高レベル放射性廃棄物地層処分と地球科学

小 出 仁*

Geological Disposal of High Level Radioactive Wastes in Japan and Earth Science

Hitoshi KOIDE

Abstract

About one fourth of the total production of electricity in Japan was generated in nuclear power plants in 1985. Now, the disposal of radioactive wastes is a major environmental problem. The Japanese islands locate in the tectonically active zone around the Pacific Ocean. Four major lithospheric plates collide or scratch each other in or near Japan. Major earthquakes often shake the Japanese islands where active faults distribute densely. Eruption of volcanoes and hot springs indicate high geothermal activity.

However, many observations indicate that shocks of earthquakes are much milder at the depth of some hundred meters than at the ground surface. Some areas even in Japan have been free from volcanic activities during the last tens of millions years.

High density of fractures in rocks due to past tectonic disturbances are more serious problems for the isolation of radioactive wastes, as some of fractures might provide pathways for hazardous contaminated water. Major efforts should be paid to develop precise techniques which allow us three dimensional mapping of underground fractures with no hurt to rock body which provides the natural barrier against the migration of radionuclides.

The long-term performance of the waste isolation system should be estimated adequately. The knowledge of recent tectonic activities (Quaternary tectonics) and the study of natural analogues provide a basis for long-term prediction of the stability of the burial site.

I. はじめに

通産省資源エネルギー庁の発表によれば、日本の原子力発電設備量は2452万 KW で、昭和60年度の発電電力量は1590億キロワット時となり、全発電量の約4分の1の発電を行っている（通商産業省 1986）。発電量では、石油火力発電を抜いて、原子力発電がトップになった。昭和61年度における耐用年数を考えた生涯コストの通産省による試算では、原子力発電のコストは1キロワット時当り9円程度で、石油火力および液化天然ガス12円、一般水力13円、石炭火力11円に比べ、最も安い。最近の石油価格の低下によってコスト差は縮まっているが、石油価格の低下自体が原子力エネルギー抜きでは考えられないであろう。ソ連のチェルノブイリ原子力発電所事故は、世界的に原子力利用にブレーキをかけたが、長期的には石油火力発電への依存度は低くしなければならない。日本のエネルギー資源から考えて、原子力発電への依存度は依然として高まっていくであろうと予想される。日本は既に、原主油従時代に入りつつあるといて

* 地質調査所 Geological Survey of Japan

も過言ではない状況である。原子力発電所の稼働率も76%に達し、日本の運転・管理技術は世界でもトップクラスになったといわれている。

それでもなお、原子力平和利用技術が完成したといえないのは、バックエンド対策が確立していないためである。原子力利用に伴って必然的に排出される放射性廃棄物は社会的問題となっていて、原子力利用の是非をめぐる問題にまで発展している。廃棄物問題は原子力発電に対する主要な反対理由の一つになっている（昭和61年版原子力安全白書）。バックエンド対策が確立していないのは、原子力だけではない。とかく、フロントエンドにおける開発努力に比べ、バックエンドはなおざりにされがちである。したがって、多くの分野で、最先端の技術革新にバックエンド対策がついて行けない状況にあるが、なかでも原子力は懸念を持たれている。未確定要素が多いため、資源エネルギー庁のコスト計算でもバックエンド対策費—すなわち放射性廃棄物処分と原子炉廃止措置のための費用は含まれていない。しかし、おおざっぱな見積りとしては、両者をあわせても1キロワット時あたり1円以内とされ（向坂 1986）、それを含めても原子力発電のコストはあまり上昇しない。原子力のバックエンド対策の遅れは経済的理由よりは、むしろ科学技術と認識の遅れが原因であるといっても過言ではないであろう。

核燃料サイクルは、原子力発電の燃料体を製造する技術と、使用済核燃料を再処理して原子炉燃料として再利用できるプルトニウムやウランを分離する技術と、不用な放射性廃棄物を安全に処理する技術からなる。エネルギー資源の乏しい日本で、原子力は準国産エネルギーであるといわれているが、実際には核燃料サイクルはほとんど外国に依存してきている。そこで、総合エネルギー調査会原子力部会は、自主的核燃料サイクルを確立する方針を示した（総合エネルギー調査会 1984）。使用済核燃料の再処理で分離される液体廃棄物は、放射能が特に高いために高レベル廃液と呼ばれる。ウランやプルトニウムと核分裂生成物はほとんど燃料棒中に閉じこめられており、再処理によってウランやプルトニウムを回収した後も、核分裂生成物のほとんどが高レベル廃液中に残る。アメリカやスウェーデンは、再処理をしない方針なので、ウランやプルトニウムが含まれた使用済核燃料のままで処分する。使用済核燃料あるいは、それを再処理した後に残る高レベル廃液を、高レベル放射性廃棄物と呼び、量は少ないが、原子炉から出る核分裂生成物のほとんどを含む。高レベル放射性廃棄物以外にも、原子力施設から出る廃棄物は多種多様だが、そのほとんどはごく放射能が低いので、低レベル放射性廃棄物と呼ばれる。日本においてこれまで蓄積された放射性廃棄物の量は、高レベル放射性廃棄物は液体で約169m³であるが、低レベル放射性廃棄物は2001ドラム缶で約58万本に達する（昭和61年版原子力安全白書）。

