

地質学から見た高レベル放射性廃棄物処分の安全性評価

— 事象のシナリオに基づく長期予測の方法論 —

山元 孝広

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、閉鎖後の処分システムの安全性評価の対象期間は数十万年を超えるとされるが、そのような長期の安全性をいかに示すのか、いかなる基準を設け規制を課すべきなのかが大きな問題となっている。特に日本は地震や火山活動が活発な変動帯にあり、安全性評価に必要な地質学的課題は多岐に及ぶ。この論文では、火山活動の噴火履歴の解析結果を例にして、一つの出来事がプロセスを経て次々に出来事を誘発するという一連の事象(シナリオ)に基づく課題の抽出と地質事象の成因に踏み込んだ長期の将来予測の方法論を提示した。

キーワード: 放射性廃棄物、地層処分、地震、火山、将来予測

Safety assessment of high-level nuclear waste disposal in Japan from the standpoint of geology

– Methodology of long-term forecast using geological history –

Takahiro YAMAMOTO

Concerning the geological disposal system of high-level nuclear waste, the term subject to safety assessment of the system after closure is considered to exceed several hundred thousand years. We are faced with the major issues of how to guarantee such long-term safety and on what kind of criteria the system should be regulated. Because the Japanese islands lie in the mobile belt where earthquakes and volcanic activities often occur, a variety of geological issues required for the safety assessment have to be taken into consideration. In this paper, issues are extracted from a series of facts or scenario where incidents occur one after another provoked by one incident, and one such example is given of analysis results of the eruption history of volcanic activities. A methodology for long-term forecast addressing the causes of geological phenomena is also presented.

Keywords: High-level nuclear waste, geological disposal, seismicity, volcanism, long-term forecasting

1 はじめに

地質学とは、19世紀前半に書かれたチャールズ・ライエルの「地質学原理」の冒頭にあるように、過去に地球で起きた一連の変化を研究する科学である。地質学の人類に対する最大級の寄与は悠久なる時間(ディープ・タイム)の発見であり、岩石や地層に残された記録から、約46億年に及ぶ地球の歴史をひもといてきた。地質学が得意とすることは数千年から数百万年という長期の時間尺度で自然現象をとらえて研究対象地域の成り立ちを理解することで、古くは石油・金属等の資源探査や近年は地震・火山等の地質災害の軽減へと成果が活用されることが多かった。

一方で、社会的な要請の変化から地質学が対処すべき新たな課題が生じている。それは原子力発電から生じた放射性廃棄物を人間の生活環境から隔離された地下に埋設する地層処分であり、この処分が安全であるためには将来数十万年を超える長期にわたって地下の地質環境が

安定であることが求められる。このような時間尺度の安全性を人工的な構造物で囲い工学的に担保することは不可能であり、地下の地質環境そのものが放射性廃棄物に対する天然のバリアとして十分に機能することで安全な処分が成立する。つまり地層処分で求められる長期の安定性評価に答えられるのは地質学的な知見であり、これを最大限に活用した安全規制・安全審査なくしては、地層処分はなし得ない。図1は地層処分立地調査の調査評価項目と閉鎖後の安全確保の関係を概略的に示したものである。この論文では、この安全確保の考えにしたがい、地層処分の安全審査で求められる地質学的な調査・評価項目の抽出と、対象となる地質事象のモデルの構築に基づく長期の将来予測の方法論について記述する。

2 地層処分とは?

日本の法令では、さまざまな放射性廃棄物を放射能レ

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7
Geological Survey of Japan, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: t-yamamoto@aist.go.jp

Original manuscript received March 31, 2010, Revisions received September 27, 2011, Accepted September 27, 2011

ベルによって二つの処分施設のいずれか、すなわち第一種廃棄物埋設施設または第二種廃棄物埋設施設に処分することが決められている。前者は、いわゆる地層処分と呼ばれるものであり、長期にわたり廃棄物を生物圏から隔離する必要のある場合にとられる処分方法で、地下 300 m 以深に廃棄物を埋設する。対象となる廃棄物は、高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物の一部（長半減期低発熱放射性廃棄物）である。高レベル放射性廃棄物は、使用済核燃料を再処理する過程で生じた高レベル放射性廃液をガラス固化したもので、半減期の長い核種を含むため放射性廃棄物としての「寿命」はとても長いことに特徴がある。そして、このことが地層処分という人による管理を前提としない処分方法を選択する基本的な理由となっている。高レベル放射性廃棄物の放射能がもとのウラン鉱石（品位 1 % の高濃度のもの）の放射能レベルまで下がるのには発電後 10 万年程度を要するものとされている^[1]。一方、第二種廃棄物埋設とは、人の介入を前提とした管理処分であり、比較的浅い地下に前述以外の低レベル放射性破棄物を埋設する。

放射性廃棄物の処分の形態は廃棄物の種類によって異なるが、いずれの場合も廃棄物による一般公衆の被ばくを所定値以下にし、かつ合理的に可能な限り低く保つものでなければならない^[2]。これを基本的な安全性と考え、その安全性を確保するために、最終処分場では廃棄体そのものを含む人工的なバリア（「人工バリア」）とその周辺の地層等（「天然バリア」）から構成される多重のバリアが構築される計画である^[3]。人工バリアは放射性核種をできるだけ長く保持し、天然バリアへの放出を緩慢にさせる役割をもつ。また、天然バリアは単に物理的に放射性核種を生物圏から隔離するだけでなく、たとえば人工バリア環境を長期にわたり一定の環境に保つための安定した外部条件を提供することも期待されている。このように、これらのバリアは相補的に機能することが期待され、廃棄体そのものとそ

