

## 日本列島の自然環境と高レベル放射性廃棄物地層処分

小 出 仁\*

KOIDE, Hitoshi (1991) Natural setting of Japanese islands and geologic disposal of high-level waste. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 42 (5), p. 235-248, 3 fig., 3 tab.

**Abstract :** The Japanese islands are a combination of arcuate islands along boundaries between four major plates : Eurasia, North America, Pacific and Philippine Sea plates. The interaction among the four plates formed complex geological structures which are basically patchworks of small blocks of land and sea-floor sediments piled up by the subduction of oceanic plates along the margin of the Eurasia continent.

Although frequent earthquakes and volcanic eruptions clearly indicate active crustal deformation, the distribution of active faults and volcanoes is localized regionally in the Japanese islands. Crustal displacement faster than 1 mm/year takes place only in restricted regions near plate boundaries or close to major active faults. Volcanic activity is absent in the region between the volcanic front and the subduction zone. The site selection is especially important in Japan.

The scenarios for the long-term performance assessment of high-level waste disposal are discussed with special reference to the geological setting of Japan. The long-term prediction of tectonic disturbance, evaluation of faults and fractures in rocks and estimation of long-term water-rock interaction are key issues in the performance assessment of the high-level waste disposal in the Japanese islands.

### 要 旨

日本列島は、四大プレートの境界沿いの弧状列島からなり、プレートの相互作用により複雑な地質構造が造られている。

頻繁な地震や火山噴火が地殻変動の活発さを示しているが、活断層や火山の分布には地域的偏りが大きい。年1 mm以上の早さの地殻変動は、プレート境界の近くや大きな活断層の近くの地域に限られる。火山前線とサブダクションゾーンの間地域には火山活動が見られない。サイト選定は特に重要であるといえる。

日本の地質環境に合わせた、高レベル放射性廃棄物地層処分の長期性能評価のためのシナリオについて議論する。日本列島における高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価には、地殻変動の長期予測、岩盤中の断層や割れ目の評価および長期の水-岩石相互作用が特に重要である。

### 1. はじめに

現在、原子力を利用している諸国で、放射性廃棄物処分のための研究開発が活発に実施されている。これらのうち、地層処分研究開発に関する先進諸国は北米大陸とヨーロッパ大陸にあり、日本列島とは地質環境がかなり

異なる。日本列島は、太平洋・ユーラシア・北米・フィリピン海の4大プレートの境界付近にあって、プレートの相互作用による地殻変動が現在も進行中である。これに対して、ヨーロッパ及び北米の大部分はプレート境界から離れた安定した大陸地殻が広がっている。

このため、「地殻変動の激しい日本では、先進諸国の地層処分研究結果は適用できない」という主張がある。しかし、日本列島も大陸諸国も、それぞれ自然環境は地域的な差が大きく、また、一概に日本列島には大陸諸国での研究結果は活用できないとするのは誤りである。しかし、また、諸外国の研究結果を無検討でそのまま日本に適用することも、当然、できない。日本列島の自然・地質環境を十分に分析し、正しく認識した上で、安全な地層処分が可能になる。ここでは日本列島の自然環境を簡単に分析した上で、地層処分の安全評価のためにはどのようなシナリオを採りあげるべきかを述べる。

### 2. 日本列島の自然環境

#### 2.1 地形・地勢

わが国の国土は、アジア大陸と太平洋の間に連なる弧状列島からなる。地形は山がちであって、広かつ平坦な土地は見られず、海岸の小平野や山間盆地に人口が集

Keywords : high-level radioactive waste, geological disposal, Japanese island, long-term stability

\*環境地質部

中する。急峻な山地が海岸までせまっている場所が多く、平地が限られていることは、地表施設の立地上の制約になる。急斜面が多いことから、侵蝕や斜面災害の危険にも注意しなければならない。ただし、地表やごく浅所の施設は斜面災害等の影響を受けても、深部の施設は安全であるので、山がちの地形でこそ、地表施設に比べて深部地下施設の安全性が発揮される。

地表施設の立地が制約されるので、施設構造の設計にフレキシビリティをもたせることも重要である。例えば、地表施設と地下施設の水平位置がかなり遠くにあった方がよい場合に、立坑よりも斜坑の方が有利なこともある。斜坑は、また、重量物の搬入のためにも有利である。

島国で、地形が複雑であることから、地表水系も地下水系も単位が小さく、広範な影響を与え難いことでは有利な面もある。周囲は海であり、広大な海底の利用が可能になれば、処分のための選択範囲が広がると共に、海底下の地層は処分に有利な特徴も有している。粘土質の遠洋堆積物は水を通し難い。

地形・地勢の特徴から、立地条件によって、処分場の性能や建設コストに極端な違いがあると予測され、サイト選定が大陸諸国以上に重要である。

## 2.2 人口・社会

人口・社会は自然環境ではないが、地層処分にとって重要なので、簡単に考察する。わが国は、人口密度が高いが、人口の偏在にも特徴がある。海岸の小平野や盆地に人口が特に集中しており、山地は比較的、人口密度が小さい。人口の集中が急速に進行している一方で、多くの地域で過疎化が進んでいる。農業では主食としての米の比重が大きく、水田が基本になっていることに注意する必要がある。地表水や地下水が集中する平野や盆地に水田が作られ、都市もそういう地域に発達する。したがって、地下水の下流側での水利用に注意が必要である。

漁業が盛んであり、過疎地ではしばしば、酪農が盛んである。さらに、最近では観光に力を入れている地方が多い。これらの産業は、風評に敏感である。放射線に敏感であり、地震・火山等の自然災害への警戒心も強い。自然災害に対しても、絶対安全であり、放射性物質の漏洩が無視しうる程度であることを国民の多くと住民に納得してもらうことが、放射性廃棄物貯蔵・処分場立地に必要である。PA(パブリックアクセプタンス)対策が特に重要であることは明らかである。

## 2.3 岩石・地質

日本列島はアジア大陸の縁にあり、太平洋プレートやフィリピン海プレートが日本列島の下に潜り込んでい

る。海洋プレートによって、大陸縁に掃き寄せられた小陸塊と海底堆積物の集合体が日本列島だともいわれている。このような形成過程から、日本の地質は寄木細工のように複雑である。

日本の地質は変化に富み、均質な巨大岩体や広域的に一律な連続性の良い地層はほとんど見られない。ただし、高レベル放射性廃棄物処分場としては、当面は面積数 $\text{km}^2$ ×厚さ数10-数100m程度の三次元的に均質な岩体があれば十分であるので、この程度の規模の岩体は数多く存在する。しかし、岩体の連続性や均質性の十分な調査が必要である。

日本列島の骨格は、中生代に形づくられており、固化した堆積岩や変成岩とそれらに貫入した主に珪長質の火成岩からなる。古第三紀の堆積岩も既にかかなり固化しているものが多い。その周囲や間を新第三紀以降のまだ軟質の堆積物が埋めている。堆積層は海成層が多く、多量の火山噴出物を含み、さらに火成岩の貫入や熱水の作用で変質され、東北日本ではグリーンタフと呼ばれる独特の凝灰岩質堆積岩層が形成されている。