科学技術庁による「未来技術予測」によれば、放射性廃棄物対策はガン対策に次ぐ最重要課題にあげられている（科学技術庁 1983）。予測方法に使われた、デルファイ法は、多数の専門家にアンケートを繰返して、互いの予見を確かめながらしだいに収斂させていく方法である。技術未来の予測の結果はまた、放射性廃棄物は人類にとってガンに次ぐやっかいものと考えられていることも意味しているように見える。しかし、放射性廃棄物は、壊変によって放射能が低下してゆくので、永久に毒性が消えないような一部の廃棄物よりむしろ対策は立てやすい面もある。低レベル放射性廃棄物の場合は元々放射能が低い上に、含まれている放射性核種の多くが半減期30年以下であるので（石原 1985）、廃棄物の種類によって異なるが、その多くは100～300年後にくらいには、放射能がほとんど問題にならないくらいに減衰してしまう。300年は短い期間ではないが、人間の経験や技術で対処しえないタイムスパンではない。しかし、高レベル放射性廃棄物は放射能が極めて高く、しかも長半減期の放射性核種が相当多く含まれている。使用済核燃料の再処理によって生じる高レベル放射性廃液は、液相より固相にした方が、貯蔵や処分の際に安全であるので、高レベル廃液を固化処理して、核分裂生成物を固相のマトリックス中に閉じ込める。固相マトリックスとしてはホウケイ酸ガラスが最有力であるとされているが、さらに長期安定な固化体を開発するために、セラミック固化、岩石固化等の固化法も研究中である。高レベル放射性廃棄物の固化体は、最初のうちは相当の熱を発生しながら放射性核種の壊変が進み、1000年後くらいまでは急速に放射能が減衰する。

しかし、その後は超ウラン元素等の長半減期核種のために、なかなか放射能が減衰しない。高レベル放射性廃棄物といっても、種類や処理法によって放射能の強さや危険な程度の放射性が持続する期間は様々であるが、一般的には数万年以上にわたって生物環境から隔離する必要があるとされている。数万年以上となれば、きわめてまれな現象も必ずしも無視しえなくなるし、人間社会の変動も予測しえない。そのような長期にわたって人間が保管しつづけることは事実上不可能である。後世にツケを回さないためにも、人間が管理していなくても、超長期間にわたって生物環境から高レベル放射性廃棄物を隔離できる方法を開発する必要と義務が、原子力を利用している世代にある。

日本における高レベル放射性廃棄物の蓄積量は、だいたい日本式の小さな小家族用住宅（ウサギ小屋？）1軒分程度である。主要な有害物質が、ほぼ全部ごく小さい容積中に閉じ込められることは、エネルギー源としての原子力発電の利点である。将来の膨大なエネルギー需要をすべて石炭や石油でまかなうとすれば環境汚染はきわめて深刻になるだろう。原子力発電の技術そのものが、有害な放射線や放射性物質を原子炉内に閉じ込めて、生物圏から隔離しつつ、エネルギーのみを取り出すための技術である。現在稼働中の原子炉内にある燃料棒もまた、今後数万年以上にわたって生物圏から隔離し続けなければならない。原子炉内の燃料棒の分をすべて加えても、高レベル放射性廃棄物はたいした量にはならないが、その超長期隔離が可能になって、はじめて原子力平和利用技術が完成する。たとえ、原子力利用を現時点で完全に廃止したとしても、現存する放射性廃棄物や核燃料棒は隔離し続けなければならない。スウェーデンでは、1980年3月の国民投票の結果、新規原子力発電所の建設は行わないことになり、現在運転中の12基の原子力発電所の寿命がすべて終る2010年以後は、原子力発電は事実上廃止されることになった。それにもかかわらず、スウェーデンでは放射性廃棄物の処理処分法の研究開発は、現在精力的に進められているが、高レベル放射性廃棄物の処分が実際に開始されるのは、皮肉なことに原子力発電が全廃されてから10年後の2020年と予定されている。廃棄物問題は原子力利用の賛否の立場を越えた、回避のできない課題になっているといえる。

現在の世界各国の国民感情では、他国の放射性廃棄物の処分を自国内で実施することには、強い拒否反応があり、自国領土の近くに放射性廃棄物を持ち込むことにすら猛反対がおきる。放射性廃棄物処理処分に関連する国際的な共同研究や協力は大変活発に実施されているが、最終的な処分を国際的に実施するのはきわめて困難であろう。

原子力利用技術でもっとも基本的な理念は、「多重防護」と「ALARA (as low as reasonably achievable)」である。「多重防護」は、それぞれ単独でも十分に安全確保ができるような安全防護装置を多重に配することにより、万一の危険をも防ごうとする。例えば、破られる危険が、それぞれ1万分の1であるような安全防護装置が二種あって、それぞれがまったく独立であれば、両者が同時に破られる危険度は1億分の1でしかない。放射性廃棄物を隔離する場合にも、放射性核種の漏洩を妨げるバリアを何重にも組みあわせる方法が用いられる。これを「多重バリア」と呼んでいる。「ALARA」は、国際放射線防護委員会(ICRP)が1977年の勧告で示した、経済的・社会的要因を考慮して合理的に達成可能な限り被曝を低くおさえるという考え方である。