の周囲にある多重バリアの全体を一般に処分システムと呼ぶ。地層処分の場合、閉鎖後の処分システムの安全性評価の対象期間は数十万年を超えるとされるが、そのような長期の安全性をいかに示すのか、いかなる基準を設けるべきなのかが大きな問題となる。

日本における高レベル放射性廃棄物の地層処分の事業化は 2000 年 6 月に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（「特廃法」）に基づいている。この法律では、次に示す 3 つの段階を経てサイト選定を進めることが定められている。

- ① 概要調査地区の選定：文献その他の資料による調査（文献調査）を行い、文献調査の対象となった地区の中から概要調査地域を選定する。
- ② 精密調査地域の選定：概要調査地区について、地表踏査、ボーリング、トレンチの掘削や物理探査等地表からの調査を行い、概要調査地区の中から精密調査地区を選定する。
- ③ 最終処分施設建設地の選定：精密調査地域について、地上での詳細な調査に加え、実際に地下に施設を建設し、地層の物理的および化学的性質の調査等を行い、精密調査地区の中から最終処分施設建設地を選定する。

また、特廃法に基づき処分を実施する組織として 2000 年 10 月に原子力発電環境整備機構（NUMO）が設立されている。同機構は 2002 年 12 月から全国の市町村に対し処分候補地の公募を行っているものの、2011 年 10 月現在、公募に応じた自治体はない。

3 FEP (Feature, Event and Process) に基づく日本の地層処分における地質学的課題の抽出

日本における地層処分の最大の関心事の一つは「地震等が頻発する我が国で安全性を十分に確保した地層処分が可能なのか」という点にある。地層処分の安全確保では、当然ながら、処分施設を設置する地域の地質環境が

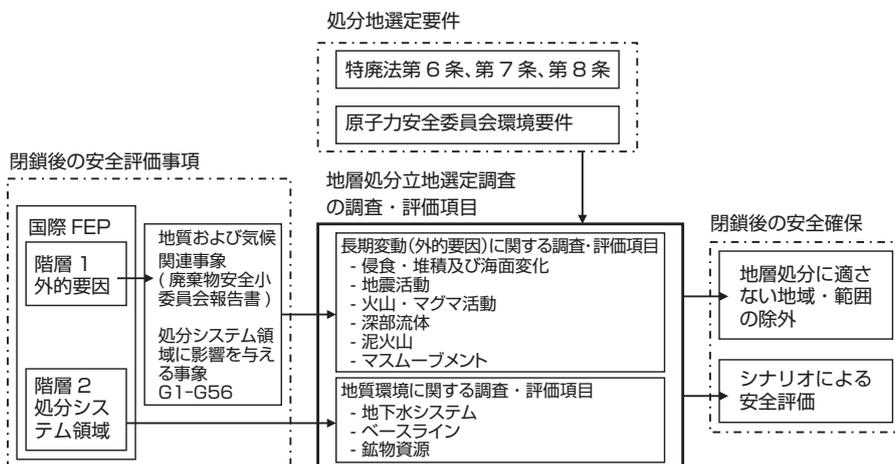


図 1 地層処分における立地選定調査の調査項目と閉鎖後の安全確保との関係

長期にわたり安定していることが必要である。特廃法でも「地震、火山、隆起、侵食その他の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと」、「将来にわたって、これらの自然現象による地層の著しい変動が生じるおそれが少ないと見込まれること」を処分候補地に求めている。すなわち、地層処分では、高レベル放射性廃棄物を地震等の自然現象の影響が及ばない安定した地質環境へと隔離することが重要となる。そのためには、地層処分システムが将来10万年を越えるような地質環境の長期変動によってどのような外的影響を受けるかを網羅的かつ定量的に評価することが求められよう。産総研深部地質環境研究コアおよびその前身の深部地質環境研究センターでは、経済産業大臣の諮問機関である総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会の下に設置された廃棄物安全小委員会での地層処分に関する安全規制の検討に必要な知見の取りまとめを行ってきた。

図2は、経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)の作成した地層処分についての国際FEPリストをもとに、我が国の場合の地層処分システムに外乱として影響を及ぼし得る事象を特定した相関図である^[4]。FEPは大きくは地球の内部エネルギーに原因がある「F1.2.01 構造運動・造山運動」を起因とする地質関連FEPと、太陽の入射エネルギーに原因がある「F1.3.01 地球規模気候変動」を起因とする気候関連FEPに区分される。図2では、これらを左右に配置し、下流の最下段に処分システム領域を置いている。一つの出来事がプロセスを経て次の出来事を引き起こし(図中の矢印)、これがさらに次のプロセス、出来事を誘発するという一連の事象(シナリオ)ととらえられるようにしている。なお、図2中で因果関係の矢印で結

ばれていない括弧付きのFEPは、日本の場合、ほとんど影響を無視し得るとして検討から除いたものである。

上記の処分システムに影響を与える地質および気候関連事象の検討を経て、深部地質環境研究センターでは、さらに2007年に「概要調査の調査・評価項目に関する技術資料」を公表した(<http://www.gsj.jp/GDB/openfile/files/no0459/0459index.html>)^[5]。この資料は特廃法の定める概要調査(精密調査地区選定段階における地表からの各種調査)において、閉鎖後の処分場の安全確保に必要な評価項目と調査手法を明示したことに特色があり、以下の項目を抽出している。

① 侵食・堆積および海面変化

- ・予測侵食量が埋設深度以上となり、廃棄物が地表に露出する可能性のある地域は、避ける必要がある。
- ・隆起・沈降および氷河性海面変化による相対的海面変化により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される地域は、相対的海面変化の影響について考慮する必要がある。
- ・隆起・沈降に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