火成岩類は年代の若い方が、変形等を受けていないだけ割れ目が少なく、均質で健硬である。中生代以前の古い堆積岩の多くや変成岩は固化して硬質になっているが、割れ目が多い。これらの硬質の岩石は岩盤力学では硬岩と呼ばれる。硬岩は、小さな試験片では高強度で難透水性であるが、大きなスケールの岩盤として見ると割れ目を含んでいるために、実質的な強度が低下し、止水性も低下する。硬岩は、岩石そのものの性質より、割れ目の分布や性質によって総合性能が左右されることが特徴である。新第三紀以降の若い堆積岩は固化が進んでいないので、軟質だが、粘土質の層は難透水性である。軟質の岩石を、岩盤力学では軟岩と呼ぶ。軟岩は変形しやすく、空隙が閉じやすいために、硬岩に比べて割れ目の影響が小さい。火山灰の堆積した凝灰岩層は核種の吸着性が高い。

日本には、岩塩層のような蒸発岩類は存在しないので、岩塩層を処分場母岩として選ぶことはできない。日本における処分場母岩の主な候補は、割れ目の少ない健硬な結晶質岩体(花崗岩類のような火成岩または変成岩)か、難透水性の堆積岩層(粘土質岩層)あるいは核種吸着性に秀れた均質な凝灰岩層である。岩質については、一長一短があるが、それぞれのバリア機能について、さらに詳細な研究が必要であろう。特に、風化・変質の特性についての解明が望まれる。また、断層破碎帯や深部の割れ目の特性を解明する必要がある。

海洋底下の岩石や堆積物については、処分場母岩とし

ての研究はまだあまり実施されていないが、粘土質の遠洋性堆積物は水を透し難い。また、玄武岩質の海洋性地殻は、比重が陸性地殻より高いので、上昇し難いという利点がある。

上記の各岩種の長所が生きるような組み合わせの地質構造を探し出すことができれば、有力な処分サイト候補になるであろう。

#### 2.4 気候・地下水

わが国は中緯度のモンスーン地帯にあり、多雨である。特に台風や梅雨時に雨量が多く、日本海側では冬季の豪雪がある。このような特徴から地下水も一般に豊富であり、地下水位が高く、地形が急なこともあって、地下水の流速も比較的速い。季節変動が激しいことは、地表近くの浅い地下水流には影響を与えるが、深部の地下水流への影響は小さいであろう。島国で地形が複雑なため、地下水系も細分化されているので、地下水汚染の影響範囲は小さいという利点もある。

台風等による気象災害が地下深部の処分場に直接影響を与えることはありえない。洪水の影響も防ぐのは容易である。

多雨であるため、浅所の地下水は、海岸近くを除いて淡水であるが、深部の地下水は、塩濃度が高いことが多く、時には海水以上の濃度の塩水である。一般的に、高地で地下に浸透した天水が、地下水として極めてゆっくりと地中を流れ、低地で地表に湧出する。海水は塩分濃度が高く比重が高いので、淡水に近い比重の低い地下水は海岸付近では海水に押し上げられて上昇してくるが、地下水圧が高いと海底にも地下水が湧出してくることがある。しかし、地下水の利用が盛んな地域では、地下水の汲み上げすぎにより、淡水の地下水が後退し、海水が陸域の奥の方の地下に入り込んでくる傾向がある。海水は淡水より重いので、深部程内陸へ長距離入り込み、“塩水くさび”を形成する。塩濃度の高い地下水は、通常、古い海水が長期間岩石と反応して、高い塩濃度を持ったもので、化石水(化石海水)と呼ばれる。化石水は地下深部に広く存在し、長期にわたって停滞している。天然ガスや石油の汲み上げに伴って排出される塩水も化石水であるが、天水起源の地下水との混合や岩石との反応により様々な塩濃度・組成を持つ。

化石水は、数十万-数百万年以上も地層中に閉じ込められていたものがある。塩濃度が高いので、飲料水や農業用水として使用できない。また、淡水より比重が高いので、淡水の地下水が浅所にあれば、地表近くに上昇してくる心配もない。したがって、化石水を含む地層中へ廃棄物を処分すれば、地下水によって核種が地表に運び

上げられる可能性を防げる。ただし、化石水は塩濃度が高いので、金属の腐食等、工学バリアとの反応について十分に検討する必要がある。

#### 2.5 地殻変動・地震・火山

日本は地殻変動が激しいといわれる。地震は多く、活火山も多い。しかし、地殻変動が激しいとはいっても、他国と比較しての話で、地球科学的な基準で激しいのであることに注意が必要である。例えば、隆起・沈降の速度も大部分の大陸諸国に比較して速い地域が多いが、それでも年間数mmオーダーの隆起あるいは沈降をする地域はごく限定されている。沈降地域には、これよりずっと速い速度で沈降している場所もあるが、これは人為的な地下水の汲み上げ等によるもので、ごく表層の堆積層中の現象であって、人口の多い平野や盆地内の一部に限られる。地球内部の天然の原因による真の地殻変動はきわめて遅い。日本においても大部分の地域で、隆起あるいは沈降の速さは年間1mm以下であり、年間0.1mm以下の地域も多い。このような日本列島の地殻変動の主な原動力はプレートの運動である。

太平洋プレートの動く速さは、年間約10cm程度であるが、これはプレート全体としての運動であり、処分の場合に問題になる局地的な相対変位(あるいは変形)の速度は、はるかに小さい。地震の時の活断層の変位は数mに達することがあるが、1回動くとその後1,000年以上もまったく動かないので、きわめて活動的な場合でも、多くの活断層の平均変位速度は、せいぜい年間数mm以内である。

地殻変動について要約すれば、プレート相互の相対変位は年間10cm以上に達する場合もあるが、地層処分を考慮すべきプレート内の局地的相対変位は、大部分の地域で年間1mm以下の変位速度であり、多くの地域では年間0.1mm以下である。年間数mm以上の相対変位速度をもつ地域は、プレート境界に近い特定の場所や、きわめて活発な活断層のごく近くに限られる。隆起・沈降のような上下変位だけでなく、水平変位の場合も同様である。

地殻変動はきわめて遅いので、廃棄物処分場への直接の影響はごく小さい。しかし、超長期にわたると、処分場の環境を変える可能性は無視出来ない。地殻変動の大きさは地域によって大きな違いがあるので、地域の選定が重要である。プレート境界の近くや大きな活断層のごく近くは、長期安全性上も、経済性の観点からも避けることになるであろう。

プレート運動の原動力はまだ完全には解明されていないが、地球内部の熱がエネルギー源である。しかし、巨

大なプレートのゆっくりした運動であるから、運動の状態は長期にわたって変化がないか、あるとしてもきわめて緩慢な変化である。日本列島の地殻変動も、最近の数十万年間はほぼ一定であったと考えられている。今後もかなり長期にわたって、少なくとも数千年の単位では地殻変動の大勢に大きな変化はないと考えられるが、小さな変化はありうる。数万年以上先についての地殻変動については、いろいろな角度から未来予測をする必要がある。地殻変動の大勢はプレート運動を反映しているので、プレート運動の予測が可能になれば、かなり長期の地殻変動の未来予測も可能と考えられる。

地震は活断層の活動によって発生する。地殻変動の一部であり、地殻変動の大勢が変わらなければ、長期にわたり、同じ場所で同じような地震が繰り返し発生することが知られている。何日何時に地震が発生するかというような短期予知はまだ困難であるが、どこで、どのくらいの地震が、何千年に1回くらい発生するというような長期予測はかなり正確に可能になっている。地層処分の場合はこのような長期予測で十分である。