多重防護とALARAは原子力利用の安全性を確保するための最も重要なキーになっているが、しばしば誤解の元にもなっている。例えば、「そんなに安全なら、なぜその上さらに隔離しようとするのか？」という疑問が、原子力反対・推進両方の側から出される。しかし、科学・技術に100%完全ということがなく、原子力・放射線の利用が人類にとってまったく新しい経験である以上は、多重防護とALARAの考え方は堅持されるべきで、放射性廃棄物処理・処分においても基本理念にならなければならない。

ここで、「貯蔵」と「処分」の違いに注意する必要がある。「貯蔵」は、原則として再び取り出すことを前提に保管することで、人間の管理が欠かせない。それに対し「処分」は、原則として再取り出しは考えず、人間が管理しなくても、長期的に生物圏から隔離されるように措置することである。数万年以上も人

間が確実に管理し続けられるとは、誰も保証できない。ネアンデルタール人は今の人間社会を想像もしなかったであろうが、それ以上に、今から数万年後の人類がどうなっているかを予測することは困難であろう。しかし、後世に悪環境を残すことはできない。仮に、数万年にわたる管理が可能であったとしても、その経費を累計すれば膨大になるであろう。正に、ツケを後世に回すことになる。要するに、高レベル放射性廃棄物を何万年も「貯蔵」はできないので、管理の不用な「処分」法を開発しなければ、原子力利用技術は完成したとはいえない。ただし、実際に管理を行わないかどうかは別の問題である。おそらく「処分」が実際に行なわれる際には、当分の間は何かの方法で監視し、安全を確認することになるだろう。しかし、この場合の監視はあくまでも安全確認のためであって、管理しなくても、まったく安全のように厳重に隔離されていなければならない。高レベル放射性廃棄物の量が少ないことから、ロケットで宇宙へ放出したり、太陽に打ち込む方法も提案されているが、しかし地球で処分しなければならないとすると、地下深部の岩体中に埋没するのが、唯一の確実な方法と考えられる。南極の大陸氷中に処分する案もあるが、氷も一種の岩石と考えれば、地中処分の一変種といえる。

高レベル放射性廃棄物は、十分な安全を確保するために、地下深部の緻密な難透水性岩石中に埋設する。地下の岩体中に埋設する方法も各種あるが、現在一般に考えられている「地層処分」は地下数100mから1000m程度の深さの岩体中に鉱山のような立坑と水平坑道を掘削し、金属製（ステンレス銅等）のキャニスターに入った高レベル放射性廃棄物の固化体を粘土等で何重にもくるんで、埋設した後に、ていねいに埋め戻す方法である（第1図）。大口径ボーリングによって、はるかに深部（深さ数～十数 km）に埋設したり、海底下の堆積物中に埋没させる方法も提案されている。

第1図 高レベル放射性廃棄物処分場概念図 (KBS 1978)

1. 主立坑, 2. スキップ立坑, 3. 換気立坑, 4. 廃棄物キャニスター搬入用立坑,
5. 受取, 封入施設, 6. 中間貯蔵施設, 7. 最終処分場

放射性廃棄物を地下に処分するためには、地下を十分に理解し、埋設した廃棄物が長期にわたってもれ出す心配がないことを確認できなければならない。高レベル放射性廃棄物の場合は、超長期にわたる予測が必要であるため、ほとんど地球科学のあらゆる分野の協力が必要である。ここでは地球科学的な問題点

を大まかに検討してみる。高レベル放射性廃棄物の地層処分法の開発は、地下空間利用としてはもっとも困難な問題を含むだけに、産業廃棄物の処分を始め、地下空間利用技術の画期的な進歩をもたらすであろう。

地層処分の地質学的問題については ICUS 委員会による報告がある (FYFE, et al. 1984, HARRISON 1984)。日本列島に高レベル放射性廃棄物を地層処分する場合の地質学的問題を議論した報告はまだ少ない (木村 1982, 小島 1982, 1985, 小出 1985)。高レベル放射性廃棄物の処理・処分問題は地下利用・地殻開発の典型的問題をかかえている。日本では原子力委員会放射性廃棄物専門部会の定めた計画に沿って、国家的プロジェクトとして研究開発が進められている。

II. なぜ地下深部に処分するのか？

地下に廃棄物を処分することに対し、不安感を持っている人がかなり多い。たびたびの炭鉱事故等も地下への不安感の一因であろうが、これは石炭層の軟弱な性質と可燃性という特殊な条件によるもので、地下全体に危険と考えるのは誤りである (小出 1984)。地質調査法と工事方法の発達により、トンネル掘進などでも、大きな落盤事故や出水事故はほとんど発生しなくなってきた。戦争や破壊活動などの人間による危険に対して地下の方が安全なのはいうまでもない。核攻撃や隕石の落下等に対しても地下深部の方が明らかに安全である。