② 地震活動

- ・第四紀に活動した断層の存在が明らかとなった地域では、断層沿いのずれ破壊により廃棄物が直接破損する可能性があり、その断層の影響の及ぶ範囲は避ける必要がある。
- ・第四紀に活動したものでなくとも、地表やその地下に大規模な断層が存在する場合は、その断層の再活動性や誘発変異の可能性が想定されるので、ずれ破壊

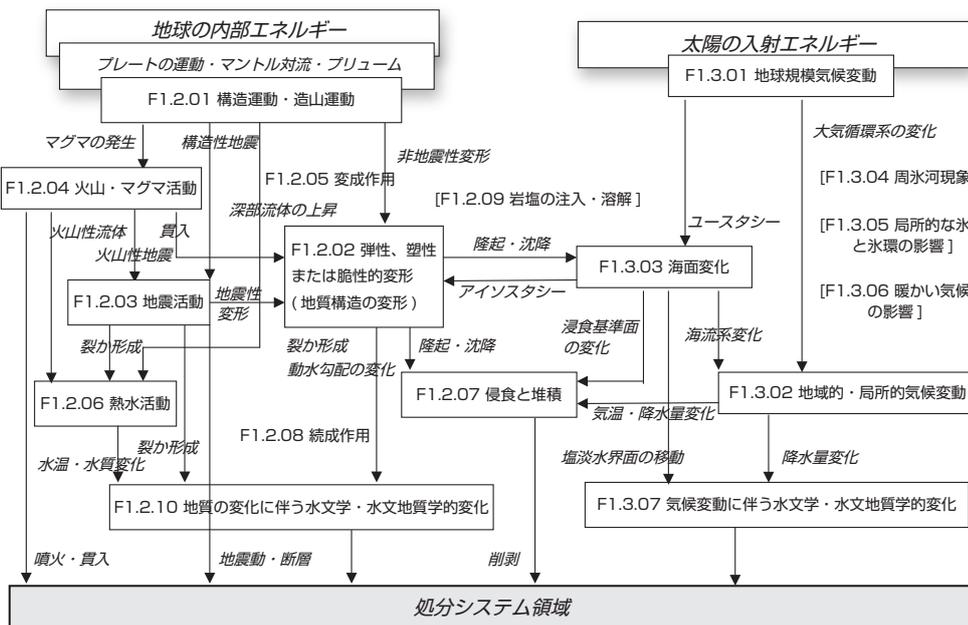


図2 FEP (Feature, Event and Process) リストに基づく地層処分における地質および気候関連事象の相関図
Fで始まる番号は、OECD/NEAのFEP番号である。矢印はFEP間の影響の伝搬を示している。山元・小玉^[4]を一部改変。

の影響が及び得る範囲を考慮する必要がある。

- ・地震活動により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される地域は、地震活動の影響について考慮する必要がある。
- ・地震活動に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

③火山・マグマ活動

- ・第四紀火山の存在が明らかとなった地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表に放出される可能性があり、避ける必要がある。
- ・第四紀火山が存在しなくとも新たに火山が出現し得る地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表に放出される可能性があり、避ける必要がある。
- ・第四紀火山の周辺あるいは巨大噴火の可能性のある範囲の周辺で、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動、水質の変化あるいは地温の変化が予想される地域は、火山・マグマ活動の影響について考慮する必要がある。
- ・火山・マグマ活動に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

④深部流体

- ・深部流体の活動により、将来放射性物質を閉じ込めておく機能に影響を与える可能性のある地下水の流動あるいは水質の変化が予想される地域は、深部流体の活動の影響について考慮する必要がある。
- ・深部流体の活動に影響を与えるテクトニクスについて、将来におけるその安定性を考慮する必要がある。

⑤泥火山

- ・第四紀に活動した泥火山の存在が明らかとなった地域は、噴火により廃棄物が直接破損あるいは地表に放出されることが懸念されるので、避ける必要がある。
(泥火山=異常に高い間隙水圧をもつ泥が、地下水、ガス、時には石油とともに地表に噴出する現象)

⑥マスマーブメント

- ・大規模なマスマーブメントの兆候が概要調査で明らかとなった地域では、斜面変動に伴うクリープやずれ破壊により廃棄物が直接破損することが懸念されるので、クリープやずれ破壊の影響が及ぶ範囲は避ける必要がある。
(マスマーブメント=地表における物質移動の総称で、地すべりや土石流等を含む)

4 長期的な将来予測の方法論

4.1 基本的考え方

すでに述べたように地層処分の安全性評価では、数十年以上先まで地質および気候関連事象の将来予測を行う必要がある。例えば地震活動の評価では、問題とする時間スケールによって、短期(直前～約1年)と長期(約1年～100年程度)の評価に分類されることがあるが、この区分けにしたがえば地層処分で行うべき予測は超長期と呼ぶべきものである。地震活動の評価の方法論は評価期間によって違いがあり、短期評価では地球物理学的・測地学的・地球化学的・水文学的観測が主な手法である。これに対し、長期評価では、過去の歴史からの統計的推論が主な手法となってくる。日本では、1995年の兵庫県南部地震以後、地震の長期評価が積極的に進められ、プレート境界地震や主要活断層沿いの地震については発生確率で評価できるようになってきた(地震調査研究推進本部; http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02.htm)。しかし、今回の東北地方太平洋沖地震(M9.0)が“想定外の事象”であったように、今の長期評価自体が防災上も十分に機能していたとは言いきれない。ましてや、既存の長期予測をそのまま超長期に外挿しようにも、長期評価の元になる初期条件や再来間隔が超長期に一定であるかどうか不確実性が大きく、信頼性のある評価とは現状ではなり得ない。それゆえ10万～100万年という超長期の時間を取り扱うには、統計的推論以外にも地質学的な各種の調査が必要となる。

