

# 米国ネバダ州ヤッカマウンテンの地質 —米国の高レベル放射性廃棄物最終処分場候補地—

高木 哲 一<sup>1)</sup>

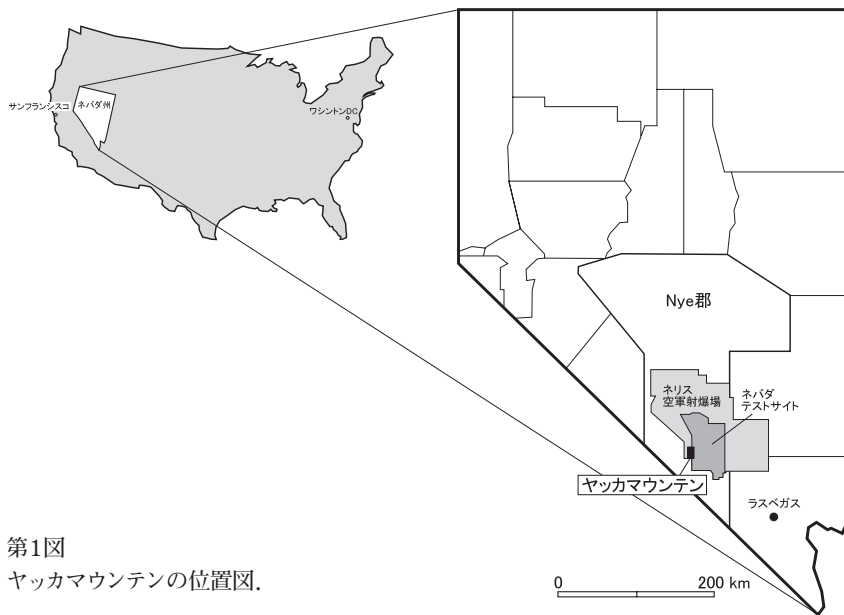
## 1. はじめに

原子力発電所から排出される使用済み核燃料などの高レベル放射性廃棄物は、放射能が自然界のレベルに減衰するまで数万年～百万年かかるため、地表施設で一定期間冷却した後、生活圏から隔離された地下深くの岩盤に最終処分する方法が世界的に主流となっている。地下の最終処分場は、火山や断層の活動によって破壊されたり、放射能を帯びた物質が漏れだして生活圏を汚染したりすることのないように、その建設場所を慎重に選定しなければならない。

米国ネバダ州ヤッカマウンテン (Yucca Mountain) は、米国の放射性廃棄物最終処分場の唯一の候補地として、全米の複数の候補地から、1987年に選定された。以来、米国エネルギー省により安全性や環境へ

の影響に関する詳細な研究・評価が実施され、2006年現在、建設のための許可申請書を米国原子力規制委員会に提出するための準備が進められているのだが、ヤッカマウンテンはいかなる地質から構成され、最終処分場はどのような場所に計画されているのだろうか。そこで本報告では、これまでに公表されている論文・資料および筆者訪問時の写真などを用いて、ヤッカマウンテンの地質の概略を紹介する。なお、注目される同地域の水文地質に関しては、稿を改めて報告したい。

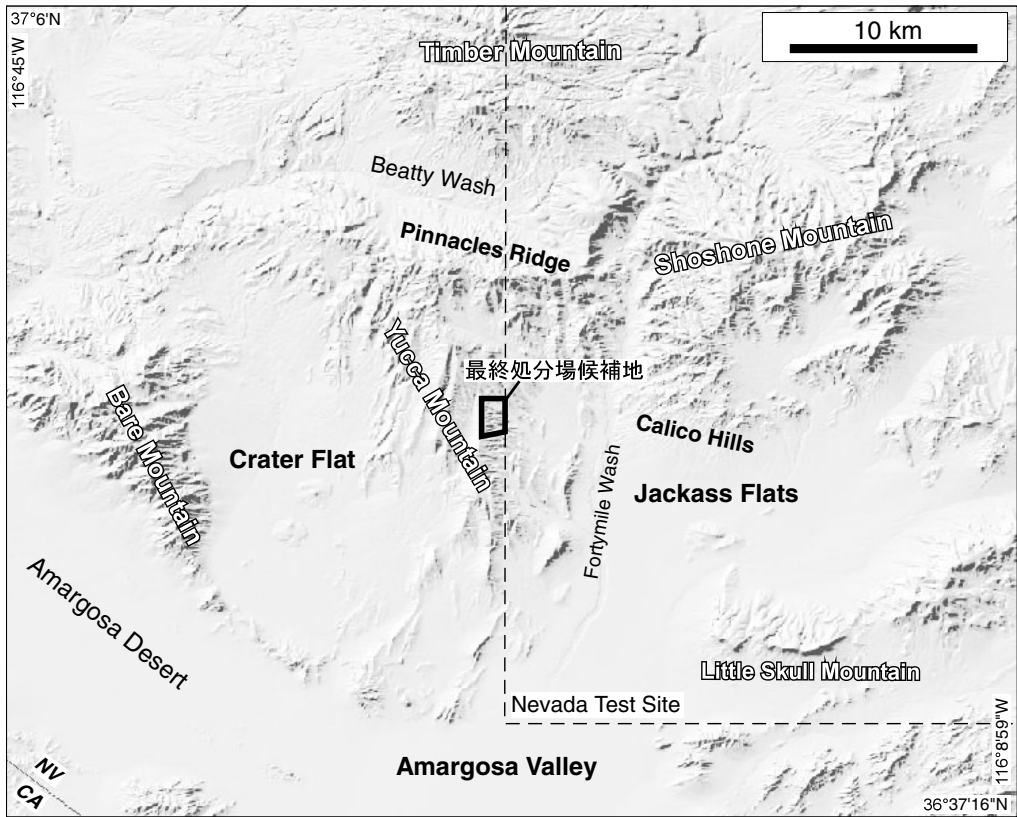
ヤッカマウンテン地域の地質全般については、主にU.S.DOE-OCRWM (1999; 2001; 2002) およびMongano *et al.* (1999) を基に記述した。従って、これらの文献の本文中での引用は省略した。米国の放射性廃棄物最終処分場の安全規制およびヤッカマウン



第1図  
ヤッカマウンテンの位置図.

1) 産総研 深部地質環境研究センター

キーワード：放射性廃棄物, 地層処分, アメリカ, ヤッカマウンテン, ネバダ州, グレートベースン



第2図 ヤッカマウンテン周辺の地形. U.S. Geological Survey, The National Mapを基に作成.



写真1 ヤッカマウンテンから見たBare Mountain (遠景).

