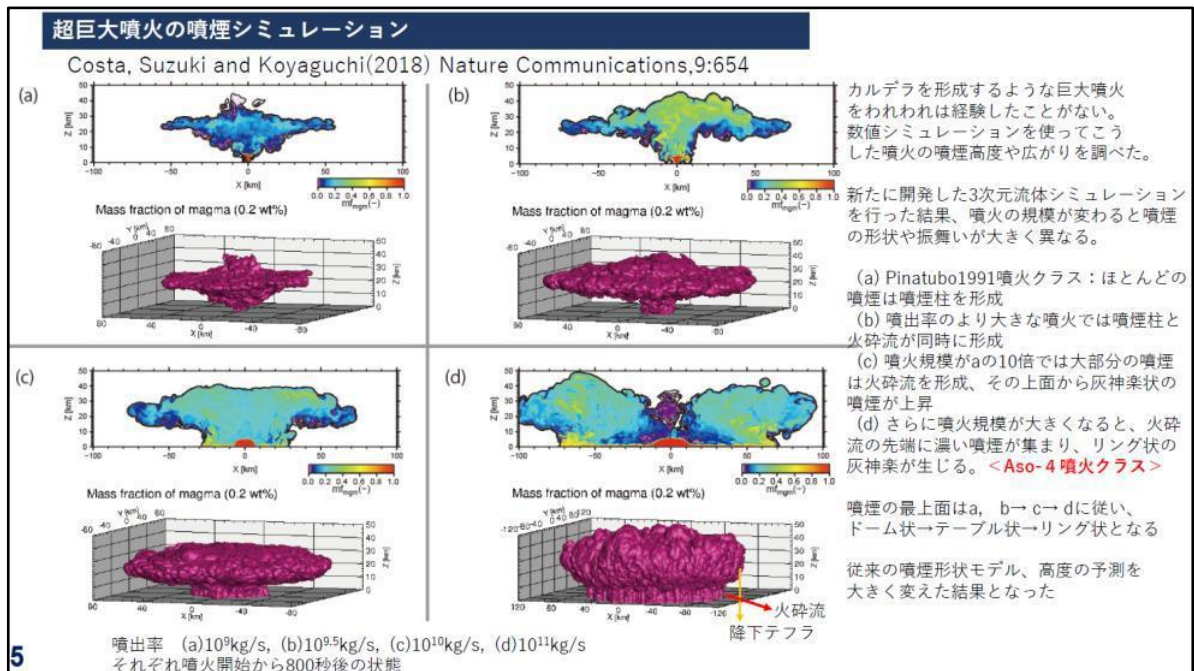
VEI5～6を超えるような大規模な噴火では、噴煙柱を形成して上昇した噴煙が一定の高度に達した後、水平方向に同心円状に広がっていく（甲176・13頁）。これを傘型噴煙などと呼ぶ。1991年のピナツポ噴火は、VEI5～6程度の噴火であるが、この噴火で直径1000kmに達するような傘型噴煙

が形成されたことはよく知られている（図表10）。



図表10 傘型噴煙（甲183・2枚目）

町田教授は、図表11の(a)が概ねVEI5に、(b)が概ねVEI6に、(c)が概ねVEI7に、(d)が概ねVEI8に相当するとしている（甲175・6～10頁）。三瓶木次テフラ（SK）はVEI6であり、概ね(b)のように傘型噴煙を形成して広がったと考えられる。



図表11 噴火規模とテフラの広がり（甲173・5頁）

噴煙の標準的なモデルは、「重力流モデル」と呼ばれる。噴煙柱は、周囲の大気を巻き込みながら上昇するが、巻き込み速度は噴煙中心部の上昇速度の0.1倍程度と高い。この高い巻き込み速度のため、粒子が噴煙柱から飛び出そうとしても巻き込もうとする風によって噴煙柱に逆戻りする（“re-entrainment”と呼ばれる。）。この効果によって、テフラ粒子は、上昇中は噴煙柱から離脱せず、粒子の離脱は主として傘型噴煙から起こると考えられている。これが重力流モデルである（甲184・184頁）。