地層処分における地質および気候関連事象の将来予測では、評価対象地域で過去に起きた事象の地質学的な変動傾向を明らかにし、これを将来に外挿することが基本となる。将来10万～100万年間に外挿するのであれば、これと同じかこれ以上の過去にまで遡る必要があろう。その上で統計的推論に十分な質・量の事象の活動履歴が得られれば、地震の長期評価のように確率的な評価もできるようになるかもしれない。しかし、すべての活動履歴が地質学的に保存されているわけではなく、十分な履歴が得られないケースのほうが圧倒的に多い。そのため、限られたデータから将来予測を行わなければならない、必ずしも定量的な扱いが可能ではないことは考慮しておく必要がある。例えばプレート境界地震では、活動履歴は歴史記録や津波堆積物に頼るしかなく、地質学的な痕跡を地表調査から長期間にわたり捉えることには限界がある。また、活断層沿いの大地震も、断層と被覆層の関係によっては、1万年内程度の活動履歴しか得られず、評価期間に比べて情報量が不足するケースが多いと予想される。変動地形的に侵食履歴を明らかにする場合も、評価期間に見合うだけの十分な編年された指標地形面が、評価対象地域やその周辺に

必ずしもあるとは限らない。水文地質学的変動に至っては、過去の変動がすべて合算された現在値のみが観測され、ここから個々の変動履歴を分離することが困難なケースがほとんどである。

このように統計的推論によって変動履歴を超長期の将来に外挿することが困難な場合には、超長期にわたる評価対象地域の地質環境の安定性を担保する別の説明が必要になろう。例えば地震活動や侵食を加速させる隆起運動の状態を記述できる評価対象地域の構造発達史のモデルを確立することで、定性的な将来予測像を示すことが求められる。また、水文地質学的変動では、年代軸の入った水質形成のメカニズムを確立することで、唯一定性的な将来予測が可能になる。具体的にどのような将来予測モデルが必要かは地域の地質特性によって異なるので、その場所に対応した予測論理を地域ごとに考える必要がある。

4.2 日本の火山活動を対象にした長期変動履歴の解析例

日本の火山活動を対象にした長期変動履歴の解析・評価手法の開発のため、島弧の典型的な断面モデルとして、2004年から、東南北部の太平洋側から日本海側に至る地域の火山活動の時空分布に関する研究を実施してきた。この解析例を以下に示す。

日本には活火山（過去およそ1万年以内に噴火した、あるいは噴気活動の活発な火山）が100余個、“第四紀”（旧定義による過去170万年前から現在まで）に噴火した火山が200個を越えて存在する（図3）。ただし、火山は日本列島に一樣に分布するわけではなく、プレートの配置に支配され偏在する傾向が顕著である。すなわち、日本列島の第四紀火山は、プレートの沈み込み境界から陸側プレート

内に200～300 km離れた位置にある火山フロント上に最も密に分布し、火山フロントと沈み込み境界の間（前弧側）には火山が分布しない。また、火山フロントから反対の背弧側に離れるほど火山の分布がまばらになる傾向も顕著である。原子力発電環境整備機構では処分候補地の公募にあたって、火山活動の影響を避ける目的で「第四紀火山の中心から半径15 kmの円の範囲内にある地域が含まれない」ことを条件としている^[6]。しかし、数十万～100万年先の将来の火山活動を考える際に、このような排除要件だけでその影響を避けることは可能であろうか？次に火山活動の時空分布の具体的な解析例を基に考えることとする。

火山活動の噴火履歴を解析する際には、横軸に時間、縦軸に積算マグマ噴出量をとったいわゆる噴出量階段図を作成する。図4はその例として、東北日本南部の代表的な活火山である安達太良火山のマグマ噴出物を対象に作成したものである^[7]。各マグマ噴火イベントは地質学的には一瞬であるので縦の直線、非噴火時はマグマ噴出がないので横の直線で示される。図4.1)はおよそ10万年前まで遡った噴出量階段図で、破線で示した平均的な噴出率が示すように一定の頻度で噴火が繰り返されたことが階段図から視える。しかし、同火山について10万年を超える時間尺度まで履歴を拡張すると、図4.2)のように12万～20万年前に大きな活動休止期があり、10万年前までの平均的な噴出率は過去に延長できない。20万～26万年前、32万～43万年前には別のマグマ活動時期が存在したが、個々の平均的噴出率は活動期ごとに異なり、10万年前までの安達太良火山の活動がそのまま一定率を仮定して過去には外挿できないことが明らかである。言い換えると、個々の活動期を支えるマグマ供給系には寿命があり、10万年を超