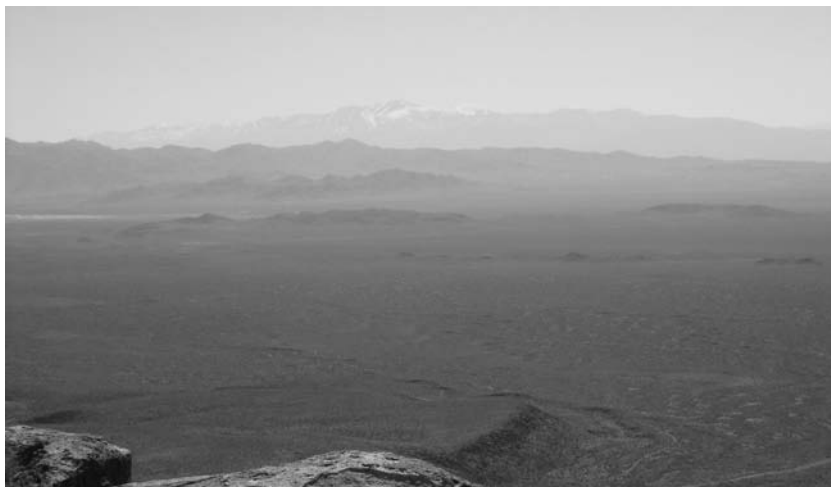


写真2

ヤッカマウンテンの尾根から望むAmargosa Valley. 広大な砂漠地帯であり人口密度は極めて低い. 遠景の高山の麓には, Death Valleyが広がる.

テン選定の経緯については, 高木 (2005), 永野 (2006) などを参照されたい.

## 2. ヤッカマウンテンのアウトライン

### 2.1 位置

ヤッカマウンテンは, カリフォルニア州との州境に近いネバダ州南部, ラスベガスから北西約160kmに位置する(第1図). この地域は, 広大な砂漠地帯で人口密度が極めて低いことから, 核実験場として知られるネバダテストサイト, ネリス空軍射爆場が設置されており, 民間人の立ち入りが厳しく制限されている.

ヤッカマウンテンも, ネバダテストサイトの西側に隣接するため, 見学や調査には特別な許可が必要である.

### 2.2 地形

ヤッカマウンテンは, Timber Mountain (2,270m) から連なる幅6~10km, 南北約30km, 標高1,500~1,200mの細長い山体からなる(第2図). 東西に広がる平地 (Jackass Flats, Crater Flat) とヤッカマウンテンとの比高差は約650mである. Crater Flatの西側には, 先第三系基盤岩類からなるBare Mountainが露出する(写真1). Bare MountainとCrater Flatは, 下部地殻にまで達すると推測される正断層 (Bare



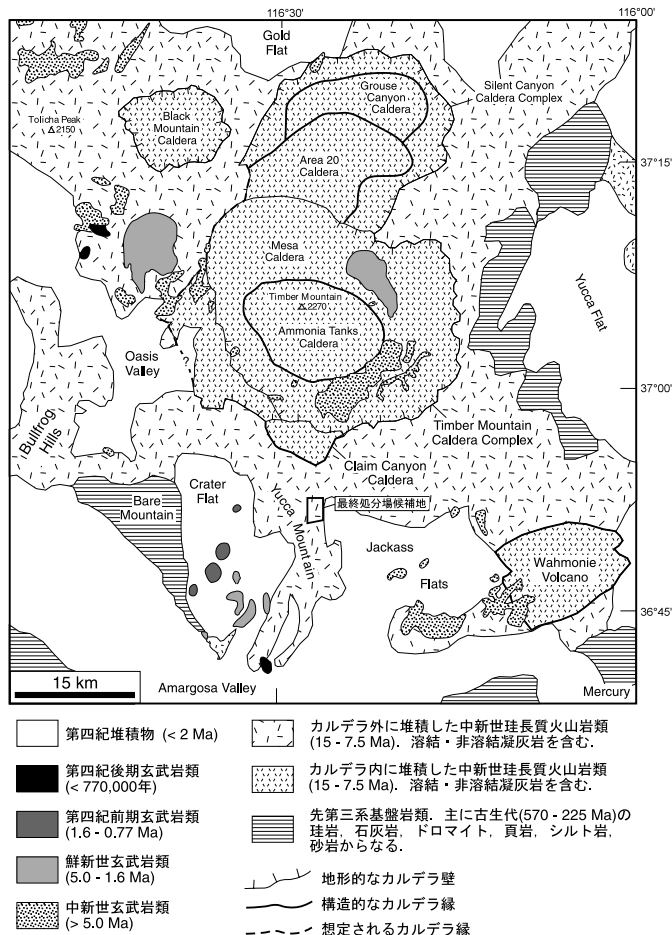
写真3 Amargosa Valley北側に露出する古生代基盤岩類.

Mountain Fault) によって境される (Brocher *et al.*, 1998). ヤッカマウンテンおよび東西の平地は, Amargosa Valley に向かって南側に緩やかに傾斜する (写真2). Amargosa Valley は, ヤッカマウンテンに最も近い民間人居住地であり, ヤッカマウンテン方面からの地下水の流動方向にもあたることから, この地区の標準的住民の被曝レベルが最終処分場における安全規制の基準となっている.