もともと、実際には、プリニー式噴火においても火口近傍で厚い堆積が見られることから、万年氏も、何らかの理由で粒子が離脱していることは否定できない、としている（甲184・184頁）。その意味では、重力流モデルも確立した知見というほどではないが、いずれにせよ、大規模な噴火によって傘型噴煙という現象が発生することは間違いない。

3 降灰シミュレーション（Tephra2）の不確実性

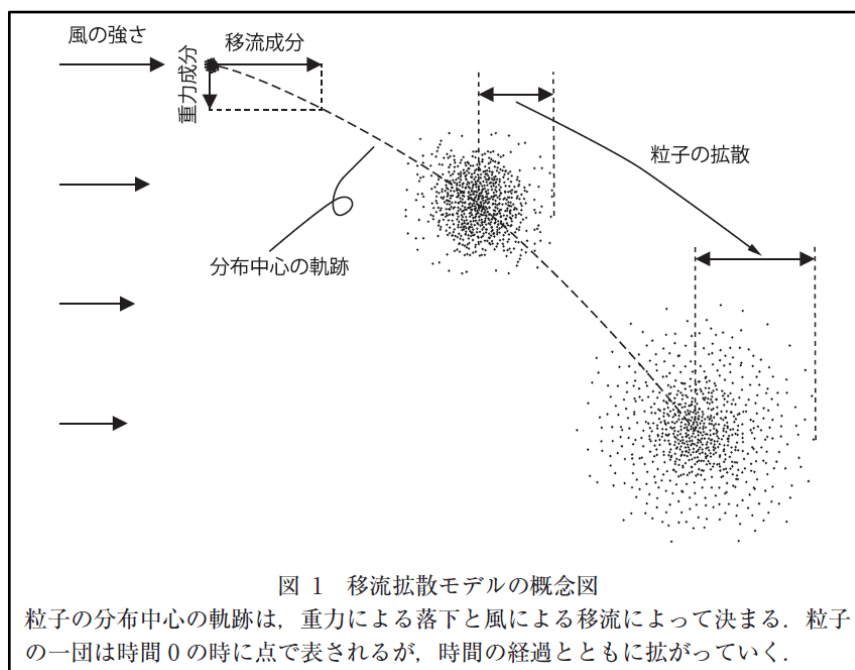
(1) Tephra2 について

多くの電力事業者は、降灰量の想定について、Tephra2 というシミュレーションコードを利用している。

Tephra2 は、火山灰の標準的な拡散モデルである重力流モデルではなく「移流拡散モデル」を基にした降灰シミュレーションコードである。移流拡散モデルとは、移流（風に乗って移動する現象）と拡散（空中で勝手に拡がる現象）を盛り込んで作られたもので、黄砂などの到達シミュレーションにも用いられる（図表12）。

万年氏も、移流拡散モデルは、実際の火山灰の動きと比べるとずいぶん単純化されたものであり、「移流」について、実際の風は渦を巻いたり蛇行したりするが、Tephra2 では各高度ごとに一定の風向・風速と仮定されるとする。また、「拡散」についても、拡散が起きるのは水平方向だけで、垂直方向の拡

散は考慮されていない（甲184・174頁）。



図表12 移流拡散モデルの概念図（甲184・174頁）

(2) Tephra2の適用限界① - マニュアルの記載

ア Tephra2の適用限界については、開発者によって作成された「Tephra2 Users Manual」というマニュアルからも推測可能であるため、これを証拠として提出する（甲185の1、2）。

これによれば、Tephra2は、現在検証中であり、このモデルを完全に検証するためには、更なる比較が必要とされている（甲185の2・4頁）。

イ また、風速と風向を一定と仮定しているところ、実際の大気は、渦巻き、上昇気流、下降気流などで構成され、時間とともに変化する。そのため、広範囲に広がったり、長時間継続したりしない小規模な噴火のシミュレーションには有効だが、より規模の大きい噴火や風の変化が激しい場合には、現実をうまく表現できない可能性が高いとされている（甲185の2・5頁）。