地震の際に地下は危険であるという迷信は根強い。地震は地下で発生するのだから、地下の被害は大きいと考えがちであるが、実際は地下の方が震動は小さいのである。昭和58年8月26日の大分県北部の地震 (M6.8, 深さ110km) の四国の花崗岩地帯での観測結果では、地表部では最大加速度37.5ガルであったが、その128m下の岩盤内部では、最大6.64ガルであった。すなわち、気象庁震度階で、地表部では震度4であったものが、128mの深さでは震度2相当でしかなかった。震度4は、すわりの悪いものは倒れ、人もかなり驚く程であるが、震度2では歩いている人は気付かない。鉱山の地下坑内で作業していた人々が地震にまったく気付かず、地表に出てきて大きな地震があったことを知って驚いたという話はかなりあるが、四国での測定結果はこれらの談話をある程度裏付けているといえよう。しかし、震源にごく近い地下ではどうであろうか？ この疑問にこたえるような例が中国にある。

1976年唐山地震は世界史上第2位という大きな人的被害 (中国の発表で死者24.2万人) を出した (史上最大被害は同じ中国の1556年華県大地震の死者83万人)。開らん炭田地帯の中心をなす炭鉱・工業都市唐山市の直下12kmを震源として、マグニチュード7.8の大地震が発生したため、唐山市の人口106万人のうち死者14.8万人、重軽傷者44万人という壊滅的災害になった (高橋ら 1983)。ほぼ7人に1人が死亡し、負傷を加えると2人に1人が死傷したことになる。

唐山市の中央部を北北東—南南西に貫く地層断層が出現し、右横ずれ約1.5m及び西側隆起約1mのくいちがいを生じた (松田 1979)。唐山炭鉱は、その直下50~800mの深さにあり、坑内でV号断層と呼ばれていた断層が、震源断層となったのである (第2図) (陝西省地震隊 1981)。要するに、震源の直上というより、炭鉱内は震源の一部であり、考えられうる最悪の条件といってよいであろう。もちろん坑内も相当の被害は免れられなかったが、それにもかかわらず人的被害は地表の惨状から見ると考えられないくらい軽かった。

大地震7年後にやっと外国人記者団に公開されて唐山市に入った日本からの特派員は、「安全だった地下」と題して次のように報じている (1983年8月18日朝日新聞・横堀特派員)。「唐山市には中国有数の開らん炭鉱 (年産約2千万トン) がある。地下800余メートルの坑道でその夜、1,100人の炭鉱労働者が働いていた。地震で地上の建物は全壊、それによって1,951人が死亡した。坑道内も電気が止まり、エレベーターが動かなくなったが、炭鉱労働者はジグザグに掘ってある斜坑を伝って全員無事で地表に帰ってきた。地下は意外に安全—という教訓から、新たに建てられた公共建築には地下室が設けられ、薬品などの救急

第2図 唐山鉞山地下635mの深さにおける震度分布(中国震度階)平面図
(陝西省地震隊 1981)

物質が蓄えられている。」

唐山炭鉞の坑道等の被害状況から、地下の震度分布が推定されている(陝西省地震隊 1981)。その結果によると、唐山市地表で中国震度階で震度11、すなわち日本の気象庁震度階級で7相当の激震であったものが、地下500m以下では、中国震度階で震度7(気象庁震度階4の中震に相当)になっている(第3図)地下坑内の震度分布図(第2、4、5図)を見ると、地下深部でも大きな断層の付近は中国震度階で震度9(気象庁震度階5の烈震に相当)となっており、断層付近では震動が激しい。第2、4、5図の

V断層は震源断層と考えられるので、震動が激しいのは当然であるが、それでも地表より震動はかなり小さい。また、500m以深では、断層から2~300mも離れたと、中震程度まで震度が低下するので、耐震性に考慮が払われてさえいれば、ほとんど被害は受けないであろう。

地表でも、大きな断層帯では地震動が大きい傾向があるが、必ずしも明瞭ではない。地下では、全体の地震動は小さいものの、断層破砕帯と健全な岩盤部との差は、きわめてはっきりしている。前述の四国での観測でも風化花崗岩の部分では、健硬な花崗岩の部分に比べてかなり地震動が大きい。

日本でも、トンネル等の地下施設が地震で被害を受けた例はあるが、地震動の直接の効果である慣性力による被害はごく軽微で、地下深部でトンネルの覆工に欠陥のない部分においては、震源に近傍でも覆工のわずかなキレツや崩落等の被害も生じていない区間もある(吉川 1984)。

トンネル等の震害のほとんどは、地すべりなどの岩盤の変形や液状化によるもので、これらは地表近くの軟質岩や風化岩・破砕岩中で発生したものもある。他に、まれではあるが、北伊豆地震の時の丹那トン

第3図 唐山炭鉞立坑沿いの深度による震度変化
(陝西省地震隊 1981)

第4図 唐山第1号坑の震度分布断面図 (陝西省地震隊 1981)

第5図 唐山2号坑の震度分布断面図 (陝西省地震隊 1981)

ネルや伊豆大島近海地震の時の稲取トンネルのように断層のずれによって破壊したものもあるが、それもゆっくりしたずれによる変形で、慣性力による急激な破壊ではない。すなわち、地下の施設は、軟岩や風化岩あるいは断層破碎帯を除く健硬な岩盤中であれば、地震による被害はほとんどない。多少の被害があったとしても、慣性力が小さければ、対策はたてやすいといえる。