### 3. ヤッカマウンテンを構成する地層・岩石

#### 3.1 概要

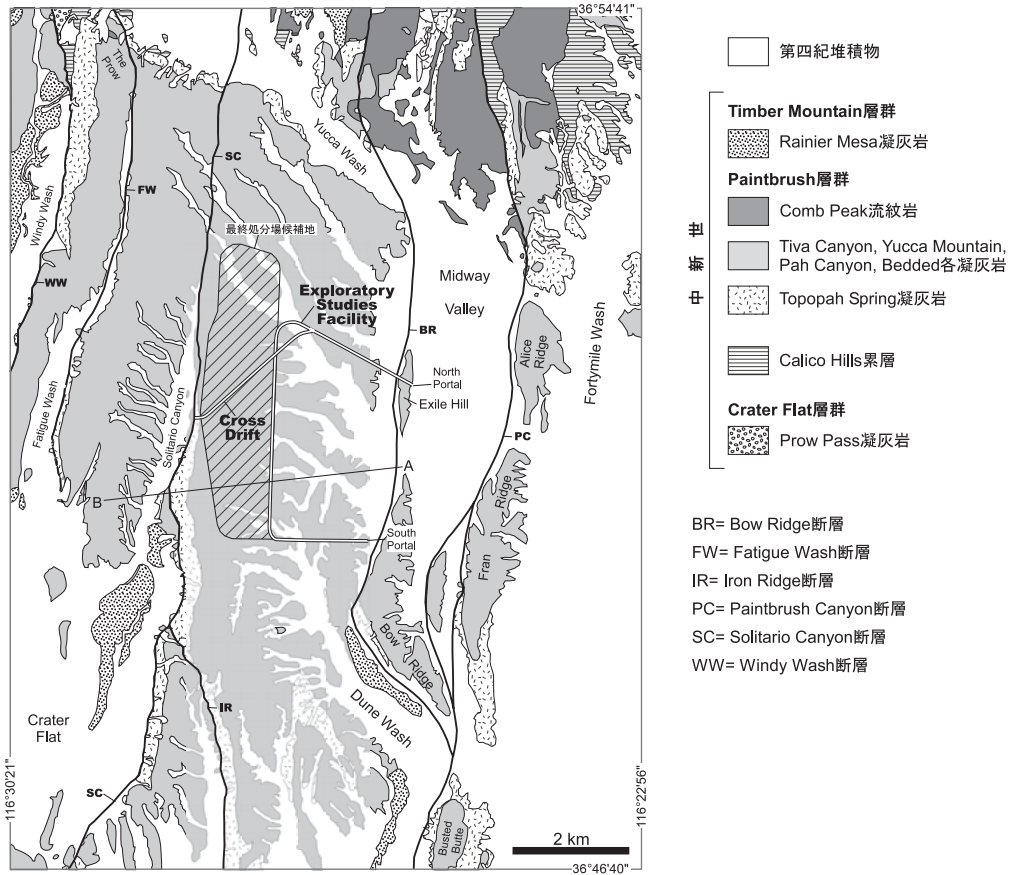
ヤッカマウンテンは, シェラネバダ山脈の東側に広がるグレートベースンの南縁部にあたり, ジュラ紀以降に生じた大規模な背弧堆積盆の一部である. ヤッカマウンテン地域の基盤は, 先カンブリア紀~古生代の珪岩, シルト岩, 頁岩, 炭酸塩岩からなり, ヤッカマウンテンの下位にも広く伏在する (写真3). この内, 古生代の炭酸塩岩は, 本地域の主要な帯水層になっている. ヤッカマウン



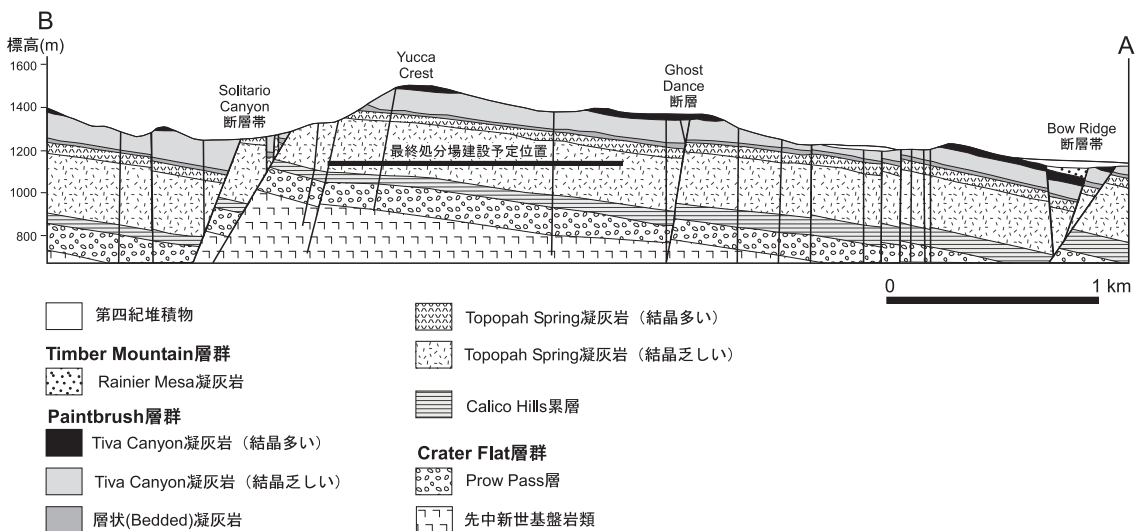
第3図 ヤッカマウンテン周辺の地質概略図. U.S.DOE-OCRWM (2001)より引用(一部簡略化).



写真4 ヤッカマウンテンから見た単成火山の一つBlack Cone. 中央のシンダーコーンの周囲にスコリア丘が点在する.



第4図 ヤッカマウンテン最終処分場候補地周辺の地質図. Day *et al.* (1998)を簡略化.



第5図 ヤッカマウンテン最終処分場候補地付近の断面図. 断面線の位置は、第4図中に示した. Day *et al.* (1998)を簡略化.



写真5 Tiva Canyon凝灰岩中の非溶結砂質凝灰岩. このような非溶結層は透水係数が高いため, 水文地質学的な検討を行う際には注意を要する.

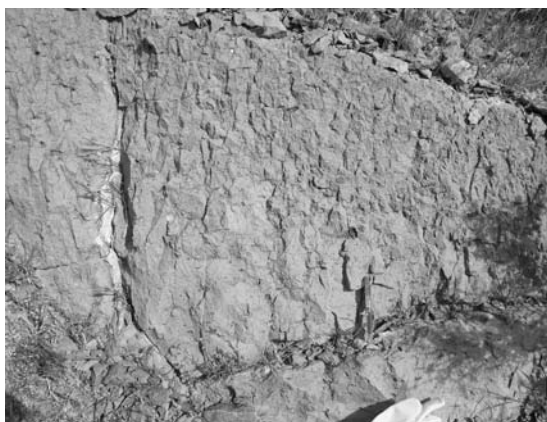
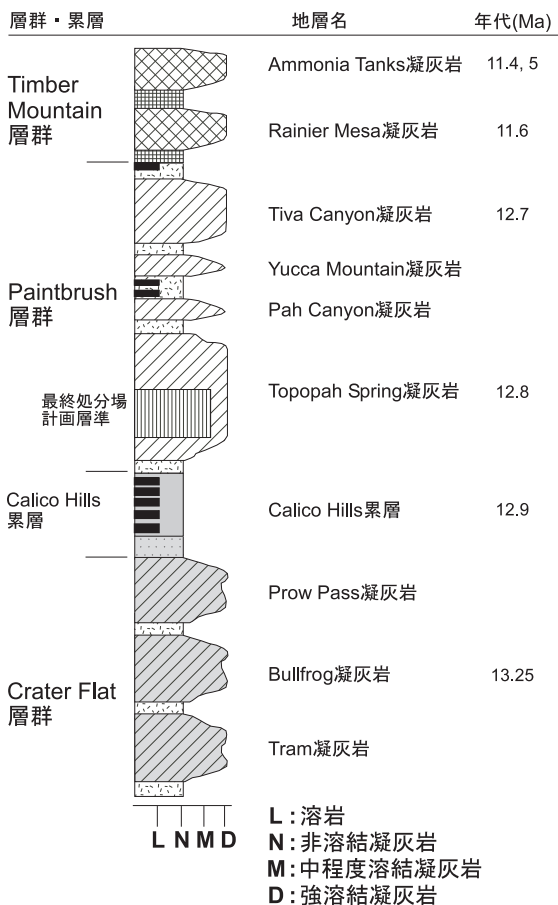


写真6 Tiva Canyon凝灰岩中の溶結凝灰岩.