開発者自身も、規模の大きい噴火には不適であることを認めているので

ある。

ウ Tephra2 の適用限界としては、最大粒径が $-6\Phi (=6.4\text{mm})$ で、最小粒径が $6\Phi (\approx 15.6\mu\text{m})$ とされている。凝集や他の複雑なプロセスは、モデル化されていない（甲185の2・3頁）。

(3) Tephra2 の適用限界② - 萬年氏の記載

ア 萬年論文によれば、Tephra2 の問題点は、2次元的な移流拡散モデルを用いている点、これまでの標準的な噴煙モデルである重力流モデルの肝である傘型領域を再現できていないことなどにあるが、さらに次のように指摘している。

「Tephra2 は風について単純なモデルしか仮定できないが、それが大きな弱点といえるかというところではないだろう。なぜならば、火山周辺100kmのオーダーで風向きが大きく変わるとするのは考えにくいからである。したがって、100kmのオーダー以下で考える場合 Tephra2 は一定の実用性があると考えべきである。100km以遠にラピリサイズ⁴の粒子を飛ばすのはかなりの大噴火であるから、逆に言うと、ラピリサイズの粒子が堆積している範囲について Tephra2 を適用して作業するのはほとんど問題ないと言えるだろう。」（甲184・175頁）

この記載を裏返せば、ラピリサイズ、すなわち火山礫（粒径2～6.4mm）が堆積していない遠方や、100km以遠にまで降灰があり得る大規模噴火については、Tephra2 には実用性がないということになる。

イ また、Tephra2 が大規模噴火に適用できないということは、次のとおり、傘型領域を考慮していないということからも説明されている。

「傘型領域からの落下という重力流モデルの肝の部分は、Tephra2 には

⁴ lapilli とは「火山礫」を意味し、直径が2～6.4mmの火山碎屑物をいう。なお、6.4mm以上のものが「火山岩塊」、2mm未満のものが「火山灰」である。

盛り込まれていない。我々はこの点こそが、Tephra2の現時点での最大の問題点であるのと同時に、今後大幅な改善が期待できる点でもあると考える。先に述べた、Tephra2のインバージョンでは小さい噴火の噴出量と噴煙高度を精度よく決めることに成功したが、大きな噴火の場合は噴煙高度を決めることがほとんどできなかった。

これは、大きな噴火の場合、噴煙柱より遥かに幅が大きい傘型領域からもたらされるために、噴煙柱の高さを調節するだけでは堆積物の分布を説明できず、拡散係数を大きく動かす必要があるためである。実際、経験的な方法で36～20kmの噴煙高度があるエクアドル Pululagua 火山の2450BP⁵噴火では、インバージョンにより92,000 m²/sという異常に高い（弱い噴火では普通、数百m²/sとしたとき良好な結果を得られる）値を得ている。」（甲184・184～185頁）

ウ 要するに、大規模噴火にTephra2を適用しようとする、非現実的なパラメータが返ってくる（インバージョン的な利用のため）ということであり、再現性に乏しくなってしまうのである。Tephra2は本件のような大規模噴火については適用外である。

(4) Tephra2の適用限界③ - 浜田信生氏による学会ポスター掲示

ア 将来の大規模な噴火の降灰量予測には用いられないこと

また、この点については、元気象庁の浜田信生氏が、2017（平成29）年5月に行われた地球惑星合同学会においてポスター掲示により公表した「原発立地の安全審査に関わる火山災害シミュレーションの問題点」で詳しく指摘されている。

⁵ BPは、年代測定で年代を表す指標であり、Before Present、すなわち「現代から何年前」を表すこともあるが、¹⁴C年代では、1950年を基点としているため、「1950年から何年前」を意味することもある。