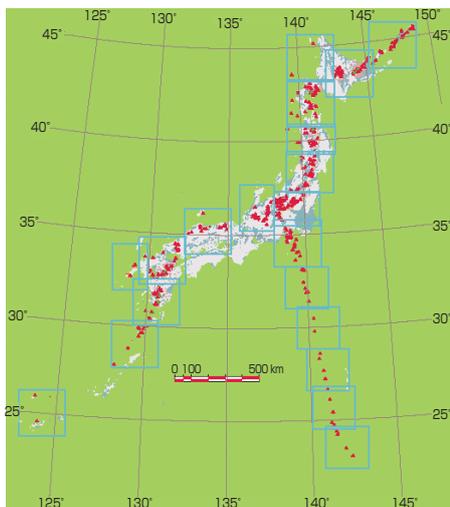


図3 産総研情報公開データベース「日本の第四紀火山」のインデックス図
赤色の三角が第四紀火山。

http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/index.htm

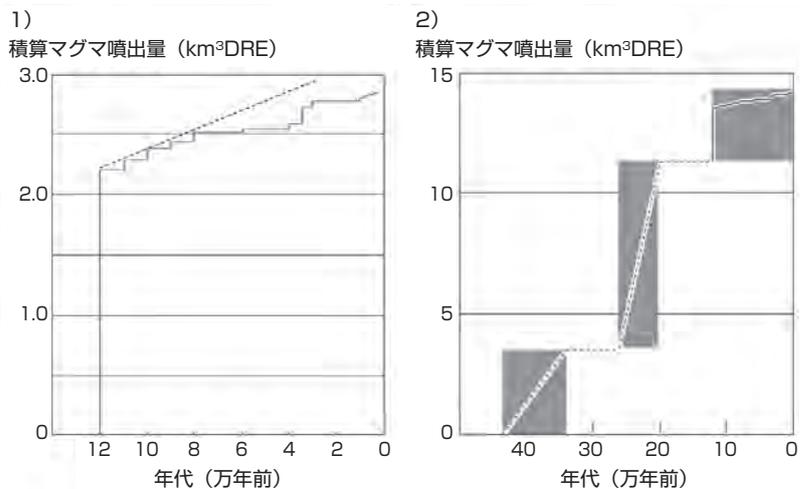


図4 福島県、安達太良火山の噴出量階段図

1)と2)とも同火山の噴出物を対象にしているが、横軸の時間尺度が異なることに注意されたい。2)のグラフは1)のグラフを包有している。山元・阪口^[7]を一部改変。

えるような将来予測においては、現在活動中の活火山ではなく、活動していない火山の再活動評価が重要になってくることを示唆していよう。

図5は、安達太良火山を含む東北日本南部における前期更新世初頭の約180万年前から現在までの火山の時空分布変遷を示している^[8]。この間の火山の分布パターンの特徴でまず重要なことは、火山フロントの位置はほとんど変化せず、フロント沿いには絶えず火山が存在していることである。一方で背弧域の火山の分布は区間ごとに大きく異なり、前期更新世に背弧域で活動していた火山は、中期更新世の前半には活動を停止している。中期更新世後半の30万年前以降になると新たな背弧域火山活動(沼沢火山・砂子原カルデラ火山)が始まるものの、その位置はそれまでの火山活動の空白域であることに注目しなければならない。すなわち、時間を30万年前まで遡ったとすると、沼沢火山や砂子原カルデラ火山は「既存の第四紀火山の中心から半径15 kmの円の範囲内」の外側に新規に出現しており、この要件だけでは火山活動を立地で排除できないことを意味している。図5の東北日本南部の火山の時空分布変化を理解するためには、さらに時間尺度を拡張して地域全体のマグマ噴出率の傾向を見てみる必要がある。図6はその結果で、横軸の時間目盛りは100万年単位、縦軸には火山フロント沿いの那須火山群から背弧側の沼沢火山にかけての会津地域におけるすべての火山からのマグマ噴出量の総和をとっている^[9]。図6の地域全体の噴出量階段図から明らかなことは、この地域の破線で示される長期的なマグマ噴出量率が100～200万年間隔で起きる一度の噴出量が100 km³を超える巨大噴火に支配されていることである。噴出箇所には直径が10 kmを超える大型の陥没構

造(カルデラ；図中のピンク色部)が60 km × 50 kmの範囲に折り重なるように形成されており、その活動は1000万年前にまで遡ることができる^[10]。沼沢火山や砂子原カルデラ火山の出現は、この火山活動域の中で起きたものであり、第四紀の火山に限定した活動履歴の調査のみからはその位置付けを捉えることはできないものである。ここで例示したような事象の階層構造の存在は、単純な変動履歴の外挿のみの将来予測の難しさをよく表している。数十万～100万年先の将来予測にある不確実性を軽減するためには、評価期間を大きく遡った対象地域の構造発達史を理解し、“想定外の事象”を極力避ける努力が求められよう。

4.3 確率論的評価の限界：事象の地質学的理解に踏み込んだ将来予測の必要性

米国では、2002年にネバダ州ユッカマウンテンが高レベル放射性廃棄物処分地として決定され、2008年9月より処分場の建設認可に関する安全審査が始められた。しかし、オバマ大統領のユッカマウンテン計画中止方針により、2010年3月に許認可申請の取り下げ申請が行われ、地層処分は事実上中断している。このような経緯は別にして、ユッカマウンテンでは安全評価において大きな地質学的問題があったことは、我が国の地層処分においても再考しておく必要がある。それは、ユッカマウンテン・サイトが第四紀にも活動している玄武岩マグマの単成火山群内にあるため、サイトを対象とした火山活動のさまざまな影響評価を行わざるを得なかったことである。実施主体である米国エネルギー省(DOE)は、カルデラを形成するような巨大噴火は起こらないとする前提のもと、過去の単成火山噴火履歴から平均的な噴火再来間隔を求め、サイトでの噴火確率を評価している^[11]。しかし、単成火山群の噴火活動は、