プレート境界には、かなりひんぱんに大地震を発生する断層が多く分布している。地層処分場は地下にあって、構造的にも耐震性は十分あるので、プレート境界から離れていれば、プレート境界の巨大地震によって直接に地層処分場が大きな損害をこうむることは考えられない。ただし、1万年という長期の間には、日本列島のかなりの地域で、震度V程度の地震を100回くらいも経験すると予測される。震度Vで、処分施設の大きな損傷はありえないが、ごく小さな損傷の集積の効果により、岩盤や工学バリアの隔離性能にささかでも影響がないかというような、詳細な検討も必要であろう。

地層処分場においては、遠くの大地震よりも、むしろ近くの地震に注意が必要である。震源断層のごく近くでは、断層のズレによる変形や応力状態の変化や地震動の相乗効果により、地殻の割れ目の開口状況がわずかに変化しても、それによって地下水の流路が変化したりすることもある。地震の際に地下水の水位の変化が観測されることがある。その多くは震動による一時的なものである。地震が地下水の流れに変化を与える効果の実態やメカニズムについては解明されているとはいえない。震源の近くでは、岩盤や断層の微細なゆるみにより、透水性が増加し、その効果はわずかではあるが、地下水の流れに影響を与える可能性は考えられるので、今後、詳細な研究が必要である。

日本の火山は数多く存在し、活動も活発だが、やはり地域的な差異が大きい。日本列島における火山は、プレ

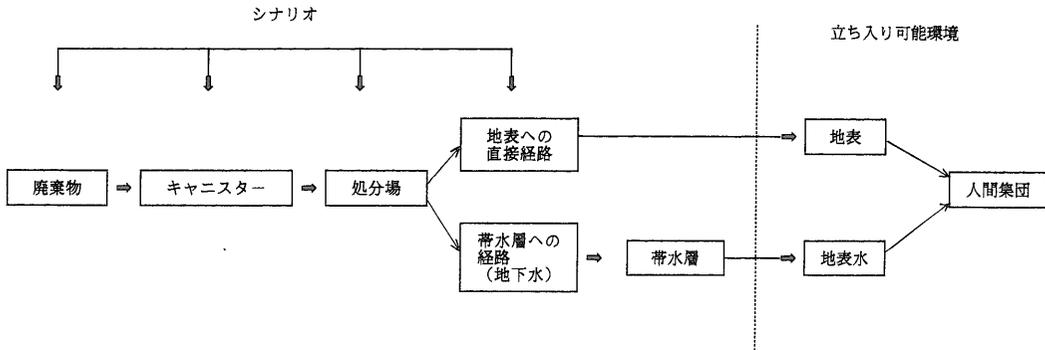
ートのもぐり込みによるもので、海洋プレートが約120 km程度以上もぐり込んだ位置にしか火山が存在しない。すなわち、「火山前線」とよばれるラインと海溝の間の、海洋プレートのもぐり込みが浅い地帯は、火山がまったく存在しない。したがって、この無火山帯では、火山活動も、地下のマグマの貫入活動も無視できる。火山前線は、プレートのもぐり込みと関連しているため、その位置も数十万年といった長期にわたってもあまり変わらない。火山活動は、火山前線の付近で急に活発になり、多数の火山が火山前線付近の陸側に列ぶが、前線から離れると火山はしだいに少なくなる。火山の多い地域は地殻変動も比較的大きく、さらに、マグマの熱源により地熱も高い地域になっている。しかし、火山前線から離れると、無火山帯側でなくても、火山活動の確率はずっと小さくなる。火山前線付近の地熱の高い火山活動の激しい地帯に処分場を置くことは避けるべきであるが、地熱分布等から火山活動の可能性があるかどうかの長期的予測は可能であろう。火山活動や地熱活動は地域的な分布が重要であり、処分場の候補地域によっては十分な検討が必要である。

## 2.6 人為的要因

人為的な影響には、意図的な妨害と無意識な行為による悪影響がある。テロや戦争のような意図的な妨害についての予測は難かしいが、地下深部への埋設は現在考えられうるものとしては、最も有効な対策といえよう。地下深部にある地層処分施設に対しては、無意識な人間の行為が影響を与える機会もきわめて少ない。通常考えられるのは、地下資源の探査や採取の影響である。

各種の地下資源の採掘や探査活動は、現在の我が国では低調であり、今後近い内に活発になることは考えられない。しかし、日本列島の各種地下資源は小規模ながら種類が豊富であり、何かの資源が再び注目される可能性がないとはいえない。現時点で注目されている資源に、金鉱床やレアメタル資源があるが、これらの存在する可能性のある地域は限られている。堆積盆地では、石油や天然ガスの採掘や探査が行われる可能性がある。堆積岩を母岩とする処分場の場合、経済的価値のある石油や天然ガス鉱床の存在の可能性がないことを確かめなければならない。いずれにせよ、地下1,000mクラスの大深度の資源開発ができるような機関は、処分場についての知識も十分にあるので、遠い将来に知識が失われた場合を除けば、実際のリスクはほとんどないであろう。

地熱エネルギーの開発は、現在重点的に進められているが、現在、利用される可能性があると考えられるのは、高い地熱活動のある地域であり、火山地域やその周辺、お



第1図 放射性廃棄物処分に関する安全評価の要素 (EPA, 1985)

Fig. 1 Components included in the safety assessment for radwaste disposal (EPA, 1985)

よび比較的若くて高温度を保っている火成岩のある地域に限られる。したがって、そのような地域を避ければ、地熱エネルギーの採取により影響を受ける可能性は少ない。

しかし、どの地域でも、程度の違いはあるが、地下深部になるほど温度が高くなる。深部に十分な地下水があると、それを温泉として利用することは広範に行われるようになってきている。最近、地域振興のため、深度1,000m以上の温泉探査用のボーリングも各地で実施されている。飲料用や農業用の地下水利用についても、もちろん注意が必要であるが、比較的深いボーリングが実施されるのは工業用水井である。地層処分場付近では、このような深いボーリングの規制が必要であるが、地下水の流量の少ない、また地熱の低い地域を選定すれば、温泉ボーリングの可能性は小さい。また、地下水が塩水化している深さでは、飲料・農業用の井戸が掘削される恐れはない。

地下空間利用も今後盛んになり、しだいに深部の開発が進むようになるだろう。しかし、地下空間利用のような大規模な開発は、資源開発と同様に知識も技術もある機関によってしか、計画・施工できない。このような機関は処分場の位置も意義も知っているため、実際には危険はないと思われる。

地下資源の可能性が少なく、資源の探査や採取によって影響を受ける危険が小さい場所の例としては、十分に冷却し、かつ割れ目も少ない大きな深成岩体の内部等が考えられる。

### 3. わが国のシナリオへのアプローチ

#### 3.1 事象の抽出とシナリオの設定

シナリオ解析とは、複雑なシステムの総合性能や安全

性を評価するための思考実験である(第1図)。芝居の筋書きと同様に、実際に発生することに似せてはいるが、実際そのままというより、効果が判りやすいような単純化された極端なシナリオが設定されることが多い。これらのシナリオに沿って、シミュレーションや実験によって、安全評価を実施するので、シナリオの選択は大変重要である。