すなわち、浜田氏によれば、「Tephra2 は、噴火時の気象条件が不明な、比較的小規模な過去の噴火を解析するために、噴煙が拡散降下する過程を単純化した研究用のツールの一つであって、シミュレーションの入力パラメーターの設定は任意性が大きく、将来の大規模な噴火の降灰量を評価予測するだけの精度、信頼度はない」という（甲183・2頁）。

浜田氏は、この問題について、以下の3つの問題を挙げている。

(ア) 移流拡散モデルの適用限界

1つは、「大規模な濃度の高い噴煙に、はたして移流拡散モデルが適用可能かという問題」である。移流拡散方程式の適用対象は、例えば大気汚染物質や黄砂などに代表される大気に含まれる希釈な物質であり、大気の性質にまで影響を与えるような濃い物質ではない、という。そして、大規模な噴火によって大気中に供給される大量の火山灰、火山ガス、熱等は、大気場そのものに影響を与えるものであるところ、VEI5以上のような大規模な噴火については、その影響がほとんど解明されておらず、適用が困難だというのである。

本件で問題となるのは、VEI5どころか、VEI6にもなる巨大噴火（火山ガイド上の巨大噴火ではなく、一般的な用語としての巨大噴火）であり、明らかに移流拡散モデルの適用対象外である。

(イ) 擾乱乱流や傘型噴煙の不考慮

浜田氏が挙げる問題の2つ目は、Tephra2 が、火山灰の移流拡散について「大幅に単純化した物理過程を用いていること」である。とりわけ、現実の気象場としては、水平方向の擾乱乱流⁶や、山岳波（重力波）の影響により、上下方向の擾乱があり、これらは Tephra2 に反映されていない

⁶ 大気が乱れる現象を、気象学で「擾乱」という。「乱流」とは、水や空気などの流体が、時間的、空間的に不規則に変動する流れの運動をいう。

い。また、萬年論文でも指摘されるとおり、大規模噴火に伴う傘型噴煙が考慮されていない。

(ウ) 入力パラメータの非保守性

3つ目は、「降灰を予測する上で必要な気象条件、噴出物の量や粒度分布などの入力パラメーターの推定と設定」である。

本件もそうであるが、事業者の降灰シミュレーションでは、多くの場合、影響の大きいと考えられる風向が卓越する月の平均的な風向風速を条件として与えているところ、平均化した分布によるシミュレーションでは、最悪シナリオのハザードを評価したことにならない、という。

イ 原規委の抱える矛盾

これらの問題に加え、浜田氏は、原規委の審査に臨む姿勢が抱える問題も指摘している。すなわち、Tephra2 と同じく移流拡散モデルに基づくシステムであった「緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム」、いわゆる「SPEEDI」について、原規委は、2014（平成26）年10月8日、信頼度が不十分として、原発事故の際の住民避難のための情報として利用しない方針を示したのである。

浜田氏は、放射能漏れによって大気中に放出されることが予想される放射性物質について、物理的性質、濃度、空間的広がり of のいずれをとっても、火山灰と比較すれば移流拡散モデルの適用に適した物質であるのに対し、Tephra2 を利用した火山灰の拡散予測は、妥当性の検証が困難な入力パラメータによる、現象を単純化した仮想のシミュレーションであるから、SPEEDI を信頼しないのに、Tephra2 を信頼するというのは矛盾である、というのである（甲183・2～3頁）。

ウ 事業者及び原規委の評価は科学とは無縁の粉飾の技術であること

浜田氏は、ポスターの最後を、次のように締めくくっている。

「指摘した審査資料の問題は、少なくとも理学とか工学とかの次元の問題とは言えないだろう。工学的割り切りの結果とも思えず、科学とは無縁の粉飾の技術というにふさわしいものではないだろうか。このような審査資料の作成に、学会関係者が関与している、或いは関与せざるを得ないという状況が、現実に存在するという事は、学会全体の問題として考えるべきである」(甲183・3頁)

なお、浜田氏の2017(平成29)年の上記ポスター掲示について、その後、学会において何らの異論・反論もない。また、異教授も、浜田氏の指摘について、少なくとも論理的におかしいところはないと述べている(甲179・40～41頁)。