前出の唐山炭鉱では、唐山地震前の湧水量が毎分28tであったものが、地震後毎分67tと2倍以上に急増したことが報告されている(陝西省地震隊 1981)。付近の他の炭鉱でも湧水量が地震によって急増した。これは岩盤内の割れ目の開口等によって透水性が高まったためと思われるが、次節で述べるようにこれは地層の隔離性能を低下させるので注意する必要がある。しかし、これもある程度の対策を立てておけば、実害は避けられるであろう。

このように見てくると、地震の危険の大きい地域にこそ、地下深部の岩盤中の施設を造る利点は大きいことがわかる。火山の噴火による熔岩や泥流などの地表からの危険に対しては、やはり地下の方が安全である。地下の処分場を熔岩が直撃するような危険は、確率としてはごく小さい、安全性を考えれば、現在地上で保管されており、今後近いうちに利用する計画のないような放射性廃棄物は速やかに地下へ移すべきである。

III. 地下水と岩盤の隔離性能

米国などで産業廃棄物を安易に地表や浅い土中に投棄したために、地下水や地表水を汚染して問題になっている(MAUGH 1979)。地下に埋設した放射性物質が、地下水に溶け出して、結果的に地表に出てくるようなことがあってはならない。ただし、地下深部における地下水の移行は通常きわめて遅いので、地表に出てくるまでの間に放射能は減衰する。このためにも、地下深部は有利である。ただし、地下におけ

る地下水の挙動はまだ十分に理解されていないので、詳細な検討が必要である。

処分場の母岩としてはさまざまな種類の岩石が検討されている。岩塩は低間隙率と低透水性および塑性的で熱伝導度が高いという良好な性質を持つため、米国や西独で早くから注目されてきたが、日本には存在しない。構造的に安定な地域にあって低透水性の岩体、例えば花崗岩やはんれい岩等の貫入火成岩体や玄武岩・石灰岩・粘土質岩・凝灰岩等も候補として検討されている。粘土鉱物や、ゼオライト質凝灰岩は放射性核種を吸着して逃がさない効果がある。

地下水による放射性核種の搬出を遅くするには、母岩の透水率が低く、圧力差が小さく、母岩の核種吸着能力がで、実流路が長く、水への核種浸出率が小さくしなければならない。割れ目が流体の通路になると、流速は数オーダー大きくなり、吸着の機会も少なくなる。岩石の透水率は、実験室での測定値に比べて原位測定値がずっと大きいことが多い。これは、主に岩盤内の割れ目のためである。岩盤の割れ目や断層を通る水の流れをどう評価するかは未だ十分に解明されていない大きな問題である。また、放射性核種を効果的に封じ込むためには透水率がきわめて低くしなければならないが、そのようなきわめて低い透水率をどう測定するかという問題もある。きわめてゆっくりした地下水の移動速度を推定するには、地下水の年代の測定法を開発する必要がある。

地下水の塩濃度や PH や Eh は、廃棄物固化体からの核種浸出速度やキャニスターの耐久性に大きな影響がある。地下水の化学的性質は母岩の化学的性質によってコントロールされている。結局、天然の岩体中に埋設された放射性廃棄物固化体やキャニスターや埋戻し材が地下水を媒介として相互反応し、その結果として核種が移行ないし固定化する。地球化学的な系の総合的研究が必要である。廃棄物固化体（ガラス固化体、シンロック、セラミック等）の安全性や埋戻し材の粘土の吸着性能も地下水ひいては地下の化学環境下で評価しなければならない。

熱も力学的・化学的变化を誘発する。熱割れや含水鉱物の分解が重大な問題で、粘土鉱物は100°C 程度以上で水を放出しはじめる。加熱された水やガスは膨脹して圧力を増し、流体破碎を起こす危険性がある。発熱性の高レベル放射性廃棄物を地下に埋設するには、高温・高圧下の岩石との力学的化学的反応や流体の挙動等解明しなければならない問題がまだかなりある。

IV. 地下地質調査と地下実験

旧東海道の丹那トンネルを掘る時、断層や変質帯の存在が予測されていなかったために大きな災害をもたらした。この結果、事前の地質調査の重要性が認識されたといわれている。現在ではトンネル工事では事前の地質調査が必ず行われ、その方法も進歩している。例えば、青函トンネルでは精密な地質調査がなされた。その結果、海底下という悪条件にもかかわらず大きな誤りはなかったが、断層の分布等に実際と多少の違いが認められた（前田他 1983）。地層処分場では、地質調査はきわめて重要で、特に断層の分布は正確に把握しなければならない。

高レベル放射性廃棄物は処理のしかたによって異なるが、いずれにせよ容積としてはすべて集めてもそれほど大きくならない。したがって処分場の容積も大きくはないが、あらゆる方法を使って徹底的に調査をする必要があり、また周囲のかなり広い範囲についてもある程度の調査が必要であろう。予期しない地下水脈や破碎帯や岩質変化があると処分場の建設に致命的な場合もある。小断層や割れ目の検知が特に問題となる。処分場のごく近くでは、岩盤を極力乱してはならないので、坑道の掘削やボーリングは最小限にしなければならない。このような制約下で、非破壊的に岩質の変化や割れ目を検知し、岩盤の物性を把握するための技術を開発する必要がある。非破壊的な地下深部の地質調査技術の開発は地殻開発全般に重要な課題である。