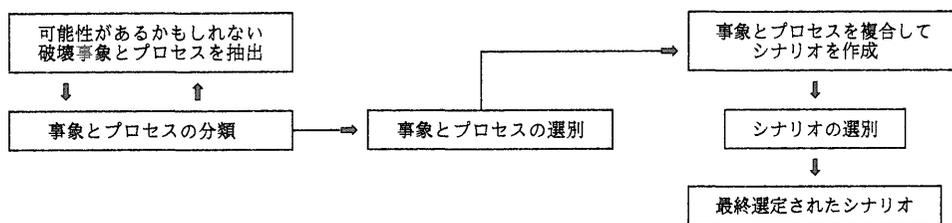
我が国は、大陸諸国に比較して地質構造が複雑で地殻変動が激しいとはいっても、実際の地殻変動はごく遅い。地層処分施設の容積も小さいので、あまり大きな岩体でなくても利用可能である。しかし、大陸諸国に比較して、地層処分の長期安全性を確保するために考慮すべき天然事象の種類は多くなりがちであり、シナリオも複雑になることはやむをえない。

我が国のシナリオ設定では、地殻変動・地震・火山に関連するシナリオが特徴的になるだろう。大陸諸国での地層処分サイトも地殻変動の可能性がないわけではないが、日本に比べれば一般に変動が小さいサイトが多いことは確かである。ただし、スウェーデンの岩盤は安定とされているが、氷河の荷重除去により地盤の隆起速度は日本より速い。また、アメリカ合衆国のネバダ州の処分候補地は、火山活動の可能性を無視できないので、その評価が行われている。

地球科学における専門分野の細分化は、最近特に著しい。見落としをなくすためには、様々な分野の専門家を集め、システムティックに関連事象の抽出とシナリオの設定を実施する必要がある(第2図、第1表)。

#### 3.2 未来予測と評価期間

安全評価の対象期間の長さについては、様々な議論がある。評価しなければならない対象期間と評価可能な期間は異なる。評価可能な期間は、評価の対象になる事象



第2図 シナリオの開発と選定法 (Cranwell *et al.*, 1982)

Fig. 2 Scenario development and screening methodology (Cranwell *et al.*, 1982)

第1表 処分後の漏出シナリオに係わる天然事象(及び主な対策) (小出, 1990)

Table 1 Natural phenomena related to release scenarios after disposal (with main countermeasures) (Koide, 1990)

<ul style="list-style-type: none"> <li>○隕石・すい星の衝突(深く埋設)</li> <li>○侵食による露出(深く埋設)                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・海水準低下</li> <li>・地殻の隆起</li> <li>・水河侵食</li> <li>・崩落・地すべり</li> <li>・岩屑流・泥流</li> <li>・火山噴出物の影響</li> <li>・洪水</li> </ul> </li> <li>○地殻変動による破壊 (地殻変動の予測)                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・マグマ貫入・水蒸気爆発</li> <li>・角礫岩脈・角礫パイプ形成</li> <li>・ダイアピル(岩塩等)</li> <li>・流体圧破碎</li> <li>・開口性割れ目形成</li> <li>・断層破碎帯形成</li> <li>・褶曲・キンクバンド形成</li> <li>・液状化</li> <li>・クリープ変形</li> <li>・解放割れ目形成</li> <li>・地震動の影響</li> </ul> </li> <li>○岩質変化(変化範囲の予測)                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・風化</li> <li>・変質</li> <li>・圧密</li> <li>・続成作用</li> <li>・溶脱</li> <li>・水・岩石反応</li> <li>・相変化</li> <li>・微生物</li> <li>・有機物</li> <li>・硫化物</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○地下水による移行 (移行メカニズムの解明)                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水流の変化</li> <li>・隆起・沈降による水流変化</li> <li>・海水準変動による水流変化</li> <li>・地震による水流変化</li> <li>・気候変化の影響</li> <li>・天水・海水の浸入</li> <li>・塩水の浸入</li> <li>・酸性水の浸入</li> <li>・汚染水の浸入</li> <li>・熱水の浸入</li> <li>・火成活動・地熱</li> <li>・その他の地下水性状変化</li> <li>・ガスの浸入</li> <li>・圧密脱水</li> <li>・クラックによる透水性増加</li> </ul> </li> <li>○検知されなかった欠陥 (非破壊調査技術の開発)                     <ul style="list-style-type: none"> <li>・断層・破碎帯</li> <li>・不整合面・岩質不連続面</li> <li>・岩脈</li> <li>・層理・節理</li> <li>・空洞</li> <li>・水路チャンネル</li> <li>・砂層等の透水性地層</li> <li>・異常高圧層・未固結層</li> <li>・風化・変質ゾーン</li> <li>・有用資源</li> <li>・有害な化学成分を持つ岩体・鉱床</li> <li>・ガス・塩水・酸性水ポケット</li> <li>・高温岩体・マグマ溜り</li> </ul> </li> </ul>
---	--

放射性廃棄物処分	地球環境予測		地震・噴火予知	天気予報
高レベル	長期予測	10万年	長期予知	凡 例 □ ほぼ実用化 □ 実用化
中レベル		1万年		
低レベル	中期予測	千年	中期予知	長期予報 □ 中期予報 □ 短期予報
		百年		
	短期予測	十年	短期予知	□ 短期予報
		一年		
		一月	直前予知	
		一日		
		一時間		

第3図 地球技術における未来予測  
Fig. 3 Prediction in geotechnology.

や評価の程度によって異なるし、また科学技術のレベルによっても変わってくる。さらに、科学的に可能な期間と実用上評価できる期間も異なる。他方、評価しなければならぬ期間は、放射性核種の壊変による廃棄物の放射能の低下と許容被曝線量を考慮して定めなければならない。實際上、長期未来まで細部の数値まで定量的に評価する必要はなく、ある程度以上の超長期(例えば1万年以上)は、影響の大きい事象のみを定性的に評価すれば十分であろう。必要評価期間は、評価の実施過程で、決めるべきものと考えた方がよい。

実際問題として、予測モデルを設定し定常的と仮定すれば、計算上はいくらでも長い予測結果を出すことができる。もちろん、計算誤差の累積やモデルの精度の問題等により、長期になるほど予測の信頼性が低下するが、そのような問題は今後の研究により克服されていくであろう。しかし、事象やプロセスの不確実性がどの程度であるかを評価することが、長期予測の根本課題である。

長期の予測に関しては、人為的事象より、天然事象の方がはるかに正確な予測が可能である。数百年以上先の人間社会の変化を予測するのは難しい。また、人間の造った物で最も長期に耐久性が確かめられるものでも、せいぜい数千年である。近代技術の産物は、造られてからせいぜい数十年くらいしか経過していない。しかし、

地球にとっては数万年でもごく短期間であり、人為的な改変が加えられない限り、自然原因による変動幅はあまり大きくないと考えられる。地下深部には人為的な改変も比較的加えられ難いので、今後の研究開発によって予測期間における天然事象の不確実性による変動幅を知ることができるようになれば、不確実性の変動幅に対応した範囲の実用精度で、地層処分の安全性を確保するための長期予測が、可能になると期待される(第3図)。

地層処分場の安全評価は安全性を確認することが目的である。したがって、安全性を確認できるだけの精度があれば十分といえる。ただし、予測精度が悪ければ、それだけ安全裕度を十分にとらなければならないので、処分施設の設計がその分オーバースペックになる。逆にいえば、長期にわたって高精度の予測が可能になれば、処分施設の設計はしやすくなる。1万年程度の安全評価を確実に実施し、それ以上の長期については可能な限り評価するという考え方が多く見られる。例えば、米国では環境庁の設定した基準(40CFR Part 191)では、評価期間は1万年であるが、処分実施側のエネルギー省は、安全側をとって、気候サイクルや地下水文学的プロセスや地球化学的プロセスで十万年、侵蝕による直接露出については百万年というような努力目標(10CFR Part 960)を設定している。

第2表 性能評価のためのシナリオの種類  
Table 2 Types of scenarios for performance assessment.