(5) 本件と Tephra2 の関係

本件では、債務者は、Tephra2 を用いたシミュレーションの結果として、敷地における降灰層厚は33.5cmとし、敷地周辺の降灰実績を踏まえた検討結果⁷として、55.5cmとし、これらを踏まえて想定層厚を56cmとしている。そのため、Tephra2 を用いた結果が直接想定層厚として採用されているわけではない。しかし、適切なシミュレーションコードを用い、パラメータの不確実性を保守的に設定した結果、56cmを上回る降灰想定となる可能性は否定できない。

第4 社会通念について

本件で問題となり得る三瓶木次テフラ(SK)や大山倉吉テフラ(DKP)、大山生竹テフラ(DNP)は、いずれも本件火山ガイドにいう「巨大噴火」で

⁷ 敷地における降灰層厚 = (三瓶山～50cm等層厚線間距離6.1km ÷ 三瓶山～敷地間距離5.5km) × 50cm

はなく、平成28年4月6日福岡高裁宮崎支部決定が示したいわゆる「社会通念」によってその評価を緩和することは許されない。

もともと、仮に巨大噴火についてであっても、本件火山ガイドのように安易にその評価を緩和し、実質的にみて巨大噴火を考慮しなくても原発を稼働できるかのような基準はそれ自体不合理である。この点について、町田教授と巽教授の証言を引用する。

1 町田教授の証言

町田教授は、まず、阿蘇以外の南九州のカルデラについて、今後数十年あるいは数百年の間（運用期間中）に、大規模なカルデラ噴火が発生する可能性が十分小さいとは言えないという。そして、こういった大規模なカルデラ噴火について、その発生可能性が具体的に示されない限り、社会通念上容認できるという司法判断がなされていることについて、次のように述べている。

「その判断が本当に合っているか同課が問題ですが。というのは、ちょっと火山とは外れて、地震のことに思いを巡らしてみてもいいですか。御承知の東北地方の巨大地震、2011年の巨大地震、あれは、誰一人として予知できなかった。しかし、我々の調査では、平安時代の十和田の火山灰の下に、内陸かなり深くまで津波堆積物があるということが分かっておりました。それは、津波堆積物のすぐ上に、十和田Aという、911年の噴出物、平安時代の噴出物のすぐ下なんです。そこに、内陸かなり深いところに厚いのが見付かっている。ということは、それは文献に残っている、貞観大地震のイベントだというふうに判断することができそうです。そういう結果が分かっているから、福島原発等々、東日本の原発の津波対策を見直すべきだというふうに、我々の仲間が声を上げておりました。にもかかわらず、それは無視されて、とうとうあの原発事故が起こってしまった。津波がものすごく高かった。で、貞観地震みたいな巨大地震というのは、何千年置きかに起こるのに違いないんですけども、

その心配を十分にしていなかった付けが、福島の事故に起こったわけです。そういった例を火山に及ぼしてはいけないというふうに私は考えています。」(甲175・41～42頁)

そして、低頻度だというだけで対策を怠ってはならず、過去の歴史を調べてみる必要性を指摘している。九州においては、その歴史とは、例えば甲176号証の40頁であり、北海道も含めたものが41頁である。本件においても、噴火間隔や発生頻度の小ささをもって、安易に不確実性を無視ないし軽視することは許されないし、明らかに不合理な本件火山ガイドについて、社会通念などをもち出して差止めを認めないという判断をすることは絶対に許されない。

2 異教授の証言

異教授は、四国電力の代理人から、巨大噴火を前提としなければならないことになると、多くの地域で社会生活自体が成り立ち得なくなりかねないというような気もするが、社会として、巨大噴火に対してどのように対処していくべきと考えるか、と質問されたのに対し、「今おっしゃった、そういう気がするところ、私が今日、社会性として未成熟だと申し上げた点です。それが、なぜ、どういうふうに立ちいかなくなるのかということが分かれば、それをどう防ぐかということも分かってくると思います。ですから、そういうふうな火山現象が起きた場合には、どの地域でどういう影響が出て、そのために何が起きるのかということから始めて対策を講じるべきだというふうに思います」と、主観で判断することの不合理性、まして、十分な科学的知識がないままに巨大噴火のリスクを無視してしまうことの危険性を述べている(甲179・67頁)。