テンは, 中新世(14~7Ma)に活動した南西ネバダ火山区(Southwestern Nevada volcanic field)の大規模なカルデラ火山群の南縁部に位置し(Sawyer *et al.*, 1994), それらから噴出した厚い珪長質凝灰岩類から構成される(第3図). ヤッカマウンテンを主に構成するPaintbrush層群を形成する火山岩類の少なくとも上位部層は, ヤッカマウンテン北側にあるClaim Canyonカルデラ起源であることが確認されている. この珪長質な火山活動の後, 5Ma以降に小規模な苦鉄質火山活動が開始され, 断続的に第四紀まで継続する. ヤッカマウンテン近傍にも, 鮮新世~第四紀に活動した多数の玄武岩単成火山が分布する(写真4). ヤッカマウンテンの東西に広がる平地は, 沖積層または崩積土が被覆する.

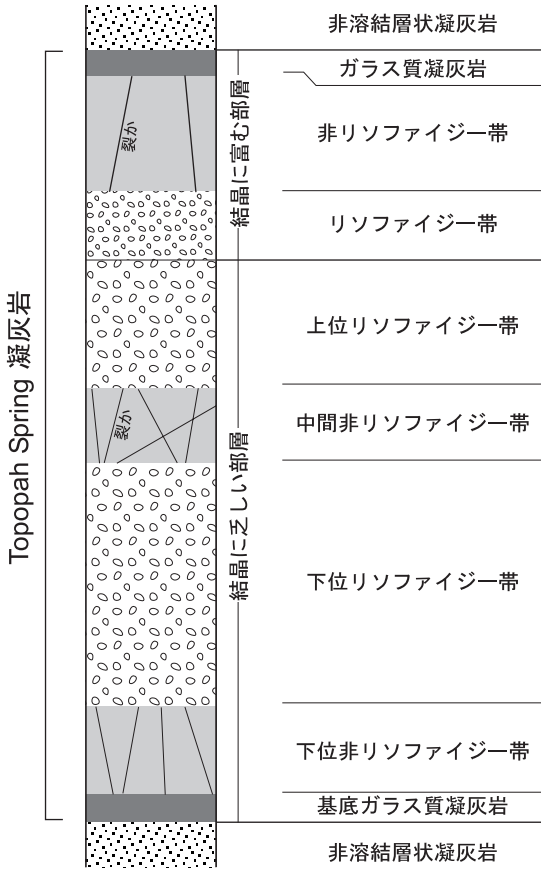


第6図 ヤッカマウンテンの基本層序. Stuckless and Dudley (2002)より引用. 年代はSawyer *et al.* (1994)による.

ヤッカマウンテン周辺には, 南北性の明瞭なりニアメントを伴う断層群および付随する小断層が多数存在する(第4・5図). これらは大部分が正断層~横ずれ断層であり, 断層に挟まれたブロックは一般に東側に傾動している(第4図). これらの断層の変位速度は, トレンチ調査などにより, 平均0.01~0.03mm/年と見積もられている(Menges *et al.*, 2004).

### 3.2 ヤッカマウンテンの層序

ヤッカマウンテンは, 下位から上位に向かってCrater Flat層群, Calico Hills累層, Paintbrush層群, Timber Mountain層群の4つに区分される(Buesch *et al.*, 1996). それぞれの層群・累層は, 短期間の火山活動によって形成されたユニットであり, 整合関係



第7図 Topopah Spring凝灰岩の模式断面図. Buesch et al. (1996)を基に作成.



写真7 Topopah Spring凝灰岩に発達するリソファイジー.



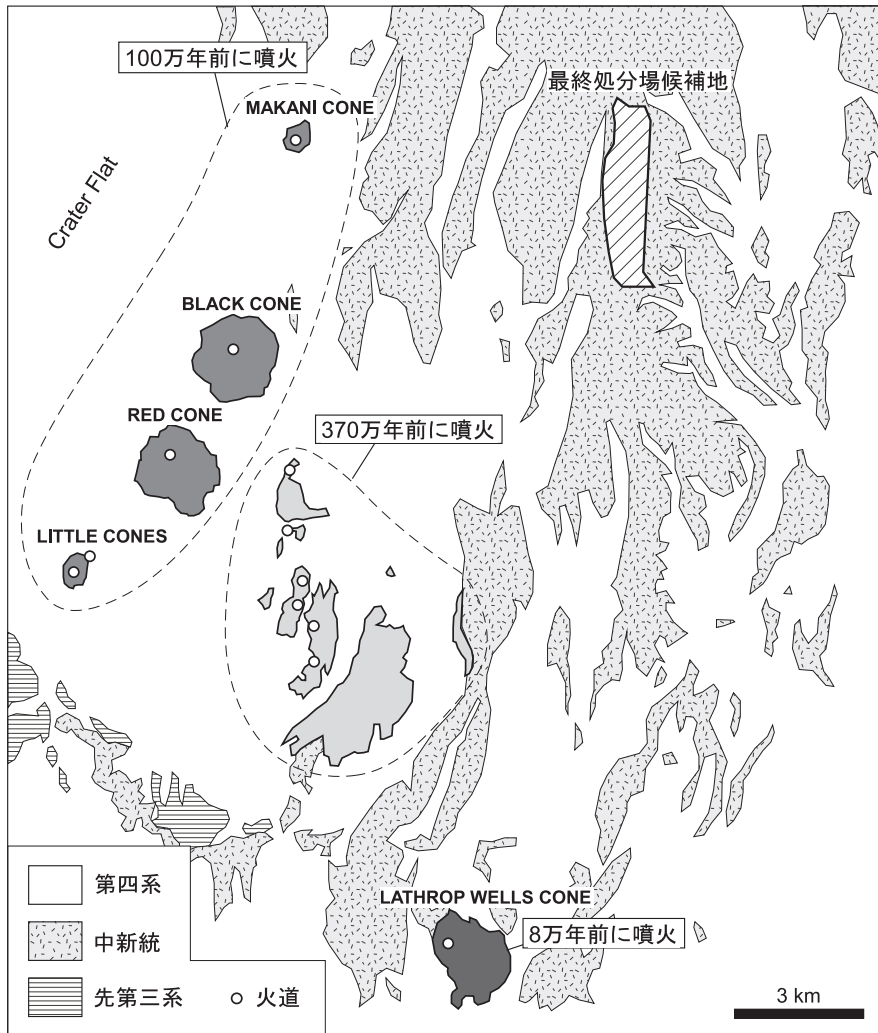
写真8 Tiva Canyon凝灰岩に発達する方解石-オパール脈(白色部). 裂かを充填しており, 非常に細粒である.