- 
1. 通(正)常シナリオ: もっともありそうなシナリオ。  
核種がほとんど出てこない。
  2. 基本シナリオ: 性能評価の基本となるシナリオ。  
例えば, 工学バリアの全部ないし一部をないとして仮定する。  
通常は, 「地下水移行シナリオ」を考慮。
  3. 変動シナリオ: 基本シナリオ(地下水移行シナリオ)に, 何かの変動を与えるようなシナリオ。  
「海水準変動シナリオ」等。
  4. 異常シナリオ: 異常事象が発生して, 基本シナリオと異なるプロセスが生じる。  
「直接放出シナリオ」等。
- 

### 3.3 基本シナリオ

わが国では, 高レベル放射性廃棄物処分場の建設される深地下は, すべて地下水面下にあるので, 量の多少はあるが, 母岩中に地下水は必ず存在する。したがって, 工学バリアにほぼ完全に守られている初めの1,000年程度を除けば, 核種が地下水中に少量溶出する可能性は, 高いと想定して評価しなければならない。そのため, 地下水移行シナリオを通常シナリオとすることが多い。実際のシナリオ解析では, 通常シナリオのうち, 単純かつ明確な「基本シナリオ」を設定し, 他を「その他のシナリオ」とする。「その他のシナリオ」のなかでも, 処分後の環境変化を考慮したシナリオは「変動シナリオ」と呼ばれる(第2表)。

処分施設は現在の地質環境を可能な限り乱さないように建設される。したがって, 処分後ある程度の期間を過ぎれば元の天然の地質環境に近い状態に戻ると仮定した地下水移行シナリオを, 基本シナリオとすることが多い。もちろん, 処分場掘削の影響を考慮にいれてモデルを設定することもできる。

地下水移行シナリオでは, 地下水流をモデル化し, さらに地下水と廃棄物および地下水と岩盤との化学的相互作用, 特に, 核種の溶出と吸着について評価する。さらに移行中の核種の壊変や生物環境に出た時の影響評価を行う必要がある。地下水移行シナリオについては, 決定論的なシミュレーション・モデルで評価されることになる。地下水移行シナリオにおける影響評価モデルの精度の向上が, 地層処分システムの信頼性を高める基本になる。

地下の岩盤中の地下水流のシミュレーション・モデルはいくつも開発されている。地下水流のシミュレーション・

モデルは実用的なレベルに達しているが, 信頼性の上ではまだ問題がある。特に結晶質岩中の地下水流は, 主に割れ目等を通るチャンネル流であるが, チャンネル流のシミュレーションはまだ実用化されていない。岩盤中の断層・割れ目・不均質性の形状を三次元的に探索し, 正確にモデル化できる技術を開発しなければならない。また地下水と岩盤の相互作用について理解を深める必要がある。

### 3.4 変動シナリオ

地下深部の環境は, 地上に比較して, その変化はきわめて遅いが, それでも長期間には変化する。基本シナリオに, 処分後の環境変化の要素を加味して修正を加えたものを変動シナリオとする。

前節の基本シナリオでは, 天然環境に変化はないとしたが, 数千年後とか数万年後にはむしろ若干の変化はある方が普通であろう。例えば, 処分場の位置で, もし過去数万年以上の間, 年平均 0.1 mm の隆起があったとすれば, 今後も相当期間年平均 0.1 mm 程度の隆起が続くと予想すべきであろう。このように, もっとも可能性が高いと予測される変化を組み込んだシナリオを正常変化シナリオと呼ぶ。正常変化シナリオの中には, 正常な処分場建設の影響も組み込まれるべきであろう。

これに対して, 必ずしも予期しない変化による基本シナリオへの影響を評価するのが, 狭義の変動シナリオである。ただし, 実際問題としては, 地質環境の変化はないと仮定して基本シナリオを設定し, 環境変化の影響はすべて変動シナリオと考える方が理解しやすい。

変動シナリオは, 基本シナリオである地下水移行シナリオの変種であるから, 直接露出や空中放出のようなケースを含む異常シナリオと比較して, 生物圏への影響の

第3表 シナリオの分析  
Table 3 Analysis of scenarios.

影響	確 率	
	大(ほぼ確実)	小(ほぼ発生しない)
大	処分場の設計を適切にして防止	定量的に議論する必要がある
小	影響を評価(基本シナリオ)	定性的検討

程度は小さい。しかし、発生の可能性が比較的高いシナリオはすべて変動シナリオに含まれる。例えば、地震による影響により、処分場が大きな破壊をうける可能性はなく、せいぜい岩盤や工学バリアの小さな損傷により地下水が少し通りやすくなる程度であるので、地震による影響も変動シナリオに含まれる。

変動シナリオの例としては、海水準変動や気候変動による地下水流の変化、地殻変動・地震による地下水流の変化、井戸取水等の人為的影響による地下水流の変化、塩水化や酸性化等の地下水化学変化、火山・地熱による熱的变化等がある。

変動の発生する可能性を確率によって評価する方法と最大変動幅によって安全側を採用する方法がある。事象によって両方法の優劣は異なるので、両方法の合理的な組み合わせを考える必要がある。

### 3.5 異常シナリオ

異常シナリオは、基本シナリオである地下水移行の過程を経ないもので、廃棄物の直接露出や核種の空中放出のようなカストロフィックなプロセスが主役になる(第2表)。典型的な異常シナリオは、隕石・彗星の衝突である。隕石が地上の物体に衝突する確率は決してゼロではないが、きわめて小さな確率でしかない。地下深部にまで影響を与えるような巨大な隕石が、ちょうど処分場に衝突するような確率は極端に小さい。

処分場にマグマが貫入し、それが地表に噴出するという確率もきわめて小さい。地下1,000mの深さに埋没すれば、たとえ年間1mmの地殻隆起が続いても、廃棄物が直接露出するには100万年はかかる。直接露出しない程度の隆起であれば、変動シナリオとして扱うことができる。

異常シナリオはきわめて確率は小さいが、影響は大きい(第3表)。このため、心理的不安の種になりやすい。このような特性から、たとえ確率は小さくても、事象の生起確率の評価は実施する必要がある。

戦争・テロ・資源採取も異常シナリオであるが、やはり地下深部へ埋設すれば危険度はきわめて小さくなる。

### 3.6 我が国がとりあげるべきシナリオの候補

一般に日本の国土の特徴とされていることに対応して、適切なシナリオを考慮して、安全評価をしなければならない。ここでは、我が国で考慮すべきシナリオを提案する。ここでとりあげる日本の特徴は、ごく一般的な傾向を示すので、日本の内でも、地域によっては必ずしもあてはまらないことがある。そのような地域が処分サイトとして特定された場合は、そこであげられたシナリオは必ずしも検討する必要がないことになろう。また、現在は定性的な検討が始められたばかりの段階であるので、どのシナリオを定量的に検討するべきかを判断するには、時期尚早と思われる。したがって、以下のシナリオは、少なくとも定性的な検討をするべきシナリオの候補であり、そのすべてを定量的に検討する必要は必ずしもないであろう。

