

放射性廃棄物処分と地質問題

小 出 仁*

Geologic Problems of Radioactive Waste Disposal

Hitoshi KOIDE*

Key words : 高レベル放射性廃棄物 high-level radioactive waste, 地層処分 geologic disposal, 長期安全性 long-term safety, 地質未来予測 geologic prediction

Abstract

Japan's current research emphasizes the generic validation of geologic disposal and general survey of geologic environment of the Japanese islands. Understanding geologic setting is essential to the assessment of long-term safety of radioactive waste disposal. Scenarios for safety assessment of high level waste disposal should include even natural events of very low probability and very slow geologic processes.

Geologic predictions should be based on extrapolation, natural analog, probability, experiments, conceptual model, numerical simulation and safety-assessment model. The geologic environment at the depth of several hundreds and some 1,000 meters should be clarified to predict the fate of buried radioactive waste. In situ experiments are planned for the examination of validity of long-term isolation system of high level waste.

Long-term stability of the geologic environment is of primary importance in disposal of radioactive waste in Japan. The nature and behavior of deep groundwater provide key to the modeling and quantitative evaluation of performance of high-level waste isolation system.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物対策を進めているほとんどすべての国や機関が地層処分をする方向で研究開発を実施している。地下深部への処分は現在あるいは近い将来において、放射性廃棄物対策として利用しようの方法の中で最も実現可能性の高いものであると考えられている。宇宙処分は打ち上げ技術に問題があるので、現時点では地層処分より信頼性はるかに低いし、予見しうる将来にわたっても、地中への処分より信頼性が高くなる可能性はないと思われる。また、いわゆる消滅処理も、その名前

にもかかわらず放射性廃棄物を完全に無くすことはできない。消滅処理が実用化されれば、廃棄物中の長寿命の放射性核種を少なくできるので、廃棄物を隔離しなければならぬ期間は短くなる。しかし、かなりの放射性を示す廃棄物の量はむしろ増加すると予想されるので、地層処分の必要性がなくなることは期待できない。

放射性廃棄物対策には、精巧だが信頼性に乏しい技術を用いるよりは、信頼性の高い「丈夫で長持ち」を実現できる技術（“robust technology”）を使うべきである。数百m以深の地下深部に埋設する地層処分は、天然の岩盤自体が丈夫で長持ちするので廃棄物対策に適している。人工物は、目的に最適になるように計画し、欠陥がないように入念に造ることができる。しかし、人工物は

* 地質調査所 環境地質部 Environmental Geology Department, Geological Survey of Japan.

高々数百年ないし数千年の歴史しかないのに、それより長期の耐久性を実証することができない。廃棄物を封入する人工の隔壁（人工バリア）は、一定期間については内部の放射性核種が全く漏れ出さないように、設計することができるが、長期の耐久性を保証することは難しい。他方、天然の岩盤は、空隙や微細な割れ目等を含んでいるので、微量の地下水等の緩慢な移行を完全に妨げられるわけではないが、元来数百万年から数千万年もかかって形成されたものなので耐久性が高く、長期にわたって安定した隔壁（天然バリア）になる。高レベル放射性廃棄物の地層処分では、両者の長所を生かして、廃棄物の放射能レベルが高い1,000年程度までの期間は、人工バリアによって完全に封入し、放射性が低くなった後の数千年・数万年の長期については、原則として天然バリアの隔離能力に期待することになる。

高レベル放射性廃棄物の場合には数千年から数万年、低レベル放射性廃棄物の場合でも数百年という長期間確実に閉じこめなければならないために、従来にはない高信頼性の技術が必要になる。地下に造られた構築物の耐久性や岩盤の隔離性能の持続性が必要であり、さらには長期の間に発生するかも知れない天然現象等や地質環境の変化に対しても十分な安全性が要求される。従来の工学的課題では、せいぜい数十年程度の耐久性が保てれば十分であった。数百年以上にわたる現象を実験によって確かめることも困難である。数千年・数万年にわたる現象は地質学的手法でしか調べることができない。

放射性廃棄物処分では、超ウラン元素のような自然に存在しない元素の挙動や、また放射線の照射による周囲の人工バリア等への長期的影響のような問題がある。しかし、地層処分の課題の多くは、通常にも潜在しているが、リスクが極めて小さいためほとんど意識されていないような問題である。地質事象でも、大地震の震動による被害のように影響範囲が広く、数十年の間でも、発生する危険が予測される場合は、通常の構築物の建造に当たっても検討されている。しかし、断層活動の直接的影響のような確率の低い事象まで問題になることはほとんどなかった。多くの地質事象のような極めて遅くかつ稀な事象まで検討の対象となるのは、それだけ地層処分における安全性への配慮が長期にわたるためである。さまざまな病気が克服され、人間が長生きできるようになってくると、それまで潜在して問題にならなかった病気が表面化してくるようなもので、通常の建造物などでは問題にならないような稀な現象まで、地層処分の長期安全性における研究においては検討の対象となる。