で重なる. 本地域の火山岩類は, 流紋岩とラタイト(粗面安山岩)からなる溶結凝灰岩と非溶結の層状凝灰岩が互層をなしており(写真5・6), 少量の溶岩が含まれる(第6図). これらの地層は, 全体に緩く東に傾いている. 最終処分場は, Paintbrush層群のTopopah Spring凝灰岩中に建設される計画である.

### 3.3 Topopah Spring凝灰岩

最終処分場の母岩である本層は, 最大層厚が380mを示し, 堅硬な石英ラタイト質溶結凝灰岩から構成される. 上位の結晶に富む部層と下位の結晶に乏しい部層に区分され, 岩相によりさらに8層に細分される(第7図). この細分の指標の一つに, リソファイジー(Lithophysae)と呼ばれる組織の有無・割合がある. リソファイジーとは, 凝灰岩の冷却時に初生的

に形成される中空状球類のことである(写真7). 本層のリソファイジーは, 不規則なレンズ状からチューブ状を呈し, 直径も数mm~80cmと変化に富む. 孔隙の周囲は細粒結晶からなるリムが取り巻き, 孔隙内側の表面には自形のトリディマイト, サニディン, 磁鉄鉱, 角閃石など気相から晶出した鉱物からなるコーティングがしばしば発達する. 本層には3層準のリソファイジー帯が確認されており, リソファイジーが岩石に占める体積は, 通常10%前後, 最大40%にも達する. 最終処分場は, 約80%が下位リソファイジー帯(厚さ約30m)に, 20%がそれ以外の層準に建設される計画である. Topopah Spring凝灰岩を含むヤッカマウンテンを構成する溶結凝灰岩類には, 裂かが多く発達し, しばしば方解石, オパール, 玉髄, ホタル石など



第8図 ヤッカマウンテン周辺の鮮新世～第四紀単成火山の分布. Perry *et al.* (2000) より引用 (一部簡略化).

の脈石によって充填またはコーティングされている(写真8). この脈石の成因に関する議論については6.1で述べる.

### 3.4 単成火山群

ヤッカマウンテンの西側および南側に分布する単成火山群は、3.7Ma、1Ma、0.08Maの3つ活動時期に区分される(第8図). これらの内、3.7Maの単成火山群を除く2種類については、最終処分場のリスク評価の観点から、特に詳細に調査されている. 1Maグループの4つの単成火山はいずれもシンダー・コーン

(噴石丘)であり、Crater Flatからの比高が27～140mで、溶岩ブロックなどで埋設された頂上火口とそれを取り巻くスコリア丘で構成される. 最も若いLathrop Wells Coneも比高120m程度のシンダー・コーンである. 周囲に分布する土壌の特徴やコーンの形態などから2万年より若い活動時期が見積もられたが(Wells *et al.*, 1990), Ar-Ar法による詳細な年代測定結果や他の元素の同位体比との整合性から、現在は8万年前という年代が妥当と考えられている(Heizler *et al.*, 1999).





写真9 ESF北斜坑入口。ヤッカマウンテンの現地施設は、ほとんどがこの付近に設置されている。



写真10 ESF北斜坑の内部。

#### 4. ESF (調査用坑道)

ESF (Exploratory Studies Facility)とは、ヤッカマウンテンの最終処分場としての性能を調査し評価するために1994～97年にかけて掘削された調査用坑道である(写真9)。全長は7.65kmで、北斜坑、主坑道、南斜坑の3区域から構成される(第4図)。2つの斜坑は、最終処分場の建設・操業時には搬入出坑となるように設計されており、直径が7.62mと廃棄物処分坑(直径5.5m)よりも一回り大きい(写真10)。ヤッカマウンテン付近の地下水面は、最終処分場レベルより約300m下方にあるため、ESF坑内は非常に乾燥している。斜坑・主坑道の側面およびそれらより分岐した数カ所の実験用空間(Alcove, Niche)では、水文学的、熱的、力学的試験などが現在も実施されている。また、ESF壁面で観察される全ての裂か(約45,000本)の構造、充填鉱物等はデータセット化され、各種計算に利用されている。ESFは、処分場の層準より上位のTiva Canyon凝灰岩に建設されている。しかし、処分場の母岩となるTopopah Spring凝灰岩、隣接するSolitario Canyon断層帯などでも各種調査・実験を行う必要があるため、1997～98年にかけてCross Drift(横坑直径5m)が掘削された(第4図)。Cross Driftでは、これから先2～3年間、各種試験・モニタリングが実施される予定である。

#### 5. SMF (地質試料管理施設)

##### 5.1 施設の概要

SMF (Sample Management Facility)は、ヤッカマウンテン地域の調査・研究で得られた地質試料の一元的な受領・保管・管理を行うための施設で、ネバダテストサイト内のJackass Flatsの一角に1980年代に設置された。ヤッカマウンテンの調査・研究の過程で採取された各種地質試料は、最終処分場に関わる各種許認可を行うにあたっては、法的に物的証拠となりうる。従って、SMFでは、地質試料の法的な有効性を保つために、厳格な品質保証基準に則った地質試料の取り扱い・保管・管理が行われている。本施設は、地質試料の整理・記載・処理等を行う処理棟と、21km以上の試錐コアを保管できる保管棟から構成される(写真11)。

##### 5.2 品質保証

ヤッカマウンテン地域で最終処分場計画に関わる調査・研究によって採取された地質試料は、全ての記録が永久保存されなければならない。従って、SMFに搬入された地質試料は、ただちに試料箱にバーコードが付けられ、採取位置・深度など固有情報の記録と写真撮影が行われる(写真12)。試錐コアは、SMFへ搬入直後、表面に深度ラベルおよび赤と青のラインが書き込まれ、コア箱内で試料の位置や上下