(1) 国土が狭く、人口が多いことに対応するシナリオ：

高レベル地層処分場は広い面積を必要としないので、国土が狭いことは、シナリオの選択に、直接には問題ではない。しかし、サイト選定にあたって、選択の範囲は狭くなるという点で、広大な国土を持つ国に比べて、困難は大きくなる。しかし、ベルギーやスイス等は日本よりはるかに国土が狭い。国土の狭いことは必ずしも本質的な困難とはいえない。

人口が多いことは、人間活動により一層注意する必要がある。例えば、サイトによっては、井戸取水シナリオや資源探査等のためのボーリング・シナリオを考慮する必要がある。地層処分場を貫通するボーリングを考慮するシナリオも、外国では取り上げられている。しかし、人工的な障壁を設置して、処分場内へのボーリングを防ぐ方法が考えられる。このように、ボーリングや井戸の掘削を防ぐ手段が講じられれば、処分場内へのボーリン

グの貫通などという極端なシナリオは考慮する必要がないと考えられる。ただし、ボーリングが処分場に直達しなくても、地下水の新しい流路が作られ、地下水移行に影響を与えるかもしれない。また、井戸水の取水が行われ、生活用水や工業用水として使われる可能性があるれば、それに対する配慮が必要である。これらは、通常シナリオである地下水移行シナリオの変種、すなわち、変動シナリオといえる。

(2) 島国であることに対応するシナリオ：

大陸の乾燥地域のような内陸水系は存在せず、地下深部のトラップされた水の他は、究極的には海へ排水されることになる。海への距離が近いと、海面変動の影響を受けて地下水の流動状況が変化する可能性があり、海面変動シナリオの検討が必要になる。海面の相対的変動は地盤の隆起・沈降によっても生じるが、このケースは5)で考える。気候の変動によって、水河が拡大したり、溶融することにより、海水準が変動する。水河期がくると海水準は数10-数100m以上低下しうるし、気候が温暖化して水河が完全に溶融すれば、現在より30m程度海水準が上昇する可能性がある。このような気候変動は数1,000年-数10,000年で生じうるが、人為的な温室効果による温暖化があれば、もっと早い時期にくるかもしれない。温暖化による海水準上昇は、それだけ、土地が沈降した場合と同等な効果を与える。海面変動シナリオは、地盤隆起・沈降シナリオと同等な効果を与えるが、海面変動の原因である気候変動による降水量や蒸発散量の変化の影響は別に考慮する必要がある。

地下深部では、海水起源の地下水が存在していることが多い。内陸部でも、海水起源の地下水が存在する。このような「化石海水」は、地下水がほとんど動いていない証拠でもあるので、岩盤の隔離性能の証明にもなる。また、塩水は、人間に利用されることがほとんどなく、飲用に使われることはない。さらに、比重が大きいために上昇し難い等の利点がある。他方、塩水といっても、岩石との永年の相互反応によって、元の海水とは成分もかなり変わり、様々の組成のものがある。化学的性質によっては、特にキャニスターの腐食などを検討しなければならない。したがって、処分場の環境によっては、地下水の化学成分や密度を考慮し、地下水移行シナリオを評価する塩水シナリオの検討が必要である。この塩水シナリオの場合は、前述の井戸取水は考慮しなくてもよいことになる。

(3) 雨が多く、地下水位が高いことに対応するシナリオ：

深地層処分の場合は、地下水面に当然位置するの

で、地下水位の高低に関わらず、通常シナリオの地下水移行シナリオで十分カバーできる。雨量や気温が変化すると、地表水・地下水の流れに影響を与える。前述のように、気候変動は比較的短時間で生じ、人間活動の影響も無視できなくなっている。このため、気候変動シナリオはあるものとして解析しなければならないが、可能な気候変動の大きさから考えて、例えば、多少の雨量の増加があっても、深部の地下水流入の影響はあまり大きくはないであろう。また、台風等のために洪水や地すべりが発生し、異常な急速侵蝕がおきても、地下深部の処分場に対しては間接的影響に留まる。

(4) 地形が急峻であることに対するシナリオ：

地形が急峻なため、侵蝕が速く、地下水流速も一般に大きいという傾向がある。地下水流については、地下水移行シナリオで扱えるが、特に広域的な地下水流についても十分に検討する必要がある。侵蝕については、特に難透水層の欠損等が生じた時に、地下水移行シナリオに影響を与える可能性がある。したがって、侵蝕シナリオについて考慮する必要がある。侵蝕シナリオも通常は地下水流の変化が主要な影響であるから、基本シナリオの若干の変化要因になるにすぎない。処分場が浅くて、直接露出の可能性があれば、異常シナリオの一種になるが、実際の深度処分場が、直接露出に至るにはきわめて長期間を要するので、廃棄物の放射能は十分に低減しているであろう。逆に、低地では堆積速度が速いので、堆積埋没シナリオも考えなければならない場合があるが、このシナリオは廃棄物の隔離にはむしろよい影響を与えるであろう。

固結度の低い堆積岩では、埋没により圧力や温度が大きくなると圧密・続成作用がおき、物性が変化し、水やガスの分離が生じうる。このような変化はきわめてゆるやかではあるが、軟質の堆積岩の場合は検討が必要である。

(5) 地殻変動が激しいことに対するシナリオ：

地域的に地殻変動の速さはかなりの違いがあるが、一般的傾向として、大陸諸国に比較して変動が大きいことは否定できない。このため、地盤隆起・沈降シナリオ、岩盤変形シナリオ、岩盤応力変動シナリオについて検討する必要がある。地盤隆起・沈降は海面に対する相対的变化が問題なので、前述のように、地熱変動によるものと、海水準の変動による場合とがある。海水準に比較して、地盤が隆起すれば、侵蝕が加速されることになる。このため、地下水流に変化がおきる可能性がある。地盤隆起シナリオは侵蝕シナリオにほぼ帰着する。隆起がきわめて大きいと、処分場が直接露出することも考えられ

ているが、深地層処分では、直接露出に至るためには、きわめて長年月を要することは明らかである。しかし、直接露出した場合には影響が大きいので、米国DOEでは100万年後までの検討をしている。

地盤沈降は、やはり地下水流系に影響する。地盤隆起・沈降が一樣に生じず、地層の変形がある場合には岩盤変形シナリオになる。処分場掘削のような人為的理由によって岩盤変形が生じる可能性もある。岩盤変形によって、地層の形が変わったり、割れ目ゾーンが生じると、地下水流に影響を与える。岩盤変形のために処分場自体が変形することも理論的には考えておかなければならない。自然現象としての岩盤変形はきわめて遅く、変位も小さいので、工学バリアで対処できると考えられるが、検討は必要であろう。

岩盤応力変動の原因としては、テクトニックな応力変動(プレートの動きの変化や造山・造陸運動のため)や、侵蝕による荷重除去、水河荷重、人為的原因がある。水河荷重の影響は日本ではあまり考えなくてもよい。処分場建設そのものが岩盤応力変化の原因になりうる。岩盤応力変動によって処分場に大きな破壊が発生する可能性は小さいが、割れ目形成によって地下水移行に多少の影響があることは検討しておかなければならない。したがって、岩盤応力変動シナリオも基本シナリオの若干の変動要因と考える方がよいであろう。