処分場を掘削すると、地下に力学的・化学的・熱的な乱れが生じる。掘削により地殻の応力場を乱し、地下の空洞周辺の割れ目が発生する。処分場付近に達する立坑やボーリング孔は注意深く封じる必要があ

る。新オーストリア・トンネル工法（略称 NATM）は、岩盤力学の最近の発展の成果を生じ、地山をできるかぎり乱さず、岩盤自体の支持力を最大限に生かそうとする工法で、トンネル掘削技術の画期的な進歩をもたらした。NATM の技術は、処分場の掘削に生かされるであろうが、処分場ではきわめて厳密な岩盤の管理が必要であり、工法の一層の進歩も必要であろう。処分場の厳密な岩盤管理には、信頼のおける現場計測技術の開発と地下の応力や間隙流体圧の原位置測定技術や、岩盤の強度や変形特性を正確に推定する技術を開発しなければならない。岩盤強度や変形特性も原位置測定が重要であるが、実際には原位置測定でも真の地下条件とは異なっていることに留意すべきである。また、処分場の岩盤は極力乱してはならないので、処分場自体での原位置試験は制約される。したがって、地下条件を完全に再現できるような室内実験技術の開発も重要であり、その結果と少数の原位置試験と弾性波速度等の間接的データから、地下岩盤の特性を知る方法を開発する必要がある。

菊間における石油地下備蓄実証実験は最初の本格的な地下実験で、多様な調査観測が行われているが、石油備蓄が目的なので、備蓄中空洞内に立ち入れない。原子力環境整備センターが日本鉱業会に委託して、石灰石鉱山で行なっている低レベル放射性廃棄物の地下保管のための空洞建設試験は実験のみを目的としているので、様々な実験・観測が可能である（山口 1984）。高レベル放射性廃棄物の地層処分のためにはきわめて長期の実験が必要である。

地下は様々な可能性を持っており、今後10～20年の間に急速に開発が進むことになるだろう。しかし、地下の深部については、まだ明らかになっていないことが多い。現在の実験技術では、深さ1000m 程度の地殻内の圧力・温度等の条件はほぼ完全に実験室内で再現できる。実験によって地下深部の状態を再現し、地下の現象を解明する学問分野は実験地学と総称され、急速な進歩を遂げつつある。しかし、地下のスケールの大きさと時間の長さは本質的に重要であり、多種多様なファクターの重なり合いと永い歴史を実験室で再現することはできない。地殻の総合的な挙動を実地に調べるには、やはり、地下深部へのボーリングや地下原位置実験を並行して進め、短所を補いあうべきであろう。地下の開発を促進するには、地下の基本的特性を明らかにするための、地下総合実験施設をいくつかの地質環境で建設する必要があり、これは日本人の地下アレルギーを解消するためにも役立つであろう。

V. 地球未来予測

エジプトのツタンカーメン王の墓や中国の馬王堆漢墓などは地下の保存性の実例であるが、それでもたかだか数1000年にすぎない。人間の歴史にとって、数万年は超長期であるが、地球の歴史では短期間である。石油や天然ガスが大量に地下に埋蔵されていることは、数100万年以上もの間地層中に封じ込められることを示している。天然鉱物や岩石は、超長期にわたって安定であったことを証明しうるものがある。特に、アフリカのオクロの「天然原子炉」は、ウランの高品位鉱床で約20億年前に天然の核分裂連鎖反応がおきたとされている（武内 1984）。すなわち、約20億年前に放射性廃棄物をじかに地中に埋設する実験を行ったのと同じことであり、その詳しい調査は地層の廃棄物隔離能力を実証しうるものとして注目を集めている（藤井 1985）。20 億年もの間ほぼ良好な状態で保持されていたことは地層処分の安全性を支持するものといえる。

放射性核種の地下における超長期の挙動を明らかにするには、実験室内でも原位置実験でも期限が限られているために、万全とは言えない。超長期の安全性の実証には、天然の類似現象いわゆるナチュラル・アナログの研究が必要になるので、地球科学的手法が不可欠である。天然原子炉は、貴重な研究資料であるが、きわめて珍しい現象である。したがって、天然の超ウラン元素の挙動をオクロ以外で調べることは今のところできないが、化学的に似た挙動をする相似元素の挙動を天然において研究することができる。たとえば、プルトニウムの相似元素としてトリウムが、また希土類元素もアクチノイドの相似元素となりうる。ブラジルの Morro do Ferro のトリウム・ウラニウム・希土類の高品位鉱床で、放射性元素の挙動

が組織的に研究されている (EISENBUD 他 1984)。日本では、小規模ではあるが、ウラニウム・トリウム・希土類等の鉱床は様々なタイプのものがあるので、それらを系統的に研究することが期待される。予備的結果としては東濃、ウラン鉱床周辺の地下水系の解析から、ウラン鉱化帯の地下水が上部層準の帯水層にほとんど逸脱していないと推定されている (SAKAMAKI 1985)。