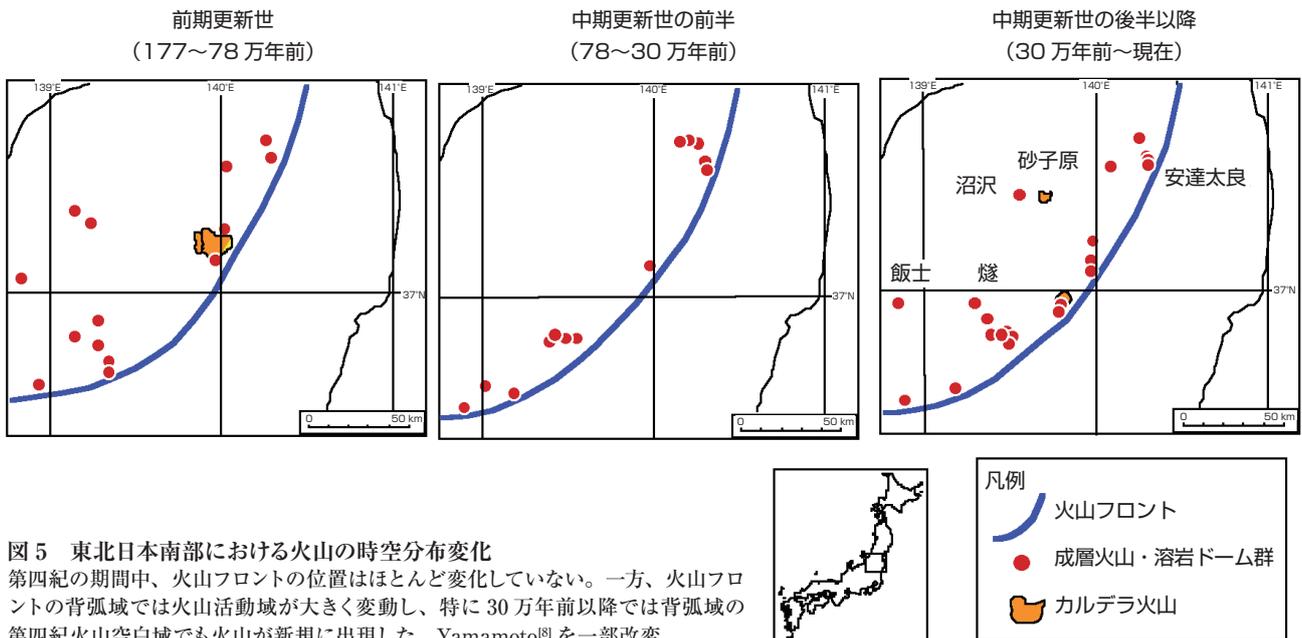


図5 東北日本南部における火山の時空分布変化
 第四紀の期間中、火山フロントの位置はほとんど変化していない。一方、火山フロントの背弧域では火山活動域が大きく変動し、特に30万年前以降では背弧域の第四紀火山空白域でも火山が新規に出現した。Yamamoto^[8]を一部改変。

時間的にも空間的にも偏在しており、決して一様には起きていない。活動のピークや分布状況を考慮に入れるなら、DOEの示す確率は明らかに過小評価であるとの強い指摘があったのも当然のことであろう^[12]。すなわち、確率値の算定には時間尺度や空間尺度の取り方によって値が異なる任意性があり、活動頻度の偏在性を説明する科学的な根拠なしには、確率的な将来予測を行っても信頼性に乏しいと言わざるを得ない。安易に火山活動の確率評価を東北日本に当てはめた研究例も見受けられるが^[13]、これらは第四紀の火山の分布をそのまま一定の確率関数として外挿したもので、この論文で示したような図4や図5の時空分布変化やマグマ噴出量変化を考慮したものではない。

火山活動の評価では活動域の時空変化に合わせて、火山活動の源である地下深部におけるマグマの発生条件も理解しておく必要がある。この論文では詳しく触れないが、前述の東北日本背弧域に新規出現した沼沢火山では噴出物の化学組成変化に部分熔融度の上昇が認められ、地殻の再加熱でマグマが生じたと考えられている^[8]。また、東北日本南部の会津地域の巨大カルデラ噴火では、下部地殻の大規模な熔融と地殻の上下方向の再配列が大量のマグマ形成時に起きたことが同じく噴出物の地球化学的特性から示され、地震学的に示される地下の温度構造との対応が良い^[9]。火山活動の将来予測では、地質学的・地球物理学的・地球化学的根拠からマグマ成因論にまで踏み込んだ評価が求められるのは当然であり、理論的裏付けのない数あわせだけの確率評価はその意味付けが問われるだけでなく、ユッカマウンテン計画のような無用の混乱をもた

らしかねないことに留意すべきである。

5 まとめ

原子力発電の結果として放射性廃棄物がすでに多量に国内に存在し、今も発生し続けている以上、これを早急かつ効果的に処分せざるを得ない状況下に私達はある。特に地層処分では、埋設する地質環境の長期安定性評価という課題以外にも、事業そのものの社会的な合意形成が不可欠である。安全性の説明責任が事業者にあるのは当然のこととして、規制当局にも事業者の事業許可申請が妥当なものであるのか否かの判断能力を有し、かつそのことを社会に公にしておくことが合意形成のために求められよう。産総研深部地質環境研究コアは国の規制支援研究を担っており、研究成果を技術支援として安全規制へと反映させることを目的としている。特に、数十万年先の将来予測という一般国民の日常感覚を超えた時間尺度での安全性の考え方の提示は、地質学に基礎を置く深部地質環境研究コアが責任をもって解決すべき課題であると自認している。地質事象は、稀頻度事象（起こる頻度の低い事象）であっても、その事象が起きた場合の社会への影響が極めて大きくなり得ることは、今回の東北地方太平洋沖地震の教訓も踏まえなければならない。この論文はこのような背景から、地層処分における地質学的課題と将来予測の方法論について述べた。特に処分システムに影響を与える天然事象の評価では、候補地におけるジャスト・ヒストリーとしての地質構造発達史の復元が重要で、十分な尤度を持つ時間尺度で評価することが、“想定外の事象”を排除す