写真11 SMFの保管棟(コアライブラリー)．21km以上の試錐コアを収納できる。



写真12 SMFの処理棟内部の様子．ローラー台の上に試料箱が並べられ、作業が迅速に進められている。

が入れ替わるミスを防止している。乾燥した砂・小礫は、チップトレイやサンプル瓶で整理される。湿った試料は、乾燥を防止するために採取地点にてラッピングされる。これら一連の作業は完全にルーチン化され迅速に行われる。試料は必要に応じて外部の研究機関に提供されるが、施設外へ持ち出された試料の部分、量、所在などはSMFが常に把握している。試料が破壊試験などに供され失われる場合は、同質な参照試料の保管が義務づけられている。

## 6. ヤッカマウンテンの地質を巡る議論

ヤッカマウンテンの最終処分場としての性能や安全性が、数万年以上の長期間にわたって維持されるには、その期間、本地域に最終処分場の著しい性能低下をもたらす地質事象の発生確率が極めて低いことが条件となる。そこで、米国地質調査所、ロスアラモス国立研究所をはじめとする多くの研究機関・大学が、これまでヤッカマウンテン地域の地質事象の将来予測に取り組んできた。しかし、いかに地質を詳細に調査しても、研究者同士の解釈の違いによる不確定要素が生じることは避けられず、これまでに多くの議論が展開されている。ここでは、それらの議論の中から代表的なもの2つを簡単に紹介したい。

### 6.1 方解石-オパール脈に関する議論

Bow Ridge断層沿いのTiva Canyon凝灰岩中に掘削されたトレンチで発見された大規模な方解石-オパ

ール脈について、土壌中の炭酸塩等を溶解しつつ不飽和帯に浸透した地表水から沈殿したという土壌起源説(Taylor and Huckins, 1986)に対し、地下から地震活動に伴って湧昇した低温の熱水から沈殿したものであるという熱水起源説が主張された(Szymanski, 1987)。熱水活動が将来ヤッカマウンテンで発生した場合、最終処分場の隔離性能を著しく低下させる恐れがあることから、これらの議論を受けて、米国地質調査所では方解石-オパール脈の成因のより詳細な検討を行った。その結果、方解石-オパール脈のSr, O, C, Pb, U各同位体比は、それらの元素が土壌起源を示すことなどから、従来の土壌起源説が正しいと結論された(Taylor and Huckins, 1995)。ところが、Hill *et al.* (1995)は、方解石-オパール脈の土壌起源を示す地球化学的証拠は、地表に溢れだした熱水が地下に再浸透した際に獲得されたものであると主張した。これに対し、Stuckless *et al.* (1998)は、Hillらが多くの誤ったデータ、誤った解釈を元に議論を展開していると反論した。その後、Dublyansky *et al.* (2001)は、ESF内で採取された方解石-オパール脈中の方解石に含まれる流体包有物の形成温度が最高85℃に達することなどから、熱水起源説を再び主張した。これに対し、Whelan *et al.* (2002)は、高い形成温度を示す流体包有物の存在は最早期に形成された方解石-オパール脈に限られることから、この高い形成温度は、凝灰岩堆積後しばらくの期間における、徐冷する伏在深成岩体の存在に起因すると主張した。さらに、Neymark and Paces (2000)、Paces *et*

al. (2004)は、U系列元素を用いた微小部分年代測定による方解石-オパール脈中のオパールの成長速度の解析から、方解石-オパール脈は継続的に成長したものであり、熱水の湧昇など突発的な事象で形成されたものではないことを示した。同様に、Wilson *et al.* (2003)も、方解石-オパール脈の微小部分年代測定とC, O, H同位体組成、流体包有物の形成温度の解析などから、高い形成温度を示す流体包有物は5.32Maより古い年代の方解石-オパール脈のみに含まれ、第四紀の熱水活動を示す証拠はないことを示した。Dublyansky *et al.* (2004; 2005)は、これらの論文に反論し、1) 自形で大型の方解石・石英結晶、2) 地表近くまたは断層近傍に分布する高い形成温度の流体包有物、3) 高い塩濃度の流体包有物、4) 還元的な環境を示す流体包有物組成 (CH<sub>4</sub>の存在、 $\delta^{13}\text{C}$ の正の異常)、などは熱水起源説でなければ説明できないと主張した。これらの反論に、Whelan *et al.* (2004) およびWilson and Cline (2005)は、土壌起源説でもこれら指摘された方解石-オパール脈の特徴が矛盾なく説明できること、Dublyanskyらのデータや解釈に誤りがあることなどを回答した。方解石-オパール脈を巡る同様な議論は、水文地質学的な見地からも行われている (Marshall *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2003; Dublyansky and Smirnov, 2005などを参照)。

## 6.2 単成火山に関する議論

Wernicke *et al.* (1998)は、ヤッカマウンテン地域における1983~1997年のGPS測位データから、本地域に異常な歪みが蓄積していることを指摘した。そして、その結果から、最終処分場で生じる破壊的事象 (構造運動、火山噴火)の発生確率は、地質学的記録を基にして見積もられた従来の値より少なくとも一桁高いこと、この異常な歪みが、1Maに生じたCrater Flatの単成火山群の形成と同様、Lathrop Wells Coneの噴火に引き続く新たな単成火山群形成の予兆かもしれないこと、などを主張した。この指摘に対し、Savage (1998)は、Wernicke *et al.* (1998)の示したデータは、GPS測量に用いた基準点の不安定さに起因する誤差やLittle Skull Mountain地震 ( $M=5.4$ , 1992年6月29日発生)のGPS測量への影響の見積もりなどに問題があることを指摘した。さらに、Connor *et al.* (1998)は、仮に火山噴火の確率が一桁高いとすれば、8~13万年前から現在までに同地域に新規火山

が出現する確率が90~98%と見積もられるが、実際にはLathrop Wells Cone以降に火山活動がないこと、一般に歪みの蓄積と解放は周期的であり、過去15万年間の本地域の断層の変位量をコンパイルすると現在の歪み量が特に異常とは言えないこと、などから、従来の噴火確率を変更する必要性は認められないと反論した。