地下に埋設した高レベル放射性廃棄物が数万年にわたって、生物圏から隔離できることを確かめるためには、その間、隔離に影響を与えるような大きな変動がないことを予測しなければならない。日本は地殻の変動帯にあるので、超長期の安全性を必要とする高レベル放射性廃棄物の地層処分はできないという主張もある。確かに、日本列島は、世界でもっとも地殻変動の激しい場所の一つであり、地震や火山活動による自然災害も多い。しかしながら、地震や火山が日本のどこでも発生するわけではない。海洋プレートがもぐりこむサブダクションゾーンと火山フロントの間では火山活動がないことが知られている (上田・杉村 1969)。例えば東北地方では中央山脈付近にほぼ南北に火山フロントがあり、それより東の海側には現世の火山はない。火山フロントのすぐ西でもっとも火山活動が激しく、西へ遠ざかるにつれ火山は少なくなっていく。地下の処分場をマグマが直げきする危険はごく小さいが、むしろ加熱された水の作用により地層や工学バリアの隔離性能が損なわれる方が実際上大きな問題である。しかし、地熱活動も比較的最近の火山活動があった地域で活発である。火山フロントは、第三紀後半以後あまり大きな変動はしていないと見られており、プレート運動との関連から考えても数万年のオーダーでは大きな変化はないであろう。

地震の原因となる活断層分布も一様ではない。近畿地方中央部から中部高地にかけての一带は、世界でもっとも活断層の密度が高い地方の一つである。しかし、また活断層がほとんど見当たらない地域もある。Ⅱ節で述べたように地震は地層処分場にとってあまり恐ろしい現象ではないが、活断層のすぐ近くは地殻の不安定な場所であるから、なるべくさけるべきであろう。数万年から数十万年の期間となると、地盤の隆起・沈降の影響が無視できなくなる。特に地盤隆起は浸蝕を促進する。第四紀の間すなわち約 200 万年間に 1000m 以上の隆起をしている所がある。地盤の上下変動はまた地下水流の変化をもたらす可能性がある。これらは海水面からの相対的高さが問題になるので、海水面変動や地下水環境の予測には気候変動の予測も必要である。

地殻の応力や温度分布は、地層処分場の安定性に直接影響を与えるだけでなく、地殻変動を予測するためのデータとしても重要である。地殻応力は様々な手段で推定されているが、信頼できるデータはきわめて不足している。しかし、全体的にはプレートテクトニクス説の有力な証拠の一つになりつつある。

数千年～数10万年の長さの地殻変動は、第四紀学で研究されている分野である。第四紀の間すなわち最近約 200 万年の間日本列島は大勢として東西圧縮の応力場にあり地殻変動は時間的にもほぼ一様に進行していたと考えられるが (杉村 1973, 成瀬 1978), 西南日本では約 50～60 万年前に多少の変化があったことも知られている (第 6 図)。

問題は現在の日本列島の応力場と地殻変動の速度が、どの程度未来まで続くか予想しうるかである。応力場は数 100 万年のオーダーで変動していることが明らかにされている (竹内 1984) ので、現在の状態が数 100 万年変わらないことは考えにくい。一方、数 100 年～数 1000

第 6 図 上町断層の上下変位 (藤田 1985)

第7図 応力場とプレート運動方向の関連 (竹内 1984)

竹内 (1984) は指摘している (第7図)。プレート運動は日本列島の地殻応力場の大勢を支配していると考えられる。したがって、そのメカニズムの正確な理解は、地殻変動の未来予測にとって欠かすことができない。プレート運動の原動力は、海溝から沈降していくプレート (スラブ) の引張力がもっとも大きいとされ (上田・FORSYTH 1975)、ついで海嶺からの押しの力が考えられる。したがって、沈降していくスラブが切れたり、新しいサブダクションの開始や新しいリフトの形成や伝播は、プレート運動の変化の原因になるであろう。

1980年代の国際協同研究計画である国際リソスフェア探査開発計画 (DELP) は、地殻の性質や諸現象を正確に解明することにより、資源探査や廃棄物処分や災害予知等に貢献することをねらっている (IUGG & IUGS 作業委員会 1979)。この計画は、人工衛星等を使ってプレートの動きを実測したり、地殻下部の現象を理解しようとする研究が中心になっている。またソ連では12km ~15kmの深層ボーリングを実施中で、米国も学術ボーリング計画がスタートしている。数万年といえ、地質的にはむしろ短い期間であり、そのあいだに大きな変動が来るとすれば、プレート運動や地殻下部には何らかの兆候が現われることが期待される。このようなスケールの大きな基礎研究も地質未来予測を可能にするためには、大変重要である。