(6) 岩盤は断層や割れ目が多いことに対応するシナリオ：

地殻変動が激しいために、割れ目や断層の密度が高い傾向がある。通常、割れ目沿いに透水性が高いが、日本の断層は粘土化されているケースが多く、この場合はむしろ難透水性になる。地下深部の断層・割れ目の性状については、今後解明が必要なことが多い。

通常シナリオの一種といえるが、割れ目系岩盤地下水移行シナリオが、特に結晶質岩盤の場合に重要である。地下水移行における孔隙媒体中の浸透流については、かなりの精度でモデル化が可能になっているが、割れ目中の地下水流についてはまだ十分な解明ができていない。それは、地下深部における割れ目や断層の状態が解明されていないためと、割れ目内の流れが不規則なチャンネル流であるためにモデル化の方法が確立されていないためである。岩盤内の割れ目の評価法については、まだ、かなりの基礎研究を必要とする。

(7) 活断層が多いことに対するシナリオ：

断層変位シナリオ、断層形成シナリオの検討が必要である。

断層変位シナリオとは、断層のずれによって地層のく

いちがいが生じて、地下水流に影響を与えたり、あるいは、処分施設を変形させるような場合である。したがって、岩盤変形シナリオに似ている。断層形成シナリオとは、新しい断層が生じたり、断層が成長したり、古い断層が開いたりする現象である。確率は小さいが地下水移行への影響が大きい。実際には、活断層のごく近くのような特殊な地域以外では、断層変位や断層形成の可能性は事実上少ないが、一般に地殻変動が激しいといわれる日本では、この両シナリオは、ある程度、注意深く検討する必要がある。

(8) 地震が多いことに対するシナリオ：

地層処分施設は地震には十分耐久性があるが、一般の関心を集めやすいことであるので、地震シナリオについても、検討する必要がある。地震の影響は、処分場が操業中で空洞が存在している場合と、空洞を完全に充填した後とは異なる。操業中は、通常の地下空洞の場合と基本的には同じであるが、地下における地震動の伝播特性の解明が重要である。空洞を充填した後に、地震によって処分施設の破壊が生じる可能性は小さいが、地下の処分場に強い地震動が加わった時に、工学バリアや天然バリアにどのような影響があるかについて詳細な検討が必要である。特に、地震動によって、岩盤中に割れ目が生じたり、断層・節理の開口が生じたりする可能性は小さいが、万全を期するためには、小さな割れ目が生じた時の地下水の移行への影響を調べる必要がある。

(9) 火山・温泉・地熱活動があることに対するシナリオ：

地下の処分場へのマグマ貫入の確率はきわめて小さいが、大規模噴火が侵蝕の速さに影響することがある。火山の可能性のあるサイトでは検討の必要があるだろう。

火山活動やマグマの活動が直接に深部処分場に影響する可能性はほとんどないが、新しい火成岩の熱等による温泉・地熱活動の影響は、間接的ではあるが、広い範囲に及ぶので、注意する必要がある。

大規模噴火によって、地層処分場が、直接被害をうける可能性はごく小さいが、火砕流等による侵蝕や降灰による地表の荒廃のために急速侵蝕がおきることがある。この場合は大規模噴火シナリオは侵蝕シナリオに帰着する。

マグマが処分場に直接貫入すれば、処分場が破壊され、その結果、放射性核種が地下水へ急速に浸出されるのが、マグマ貫入シナリオである。処分場へ貫入したマグマが、さらに、地表まで到達して、噴出すれば、放射性核種が直接放出され、マグマ貫入噴出シナリオとなる。処分場へのマグマの直接貫入は、このように著しい

効果をもたらすが、その発生確率はごく小さいであろう。

マグマが、直接に処分場に入らずに、近くへ貫入すれば、地下水へ影響を与える。また、ドームやカルデラやグラベン等の構造を造り、断層形成や岩盤変形による影響を与える可能性についても検討の必要はある。

現在あるいは過去の火山・潜火山活動の間接的な影響として、熱水や温泉水の侵入がある。熱水や温泉水は、温度を上げる効果の他に、その化学的性状によっては、浸出速度を速める可能性もあるので、熱水シナリオについて多角的な検討の必要がある。マグマ貫入シナリオ、マグマ貫入噴出シナリオ、熱水シナリオは、日本では検討の必要があるが、火山活動地域や地熱地域を避けることにより、発生確率を低くすることがもっとも重要な対策になるであろう。

(10) 地質が複雑で、大きな均質な岩体が見出し難いことに対するシナリオ：

処分場母岩として、必要な体積はあまり大きくないが、地質が複雑なことは、処分場の設計を難しくする。この対策としては、精密な非破壊的三次元地質調査法の開発が重要になる。特に、断層や岩脈、あるいは粘土岩中の砂質層の夾み等が、地下水の通路になりやすい。逆に、断層粘土帯が地下水の流れをさえぎることもある。

シナリオとしては、未検出の欠陥が、性能評価にどの程度の影響を与えるかを調べる未検出欠陥シナリオの検討が望ましい。未検出欠陥シナリオでは、採用されている調査法によって見逃す可能性のあるもっとも影響の大きい欠陥の存在を仮定して、性能評価をする。調査法の進歩によって、小さな欠陥まで検出できるようになれば、天然バリアの隔離性能の評価も改善されることになる。

(11) 岩盤の風化・変質が著しいことに対するシナリオ：

外国でも、一部には、日本より風化・変質が著しい地域も多数あるが、気候・熱水・地殻変動の影響のために、風化・変質の進んでいる岩盤は、日本に広く分布している。ただし、風化・変質された岩盤は取着性に秀れていることもあり、地層処分に適さないとは必ずしも言えない。しかし、風化・変質岩は不均質であることが多く、性状が複雑である。風化・変質岩の特性の研究と共に、処分後の岩盤の風化・変質の影響を調べる風化・変質シナリオの検討が望ましい。

以上の結果をまとめると、日本の自然環境からみて、

定性的な検討の対象として、とりあげるべきシナリオの候補として、同種のものをまとめて再整理してみると以下のようなシナリオが抽出される。

- 1) 基本シナリオ
  - ・地下水移行シナリオ
- 2) 変動シナリオ
  - ・井戸取水-ポーリングシナリオ
  - ・気候変動-海面変動シナリオ
  - ・塩水シナリオ
  - ・地盤隆起-侵蝕シナリオ
  - ・地盤沈降-堆積埋没シナリオ
  - ・岩盤応力変動-岩盤変形シナリオ
  - ・断層形成-断層変位シナリオ
  - ・地震シナリオ
  - ・大規模噴火シナリオ
  - ・マグマ貫入-熱水シナリオ
  - ・割れ目系岩盤地下水移行シナリオ
  - ・未検出欠陥シナリオ
  - ・風化・変質シナリオ
- 3) 異常シナリオ
  - ・隆起シナリオ(直接露出に至るもの)
  - ・マグマ貫入噴出シナリオ

これらのシナリオは、定性的な検討の必要があるものを列挙したもので、地域や母岩の性質によって、重要度が大幅に異なり、処分サイトが限定されてくれば、いくつかのシナリオは無視しうるのであろうし、他方、いくつかのシナリオについては詳細な定量的評価を加える必要が出てくるであろう。以上のシナリオの分析をまとめると、日本では特に地殻変動に関連するシナリオを重視する必要がある。地層処分の安全性を確認するためには、地殻変動の未来予測が日本にとって重要な課題であると考えられる。それに続いて、過去の地殻変動で生じた大小の割れ目・断層の評価が重要で、火山・地熱活動による熱水の間接的影響にも注意しなければならない。