上記の議論とは別に、Smith *et al.* (2002) およびSmith and Keenan (2005)は、ヤッカマウンテン地域に分布する単成火山群のマグマ活動が、同地域より100~140km北方に位置し、噴火頻度・マグマ噴出量が1~2桁大きいReveille Range-Lunar Crater (RLC) 単成火山群のマグマ活動と成因的に密接にリンクしていること、ヤッカマウンテン周辺地域の第四系下には未調査の単成火山が多く伏在することが空中磁気探査によって示唆されていること、などから、最終処分場における破壊的事象 (火山噴火)の発生確率は米国環境保護庁の基準よりも1~2桁高いことを指摘した。これに対し、Perry *et al.* (2005)は、新たな高精度の空中磁気探査データおよび磁気異常部で行った試錐データをもとに、これまでにヤッカマウンテン周辺の第四系で確認された磁気異常のほとんどは伏在する中新世火山によるものであり、鮮新世火山の分布は極めて限定されていることを示した。そして、それらの結果に基づき、ヤッカマウンテン・RLC両単成火山群のマグマ活動が成因的にリンクしていることに否定的な見解を示した。

## 7. 日本の地層処分事業への示唆

ヤッカマウンテン地域は、人口密度の極めて低い広大な砂漠地帯の中にある。また、計画中の最終処分場は、厚い溶結凝灰岩を母岩とし、地下水面よりはるかに上の不飽和帯に位置する。日本は、年間降水量が同地域より1桁多く人口密度も高いので、最終処分場がどの地域に計画されたとしても、その環境はヤッカマウンテンとは全く異なったものになるであろう。しかし、ヤッカマウンテンの最終処分場計画は、日本の地層処分事業に、次の2点で重要な示唆を与えている。1) 最終処分場候補地に係る全ての地質データ・試料は、法的に有効なものでなければならず、厳格な品質保証基準が必要であること。すなわち、地質データ・試料は、完全性・追跡性・再現性が保証さ

れなければならないこと。2) 最終処分場候補地の安全性に係る議論は、ほとんどが著名学術誌の上で行われており、厳しいピアレビューに耐えうる高い科学水準が常に要求されていること。これらは、日本における地層処分事業でも当然要求される事項である。米国の先例を参考に、日本固有の事情も考慮しつつ、今後の地層処分事業の体制整備が望まれる。

**謝辞：**米国サウスウエスト研究所のWesley Patrick博士、Gary Walter博士、John Stamatakos博士、米国地質調査所のZell Peterman博士をはじめとするヤッカマウンテン研究チームの方々、Midwest Geoscience Groupの方々には、米国の地層処分事業に関するご教示を賜り、ヤッカマウンテン見学・資料収集の便宜を図っていただいた。深部地質環境研究センターの笹田政克センター長、月村勝宏副センター長には、粗稿を読んでいただいた。これらの方々により感謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

- Brocher, T.M., Hunter, W.C. and Langenheim, V.E. (1998) : Implications of seismic reflection and potential field geophysical data on the structural framework of the Yucca Mountain - Crater Flat region, Nevada. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 110, 947-971.
- Buesch, D.C., Spengler, R.W., Moyer, T.C. and Geslin, J.K. (1996) : Proposed stratigraphic nomenclature and microscopic identification of lithostratigraphic units of the Paintbrush group exposed at Yucca Mountain, Nevada. U.S. Geological Survey, Open-file report, 94-469, 47p.
- Connor, C.B., Stamatakos, J.A., Ferrill, D.A. and Hill, B.E. (1998) : Technical Comments: Detecting strain in the Yucca mountain area, Nevada (2). *Science*, 282, 1007b.
- Day, W.C., Dickerson, R.P., Potter, C.J., Sweetkind, D.S., San Juan, C.A., Drake, R.M.II and Fridrich, C.J. (1998) : Bedrock geologic map of the Yucca Mountain area, Nye County, Nevada. U.S. Geological Survey Investigation Series, I-2627.
- Dublyansky, Y.V. and Smirnov, S.Z. (2005) : Commentary: Assessment of past infiltration fluxes through Yucca Mountain on the basis of the secondary mineral record-is it available methodology? *Jour. Contami. Hydrol.*, 77, 209-217.
- Dublyansky, Y.V., Smirnov, S.Z. and Pashenko, S.E. (2005) : Comment on: "Origin, timing, and temperature of secondary calcite-silica mineral formation at Yucca Mountain, Nevada" by N. S. F. Wilson, J. S. Cline, and Y. V. Amelin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69, 4387-4390.
- Dublyansky, Y.V., Smirnov, S.Z. and Palyanova, G.P. (2004) : Comment on: "Physical and stable-isotope evidence for formation of secondary calcite and silica in the unsaturated zone, Yucca Mountain, Nevada" by J.F. Whelan, J.B. Paces and Z.E. Peterman. *Applied Geochem.*, 19, 1865-1877.
- Dublyansky, Y.V., Ford, D. and Reutski, V. (2001) : Traces of epigenetic hydrothermal activity at Yucca Mountain, Nevada: preliminary data on the fluid inclusion and stable isotope evidence. *Chem. Geol.*, 173, 125-149.
- Heizler, M.T., Perry, F.V., Crowe, B.M., Peters, L. and Appelt, R. (1999) : The age of Lathrop Wells volcanic center: An  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating investigation. *Jour. Geophys. Res.*, 104, B1, 767-804.
- Hill, C.A., Dublyansky, Y.V., Harmon, R.S. and Schluter, C.M. (1995) : Overview of calcite/opal deposits at or near the proposed high-level nuclear waste site, Yucca Mountain, Nevada, USA: Pedogenic, hypogene, or both? *Environmental Geology*, 26, 69-88.
- Marshall, B.D., Neymark, L.A. and Peterman, Z.E. (2003) : Estimation of past seepage volumes from calcite distribution in the Topopah Spring Tuff, Yucca Mountain, Nevada. *Jour. Contami. Hydrol.*, 62-63, 237-247.
- Menges, C.M., Taylor, E.M., Wesling, J.R., Swan, S.H., Coe, J.A., Ponti, D.J. and Whitney, J.W. (2004) : Summary of Quaternary faulting on the Paintbrush Canyon, Bow Ridge, and Stagecoach road faults. U.S. Geological Survey, Professional paper 1689, 41-63.
- Mongano, G.S., Singleton, W.L., Moyer, T.C., Beason, S.C., Eatman, G.L.W., Albin, A.L. and Lung R.C. (1999) : Geology of the ECRB Cross Drift - Exploratory Studies Facility, Yucca Mountain Project, Yucca Mountain, Nevada. Bureau of Reclamation and U.S. Geological Survey, Yucca Mountain Project technical documents. [http://www.ocrwm.doe.gov/documents/spg42gm3\\_a/index.htm](http://www.ocrwm.doe.gov/documents/spg42gm3_a/index.htm)
- 永野秀雄 (2006) : 米国における高レベル放射性廃棄物の処分と問題点-わが国の最終処分場建設地決定過程への示唆-。核兵器と国際関係，金沢工業大学国際学研究所，内外出版，233-268。
- Neymark, L.A. and Paces, J.B. (2000) : Consequences of slow growth for  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  dating of Quaternary opals, Yucca Mountain, NV, USA. *Chem. Geol.*, 164, 143-160.
- Paces, J.B., Neymark, L.A., Wooden, J.L. and Persing, H.M. (2004) : Improved spatial resolution for U-series dating of opal at Yucca Mountain, Nevada, USA, using ion-microprobe and microdigestion methods. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 66, 1591-1606.
- Perry, F.V., Cogbill, A.H. and Kelly, R.E. (2005) : Uncovering buried volcanoes at Yucca Mountain. *Eos*, 86, 485-488.
- Perry, F.V., Crowe, B.M. and Valentine, G.A. (2000) : Analyzing volcanic hazards at Yucca Mountain. *Los Alamos Sci.*, 26, 492-493.
- Savage, J.C. (1998) : Technical Comments: Detecting strain in the Yucca mountain area, Nevada (1). *Science*, 282, 1007b.
- Sawyer, D.A., Fleck, R.J., Lanphere, M.A., Warren, R.G., Broxton, D.E. and Hudson, M.R. (1994) : Episodic volcanism in the Miocene southwest Nevada volcanic field - Stratigraphic revision,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronologic framework, and implications for magmatic evolution. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 106, 1304-1314.
- Smith, E.I. and Keenan, D.L. (2005) : Yucca Mountain could face greater volcanic threat. *Eos*, 86, 317-321.
- Smith, E.I., Keenan, D.L. and Plank, T. (2002) : Episodic volcanism and hot mantle: Implications for volcanic hazard studies at the proposed nuclear waste repository at Yucca Mountain, Nevada. *GSA Today*, 12-4, 4-10.
- Stuckless, J.S. and Dudley, W.W. (2002) : The geohydrologic setting