高レベル放射性廃棄物対策は、人類にとって必須課題であり、地層処分を可能にするには、地球科学のほとんどあらゆる分野の研究者の協力が必要である。

参考文献

- BRACE, W. F. (1980): Permeability of crystalline and argillaceous rock. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **17**, 241-251.
- EISENBUD, M., KRAUSKOPF, K., FRANCA, E. P., LEI, W., BALLAD, R., LINSALATA, P. and FUJIMORI, K. (1984): Natural analogues for the transuranic actinide elements: An investigation in Minas Gerais, Brazil. *Environ. Geol. Water Sci.* **6**, 1-9.
- 藤井 勲 (1985): 天然原子炉. 東大出版会, 131p.
- 藤田和夫 (1985): 変動する日本列島. 岩波新書, 228p.
- FYFE, W. F., BABUSKA, V., PRICE, N. J., SCHMID, E., TSANG, C. F., UYEDA, S. and VELDE, B. (1984): The geology of nuclear waste disposal. *Nature* **310**, 537-540.
- HARRISON, J. M. (1984): Disposal of radioactive wastes. *Science*, **226**, No. 4670, 11-14.
- 星野一男 (1983, 1984): 菊間石油地下実証プラント. 地質ニュース, (その1) **350**, 6-18, (その2) **353**, 48-62.
- 石原健彦 (1985): 放射性廃棄物の管理をめぐる海外の情勢と今後の課題. 我が国に於ける放射性廃棄

- 物対策の現状と今後の課題. 日本原子力情報センター, 151-181.
- IUGG & IUGS 作業委員会 (1979): *The lithosphere; Frontier for the 1980's, International Union of Geological Sciences and International Union of Geodesy and Geophysics.*
- 科学技術庁 (1983): 日本の技術—未来年表 (1982-2010年). 化学技術と経済の会, 613p.
- 垣見俊弘 (1983): 日本内陸の活断層と被害地震の地域的相関. 地調月報 **34**, 295-309.
- KBS (1978): *Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High Level Reprocessing Waste.* KBS, Sweden 161p.
- 木村敏雄 (1982): 地層処分と日本の地層 1, 総説. 天沼・阪田監修: 放射性廃棄物処理処分に関する研究開発. 産業技術出版・テクノプロジェクト, 535-552.
- 小出 仁 (1984): アンダーグラウンド—隠れたフロンティア. 地質ニュース **363**, 38-55.
- (1985): 放射性廃棄物の処分と地質問題. 我が国に於ける放射性廃棄物対策の現状と今後の課題, 日本原子力情報センター, 119-138.
- 小島圭二 (1982): 地層処分と日本の地層 2, 日本の地質と水理. 天沼・阪田監修: 放射性廃棄物処理処分に関する研究開発, 産業技術出版・テクノプロジェクト, 553-575.
- (1985): 深地層の地球物理・化学的現象. 放射性廃棄物研究連絡会会報第4号, 3-7.
- 前田憲一・殿田広太郎・鈴木 隆 (1983): 青函トンネル海底部の地質—地質調査方法と地質の概要 (その1). 応用地質, **24**, 113-123.
- 松田時彦 (1979): 唐山地震の地表地震断層. 防災科学技術研究資料, **44**, 中国の地震予知の現状, 71-75.
- MAUGH II, T. H. (1979): Toxic waste disposal a growing problem. *Science*, **204**, 819-823.
- 中村久由 (1962): 本邦諸温泉の地質学的研究. 地調報告, 192号.
- 成瀬 洋 (1982): 第四紀. 岩波書店, 269p.
- Research Group of Quaternary Tectonic Map, Tokyo (1973): *Explanatory text of the Quaternary tectonic map of Japan.* 国立防災科学技術センター, 167p.
- SAKAMAKI, Y. (1985): Geological environment of sandstone-type uranium deposits. *IAEA-TECDOC-305*, 135-154.
- 向坂正男 (1986): 現下のエネルギー情勢下での原子力の役割. エネルギー, **19**, 20-24.
- 陝西省地震隊 (王景明): (1981): 唐山地震煤礦区烈度の空間変化. 唐山地震考察与研究, 地震出版社, 23-24.
- 総合エネルギー調査会原子力部会 (1984): 報告書—自主的核燃料サイクルの確立に向けて. 46p.
- 杉村 新 (1971): 構造運動. 羽鳥・柴崎編, 第四紀, 共立出版, 237-268.
- (1973): 大地の動きをさぐる. 岩波書店, 236p.
- 高橋 博・越井一郎・大村正好 (1983): 唐山地震, その被害と地震防震. 地質ニュース (1) **344**, 6-18, (2) **345**, 14-27.
- 竹内 章 (1984): 古応力場 I. 藤田和夫編著, アジアの変動帯, 海文堂, 293-312.
- 武内寿久弥 (1984): 放射性廃棄物地層処分基礎研究への地質学の貢献. 日本鉱業会講演要旨集, 昭和59年春季, 321-322.
- 通商産業省 (1986): 21世紀の原子力を考える. 通商産業調査会, 343p.
- 上田誠也・FORSYTH, D. (1975): プレート・テクトニクスのも動力. 科学, **45**, 66-74.
- ・杉村 新 (1970): 弧状列島. 岩波書店, 156p.
- 山口梅太郎 (1984): 低レベル放射性廃棄物の地下保管のための空洞建設試験 (中間報告). 日本鉱業会講演要旨集, 昭和59年春季, 323.
- 吉川恵也 (1984): 鉄道トンネルの震災と地震対策. トンネルと地下, **15**, 621-630.
- (1987年1月12日受付, 1987年2月18日受理)