#### 4. 研究開発の進め方

##### 4.1. 我が国での地層処分の立地可能性を示すために

世界においてはもちろん、日本列島の中でも、場所によって自然環境はかなり異なる。したがって、個々のサイトの比較では、必ずしも我が国のサイトの方が他国より条件が悪いとは限らない。しかし、一般的な比較としては、我が国は自然環境でも社会環境でも、広い国土を持つ大陸諸国に比較して、厳しい条件にあるということとは否定できない。したがって、諸外国より以上に、我が国は地層処分の安全確保のために努力する必要がある。

我が国の地質環境は、大陸ではなく、島弧(弧状列島)に位置づけられている。一般に、島弧は大陸より地殻変動が激しく、地震・火山の活動もある。原子力発電を実施している国々のほとんどは大陸に位置し、我が国と同じ島弧に位置する原子力発電国は台湾のみである。

したがって、島弧地域における地層処分の可能性を示すことは、我が国自身が実施しなければならない。もちろん、大陸諸国で開発された技術や調査結果もまったく活用できないわけではないが、我が国の環境に合わせた配慮が必要である。

我が国での地層処分の可能性を示すためには、まず、基本シナリオである地下水移行シナリオについて、我が国の環境にあったモデルを構築し、そのモデルによっても十分に安全であることを示す必要がある。そのためには、わが国の深部地下水の状態を調査する必要がある。

日本列島の中でも地質環境は様々であるので、地下水の状態も異なってくる。処分の可能性も地域区分ごとに示す必要がある。そのため、様々な地域で深部地質環境・深部地下水環境の実測データを収集する必要がある。

しかし、日本における地層処分の安全性を論じる時に、一般の人々がもっとも懸念を持つのは地殻変動の問題である。前述のように、比較としては日本は地殻変動は激しいが、絶対的な変動量は小さいと専門家は考えるが、地震・火山等のドラスティックな現象を見る機会の多い日本人が懸念を持つのはやむをえない。このような懸念に答えるためには、次節に述べる長期安全性の検証が重要である。

#### 4.2. 長期安全性の検証のために

日本列島は一般に地殻変動が激しいということから、変動シナリオや異常シナリオの検討が必要になる。すなわち、処分場の地質環境が数千年後あるいは数万年後にどう変動するか、あるいは変動の範囲はどの程度かを予測できるようにする必要がある。そのためには、過去において日本列島の地質環境がどう変わったか、またどのような地殻変動を経験したかを知ることが重要である。その知識に基づき、未来予測のモデルを構築しなければならない。数千年後あるいは数万年後の人間環境の予測は困難であるし、また予測しても無意味であろう。したがって、そのような長期の安全性検証は必要ないという意見もある。しかし、数千年後あるいは数万年後の人類がどうなっているにせよ、悪い影響を残さないようにすることは義務である。地殻変動については数万年以上の予測も可能である。ただし、どの程度まで定量的な評価ができるかが重要である。例えば、数万年程度では1,000m以上の隆起はありえないという程度のことは、

たいていの地域で確信をもって言えるが、高レベル放射性廃棄物地層処分の長期安全性を十二分に確認するためには、予測精度と確信度をもっと上げることが必要である。地下水環境については人間の影響もあるが、安全側をとって自然現象だけで予測できる範囲で検討すれば、数千年ないし数万年の評価も可能になると思われる。

#### 4.3 地下試験の位置づけ

地層処分のための地下試験の目的には、次のような項目が挙げられる。

- 1) 地下深部のプロセスを理解し、シナリオ構築に役立てる。
- 2) 安全評価モデルのための実測基本データを取得する。
- 3) 安全評価の妥当性を検証する。
- 4) 地質調査・試験技術の開発
- 5) 処分場建設技術の開発
- 6) 地層処分の総合的フィジビリティ・スタディ

以上のように、地層処分技術の開発にとって、地下試験はたいへん重要な役割をもっている。というよりも、地層処分の有効性を示すために、地下試験は必ず必要なプロセスである。

上記項目のうち、5)および6)のためには、実際の地層処分場に近い地下空洞の建設が欠かせない。しかし、1)-6)の項目のうちの相当部分は必ずしも地下空洞でなくても、ボーリング孔でもある程度のデータは得られる。

現在のような研究開発の初期段階では、1-2ヶ所の地下試験空洞より、多数のボーリングで、多地域の深部のデータを収集する方が有効なものもある。したがって、まずボーリングや広域的な物理探査・地球化学調査を実施し、基本的な地下深部のデータを収集し、その研究成果を基に地下試験を実施すべきであろう。この場合の地下試験は、処分モデルや安全評価の妥当性の検証が主な目的になる。

#### 4.4 処分予定地選定のために

元来、研究開発計画では処分予定地を選定してから、その予定地について処分の安全性を検証するので、処分予定地の選定は本格的な研究開発のスタートに位置づけられる。しかし、予定地とその周辺の住民は、予定地として決める前に、高い精度の安全性の検証を求める。すなわち、現地での試験・調査に入る前に、現地での試験・調査を実施しなければ得ることのできないような精度の評価が要求される。これでは、処分計画は一步も進まないことになる。

このようなジレンマを解決するにはどうすればよいで

あろうか。住民の理解を求めるためには相当の裏づけが必要である。そのためには、現在のような、地域を特定しない調査の段階で、処分の安全性を相当の確信をもって示すことができるだけのデータを収集する必要がある。既存の役に立つ可能性のある資料はすべて収集し、データベースとして利用できるようにすることはもちろん必要であるが、地層処分のため、特に地域を特定しないボーリング調査等により、地下深部のデータを直接測定し、その結果を集積して、日本の深部地質環境全体の理解のレベルを上げる必要がある。処分予定地の選定を今世紀末または次世紀の始め頃には実施しなければならないとすれば、超長期の問題も含む高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発には、急を要することになる。処分関係の研究開発資金が確保され、多数の研究者が参加して、活発な研究開発を進めている諸外国に比較しても、世界第4位の原子力エネルギー利用国である我が国は廃棄物対策にさらに多くの力をそそぐことが要望されている。そのためには、研究資金も重要であるが、それ以上に重視すべきは、研究開発に参加している原子力分野および地球科学分野の専門家の数が少ないことである。特に、地質環境の調査や長期安全性の検証のため

に、地球科学関係の専門家がもっと多数参加する必要がある。少なくとも、多くの分野・人数の専門家が参加して、全国規模の調査・試験をし、その努力が広く知られるようにすることは、地層処分の安全性についての国民的コンセンサスを得るために必要なステップである。

#### 文 献

- Cranwell, R.M., Guzowski, R.V., Campbell, J.E. and Ortiz, N.R. (1982) Risk methodology for geologic disposal of radioactive waste: Scenario selection procedure, SAND80-1429, NUREG/CR-1667, Sandia National Laboratories, U.S.A.
- EPA(1985) Background information document, final rule for high-level and transuranic radioactive wastes, EPA520/1-85-023
- 小出 仁(1990) 高レベル放射性廃棄物地層処分。資源・素材学会誌, vol. 106, p. 495-499.

(受付: 1991年2月8日; 受理: 1991年4月8日)