- of Yucca Mountain, Nevada. *Applied Geochem.*, 17, 659-682.
- Stuckless, J.S., Marshall, B.D., Vaniman, D.T., Dudley, W.W., Peterman, Z.E., Paces, J.B., Whelan, J.F., Taylor, E.M., Forester, R.M. and O'Leary, D.W. (1998) : Comments on "Overview of calcite/opal deposits at or near the proposed high-level nuclear waste site, Yucca Mountain, Nevada, USA: pedogenic, hypogene, or both" by C.A. Hill, Y.V. Dublyansky, R.S. Harmon, C.M. Schluter. *Environmental Geology*, 34, 70-78.
- Szymanski, J.S. (1987) : Conceptual considerations of the Death Valley groundwater system with special emphasis on the adequacy of this system to accommodate the high-level nuclear waste repository (draft), DOE Internal Report, Yucca Mountain Project Office, Las Vegas Nevada.
- 高木哲一 (2005) : 米国ヤッカマウンテン高レベル放射性廃棄物最終処分場における安全規制について. 地質調査研究報告, 56, 147-157.
- Taylor, E.M. and Huckins, H.E. (1995) : Lithology, fault displacement, and origin of secondary calcium carbonate and opaline silica at Trenches 14 and 14D on the Bow Ridge Fault at Exile Hill, Nye County, Nevada. U.S. Geological Survey, Open-file report 93-477, 38p.
- Taylor, E.M. and Huckins, H.E. (1986) : Carbonate and opaline silica fault-filling on the Bow Ridge fault, Yucca Mountain, Nevada - Deposition from pedogenic processes or upwelling groundwater?. *Geol. Soc. Am. Abst. Program.*, 18, 418.
- U.S. Department of Energy - Office of Civilian Radioactive Waste Management (2002) : Final environmental impact statement for a geologic repository for the disposal of spent nuclear fuel and high-level radioactive waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada. DOE/EIS-0250.
- U.S. Department of Energy - Office of Civilian Radioactive Waste Management (2001) : Yucca Mountain science and engineering report. Technical information supporting site recommendation consideration. DOE/RW-0539.
- U.S. Department of Energy - Office of Civilian Radioactive Waste Management (1999) : Environmental Baseline File: Geology/Hydrology. Yucca Mountain Project technical documents, B00000000-01717-5700-00027 REV 01, DCN 1. <http://www.ocrwm.doe.gov/documents/geology/index.htm>
- Wells, S.G., McFadden, L.D., Renault, C.E. and Crowe, B.M. (1990) : Geomorphic assessment of late Quaternary volcanism in the Yucca Mountain area, southern Nevada: Implications for the proposed high-level radioactive waste repository. *Geology*, 18, 549-553.
- Wernicke, B., Davis, J.L., Bennett, R.A., Elósegui, P., Abolins, M.J., Brady, R.J., House, M.A., Niemi, N.A. and Snow, J.K. (1998) : Anomalous strain accumulation in the Yucca mountain area, Nevada. *Science*, 279, 2096-2100.
- Whelan, J.F., Paces, J.B., Peterman, Z.E., Marshall, B.D. and Neymark, L.A. (2004) : Reply to the comment on "Physical and stable-isotope evidence for formation of secondary calcite and silica in the unsaturated zone, Yucca Mountain, Nevada", by Y.V. Dublyansky, S.E. Smirnov and G.P. Palyanova. *Applied Geochem.*, 19, 1879-1889.
- Whelan, J.F., Paces, J.B., Peterman, Z.E., Marshall, B.D. and Neymark, L.A. (2002) : Physical and stable-isotope evidence for formation of secondary calcite and silica in the unsaturated zone, Yucca Mountain, Nevada. *Applied Geochem.*, 17, 735-750.
- Wilson, N.S.F. and Cline, J.S. (2005) : Reply to the Comment on "Origin, timing, and temperature of secondary calcite-silica mineral formation at Yucca Mountain, Nevada" by Y. V. Dublyansky, S. Z. Smirnov, and G. P. Palyanova. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69, 4391-4395.
- Wilson, N.S.F., Cline, J.S. and Amelin, Y.V. (2003) : Origin, timing, and temperature of secondary calcite-silica mineral formation at Yucca Mountain, Nevada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, 1145-1176.
- Xu, T., Sonnenthal, E. and Bodvarsson, G. (2003) : A reaction-transport model for calcite precipitation and evaluation of infiltration fluxes in unsaturated fractured rock. *Jour. Contami. Hydrol.*, 64, 113-127.
- 
- TAKAGI Tetsuichi (2006) : Summary of the geology of Yucca Mountain, Nevada, United States.

<受付: 2006年4月3日>