異教授は、リスクを定量化するため、まず、甲180号証の28頁を示して、発生確率を次のように考えるべきとする。

「この図は、過去12万年間、データが地層に非常によく残っている噴火について、その噴火マグニチュードと年代をプロットしたものです。先ほど来申

し上げてますように、噴火マグニチュード7以上のところ、黒丸で示してある部分が超巨大噴火に相当します。この図で、まず分かることは何かというと、超巨大噴火に関して周期性は認められないということです。それから、もう一つは、こういうふうな噴火を記述する、若しくはその確率を求めるということには、一つ一つの火山というのは独立にマグマの進化を続けているわけです。ですから、独立な事象が重なっている場合の確率過程として、ポアソン過程を使うのが妥当かと思います。ですから、そのポアソン過程に基づいて100年間の発生、噴火の発生確率を求めたのが、その右側の矢印の上に書いてある数字です。具体的に申し上げますと、マグニチュード7以上では約1パーセント、100年間で1%であるということになります」「(巨大噴火であれば、4パーセントということかとの質問に対し) はい、そうです」「(1万年に1回という表現を用いると) 1万年というのはあたかも周期のように受け取られてしまう可能性があります。1万年に1回の噴火が起きてきて、直近には7300年前だから、2700年の猶予があるというふうに間違った解釈を生むことがあるので、私は1万年に1回という言葉はやめて、100年で1パーセントという言葉を使うべきだというふうにこの論文で主張しています」(甲179・41～43頁)

そして、甲180号証の29頁を示して、「この表は、幾つかの災害や事故に関して、その危険値を求めたものです。危険値というのは、数学用語で申し上げると期待値と呼ばれるもので、この図で、この場合ですと想定死亡者数と年間発生確率を掛けたものです。それが数学では期待値。ただ、言葉としてあまり適切でないので、危険値というふうに示しています。この図を見ると、例えば九州の破局的噴火というのは、年間にすると平均的に約4000人程度がなくなるだけの危険値を持っている。ほぼ同じものは何かと申し上げると、交通事故であるということです」「社会通念という言葉は、よく法解釈で使われるというふうに聞いております。ただ、私たち科学者からすると、これは社会通念

として許されるのではなくて、社会通念が未成熟、若しくは間違っているというふうに理解すべきだと思います。そういう根拠は何かと申し上げると、先ほど示した危険値で申し上げると、交通事故とほぼ同じだけの危険値を持っているわけですから、頻度が低いからといって決して侮ることができない災害であるということで、社会通念の成熟度が低いと言わざるを得ないと思います」「(火山の専門家の中で、原発の安全を考える際に破局的噴火のリスクを社会通念上容認されているのだと考えるような専門家はいるかとの質問に対し) 少なくとも、私が知っている限りではいません」「容認というよりは無知という言葉がいいのか、十分に(リスクを)認識していないというふうに考えるべきだというふうに思います」(甲179・43～45頁)

3 まとめ

以上のとおり、大規模低頻度事象について、社会通念を根拠として安易にその影響を無視ないし軽視することは、科学者の立場から見ても不合理であり、福島第一原発事故の教訓に反しているといわざるを得ない。

まして、本件は、破局的噴火よりも一回りないし二回り小さい規模の噴火が問題となっており、甲180号証の28頁の図によれば、今後100年間で4パーセント程度の発生確率となり得る。

このような頻度で発生する事象に対し、万が一発生した場合に、これに対する備えが不十分で、冷却機能や閉じ込める機能を維持することができず、周辺環境に大量の放射性物質が拡散する事態となった場合の被害の大きさは計り知れない。想定が過小となることは、万が一にも許されないのである。本件における審理においては、そのことを常に念頭に置いて審理が行われるべきである。

以上