積算マグマ噴出量 (km³ DRE)

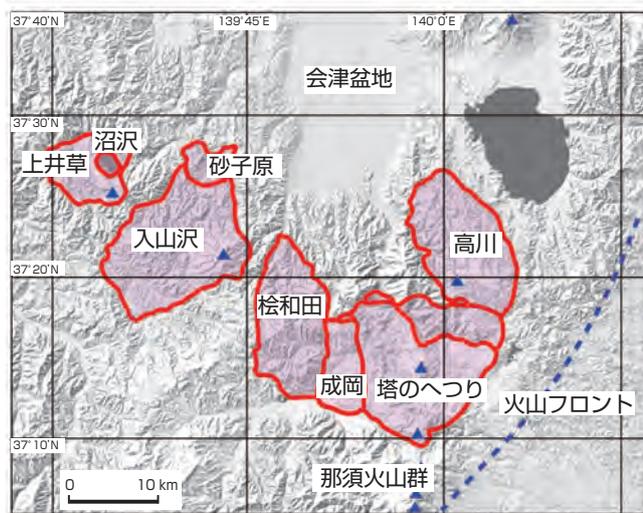
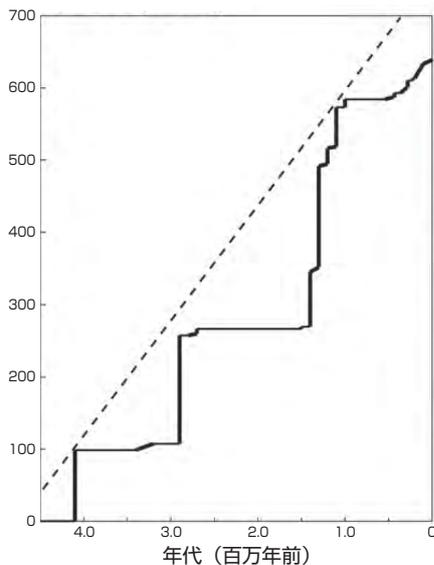


図6 東北日本南部の会津地域全体を対象にした噴出物階段図
長期的なマグマ噴出率は、100～200万年間隔で起こる右のカルデラ（赤線部）を形成するような巨大噴火が支配している。
Yamamoto^[9]を一部改変。

るためには必要となる。原子力安全委員会では、最近、第二種廃棄物埋設施設の一つである余裕深度処分の安全規制で、地震や火山活動を稀頻度事象として評価する考え方を提示している^[14]。しかし、現在の原子力安全委員会の考え方では、稀頻度事象の設定の仕方自体に任意性があり、多様な自然事象の中から評価線量を低く抑えられるような恣意的な事象の設定を除外する手だてが明確にされていない。ましてや非管理型の第一種廃棄物埋設施設である地層処分では、特魔法にあるように立地選定で懸念される自然事象が排除されていることが前提となっており、排除されたはずの地震や火山活動が稀頻度事象として安全評価されることには大きな違和感がある。繰り返しになるが、地層処分の安全評価では候補地のより正確な地質学的理解が基本であり、そのことによって不確実性をできるだけ軽減することにこそ、その本来の意義がある。

参考文献

- [1] 核燃サイクル機構: 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- (1999).
- [2] 長崎晋也, 中山真一: 放射性廃棄物の工学, 原子力教科書, オーム社 (2011).
- [3] 原子力発電環境整備機構: 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性-「処分場の概要」の説明資料-, NUMO-TR-04-01 (2004).
- [4] 山元孝広, 小玉喜三郎: 日本の地層処分で考慮すべき地質及び気候関連事象について, 月刊地球, 26, 452-456 (2004).
- [5] 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター: 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料-長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方-, 地質調査総合センター研究資料集, 459 (2007).
- [6] 原子力発電環境整備機構: 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, NUMO-TR-04-02 (2004).
- [7] 山元孝広, 阪口圭一: テフラ層序からみた安達太良火山, 最近約25万年間の噴火活動, 地質学雑誌, 106 (12), 865-882 (2000).
- [8] T. Yamamoto: A rhyolite to dacite sequence of volcanism directly from the heated lower crust: Late Pleistocene to Holocene Numazawa volcano, NE Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 167, 119-133 (2007).
- [9] T. Yamamoto: Origin of the sequential Shirakawa ignimbrite magmas from the Aizu caldera cluster, northeast Japan: Evidence for renewal of magma system involving a crustal hot zone, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 204, 91-106 (2011).
- [10] T. Yamamoto: Sedimentary processes caused by felsic caldera-forming volcanism in the Late Miocene to Early Pliocene intra-arc Aizu basin, NE Japan arc., *Sediment. Geol.*, 220, 337-348 (2009).
- [11] U.S. Department of Energy: Yucca Mountain preliminary site suitability evaluation, DOC/RW-0540 (2001).
- [12] I.S. Smith: Episodic volcanism and hot mantle: Implications for volcanic hazard studies at the proposed nuclear waste repository at Yucca Mountain, Nevada, *GSA Today*, 4-10 (2002).
- [13] S.H. Mahony, R.S.J. Sparks, L.J. Connor and C.B. Connor: Exploring long-term hazards using a Quaternary volcano database, *Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities*, 326-345, Cambridge University Press (2009).
- [14] 原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会: 余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方 (2009).

執筆者略歴

山元 孝広 (やまもと たかひろ)

1986年3月神戸大学大学院理学研究科修士課程修了。同年4月工業技術院地質調査所入所。1993年博士(理学)取得。2001年4月産業技術総合研究所深部地質環境研究センター長期変動チーム長。2007年4月原子力安全基盤機構 規格基準部 放射性廃棄物評価室 調査役。2009年4月産業技術総合研究所地質情報研究部門主幹研究員。地質学、火山学が専門。2001年からは地層処分の規制支援研究を担当している。



査読者との議論

議論1 一般的なコメント

コメント (富樫 茂子: 産業技術総合研究所評価部)

この論文は、構成学としては対象となるタイムスケールがかなり長い自然事象に対する人間活動の影響評価についての方法論という観点からとらえることができます。

地質事象は、稀頻度事象であっても、その事象が起きた場合の社会への影響が極めて大きくなり得ることは、今回の東北地方太平洋沖地震の教訓が示すところでもあり、今後の社会の対応が強く求められている重要な課題です。

この論文では、具体的には地層処分の安全審査で求められる地質学的課題を例として、一つの出来事がプロセスを経て次々に出来事を誘発するという一連の事象(シナリオ)に基づく課題の抽出の方法、対象となる地質事象の確率論的手法の限界、これを解決するための地質事象の成因モデルの構築に基づく長期の将来予測の必要性について記述しています。

内容としては構成学として極めて重要な視点を提供していると考えられます。査読の過程で、より一般化された方法論としての特徴を明確にするように改善がされました。

議論2 この研究の意義

コメント (小野 晃: 産業技術総合研究所)

原子力発電に伴う放射性廃棄物の処分に関して、安全性の評価のために地質学の要素技術を統合・構成し、評価の方法論を提示した優れた研究と思います。

福島第一原子力発電所の事故からも明らかになりましたが、原子力発電所の立地や廃棄物処分地の選定には規制当局の判断だけでなく、国民全体や関係する自治体の意向がとても重要です。そしてこれらの判断は、科学的な根拠に基づいてなされるべきと考えます。その意味で科学研究の成果が、規制当局に対してだけでなく、広く国民に共有されることが望ましく、この論文が広く分野を超えて読まれ、参照されることを期待します。

議論3 廃棄物処分地の決定に至る全体プロセスとこの研究の位置付け

コメント2 (小野 晃)

放射性廃棄物の処分地を決定するまでには、多くの関係者が関わるとのことですので、決定に至るプロセス全体を示し、その中でこの

研究がどのような位置付けにあるかを示していただけると読者にとって分かり易いと思います。

回答（山元 孝広）

コメントにしたがい、この研究と地層処分における閉鎖後の安全確保の関係を示す図1を追加しました。地層処分事業の進め方、すなわち最終処分地選定手順は特魔法により規定されており、処分地の選定自体は実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）が実施しますが、安全規制の中身は確定していません。この研究の最終的な目標は、処分地選定調査における調査・評価項目の選定と各項目の判断指標を確立することです。例えばこの論文に示したように、火山活動が起き影響を被る場所や将来新たに火山活動が起こる恐れのある場所は処分地に相応しくありません。そのことをどのようにして評価法として確立するのかが方法論がこの研究の主題です。

議論4 将来世代に対する現世代の責任

質問（小野 晃）

この論文では、放射性廃棄物の処分の安全性を将来数十万年から百万年の時間範囲で評価する必要性があり、その根拠は、高レベル放射性廃棄物の放射能レベルが自然に存在する放射性物質のレベルまで減衰することと記述されています。この時間範囲を経過したときには、おそらく現生人類は別の進化段階にまで達している可能性がありますし、ましてや現在の文明や文化、民族等は跡かたもないと想像されます。この論文は、そのような遠い将来においても、現在の人類はその時の地球環境や生物圏に関して責任をもつべきだという考えに基づいていると思いますが、その考えの妥当性に関して筆者はどうお考えですか。

回答（山元 孝広）

今の原子力発電の恩恵に浴した世代が、その廃棄物の処分に責任をもつことは当然のことと考えます。福島第一原子力発電所の事故以

降、脱原発依存の世論が高まっていますが、廃炉のためには各原発にすでに存在する放射性廃棄物の処分を避けては通れません。単に発電を止めれば「脱原発」が達成されるわけではなく、廃棄物の最終処分まで私達の世代が責任をもつことが原発を継続する上でも、廃止する上でも必要になります。

さて、ご指摘の将来の人間活動についてですが、地層処分の閉鎖後の安全評価ではこのことも念頭においた検討を諸外国同様に日本でも行っています。例えば、図1の「地質環境に関する調査・評価項目」に鉱物資源とありますが、これは将来の人間活動による廃棄体との接触を避けるために、掘削の可能性のある地下資源の存在を排除要件として設定しているからです。

議論5 将来におけるリスク発現の評価のシナリオ

質問（小野 晃）

将来のある時点で、処分した放射性廃棄物がヒトに与えるリスクは、その時点の放射性物質の放射能のレベルと、放射性物質がヒトに影響を与える状況に成り得る可能性の積になるのではないかと考えます。

放射性物質の放射能のレベルは原子核物理のデータから対数的に減衰することが推定できます。一方廃棄物に由来する放射性物質がヒトに与える状況に成りうる可能性は地質学の問題ですが、具体的にどのようなシナリオでリスクを評価するのでしょうか。

回答（山元 孝広）

地層処分における天然バリアは、距離的な隔離のみを担うわけではありません。地下深部に埋設された人工バリアを含む廃棄体は埋設後の腐食により、いずれその機能が失われます。その後、放射性物質は地下水により天然バリア中を移動する過程で、鉱物の吸着能による遅延効果や、地下水による希釈等により、地表の生活環境に到達するまでに放射能が十分減衰することが期待されています。閉鎖後の安全評価はこのような地下水移行シナリオが基本となります。