日本では、現在は地域を特定せずに、地層処分の研究

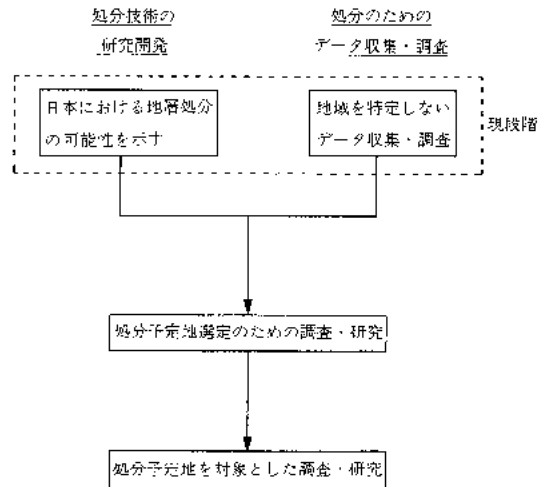


図-1 日本における地層処分研究開発の段階

をしている段階である。国内で処分適地を見いだす可能性を調べ、高レベル放射性廃棄物処分の長期安全性を確認する方法を開発しようとしている（図-1）。しかし、一口に地下といってもその条件には大きな違いがあり、日本の国内でも場所によって地質条件は千差万別である。現在の研究段階では、あらゆる可能性を考慮しておかなければならないが、その一方で、対象となる地域が不特定なので抽象的で画一的な議論になりやすい。ここでの議論は、今後の詳細な研究のための準備段階として考えていただきたい。

2. 海外における最近の地層処分研究動向

海外では放射性廃棄物の地層処分のための膨大な研究開発が実施されていることは周知の通りであるが¹⁾（表-1）、実際の高レベル放射性廃棄物の地層処分は、まだどここの国でも実施されていない。高レベル放射性廃棄物対策は科学技術上の最重要課題であり、しかも本質的に長期的問題であるから、各国とも研究開発は全力を挙げて進めている。しかし、量が少なく冷却期間も要するという特徴もあって、処分の実施に至るステップは慎重に進めている。また、いわゆる“NIMBY (Not In My Back Yard)”効果によって、一部の国では必ずしも計画どおりの研究開発が進められていないことも事実である。

表-1において、上位の国が研究開発が進んでいるとは限らないが、地域目標が絞られ、原位置試験が実施しやすいと思われる。ドイツ（西独）は岩盤層に、ベルギーは粘土（シルトに近い）層に早くから目標を絞って研

表-1 高レベル放射性廃棄物地層処分の開発状況

処分候補地を 1 箇所に絞り調査中	ベルギー (シルト層) ドイツ (岩塩) アルゼンチン (花崗岩) 米 国 (凝灰岩)
複数の処分候補地を調査中、および地下研究施設で実験中	スウェーデン (花崗岩) スイス (花崗岩・堆積岩) カナダ (花崗岩) インド (花崗岩・片麻岩)
複数の処分候補地を調査中	フィンランド (花崗岩) イタリア (粘土層) スペイン (花崗岩・岩塩・粘土層) ソ連 (岩塩・結晶質岩)
処分候補地を特定せずに研究開発を実施中	日本 (堆積岩・結晶質岩) フランス (花崗岩・岩塩・粘土・片岩) オランダ (岩塩・粘土) オーストラリア (未定) 英国 (未定) 韓国 (未定) 南アフリカ (花崗岩) 台湾 (花崗岩・堆積岩)

究開発を進めている。また、アルゼンチンは、南部のパタゴニア地方の花崗岩体を処分候補地として研究開発を進めていることが注目される。

米国は、1982年核廃棄物政策法に基づき、第一処分場候補地を 3 地点に絞って調査していたが、1987年に政策法を改正してネバダ州ユッカマウンテン以外の候補地の調査を打ち切った。しかし、ネバダ州の強い抵抗にあっている。現在、ユッカマウンテンの凝灰岩地域が地層処分に適したサイトであるか否かを調べるためのサイト特性調査の実施をめぐって、連邦エネルギー省とネバダ州政府が争っている。ユッカマウンテンにおける科学技術上の論争点は、断層活動等の地殻変動・火山活動・地下水汚染・未来の気候変動による地下水面の変化・不飽和帯中の水分や気体の動き・資源探査のための人間の侵入の可能性などである²⁾。他方、軍事関連活動から発生した放射性は低い長寿命の TRU 廃棄物を処分するためのニューメキシコ州カールスバッドの廃棄物隔離パイロットプラント (WIPP) でも、岩塩層中の水分等が問題になっているが、試験的な処分の開始が許可されて、世界ではじめて長寿命廃棄物の地層処分施設への搬入貯蔵が実現しそうである³⁾。

米国学術会議の地球科学・環境・資源委員会は「高レ

ベル放射性廃棄物処分の再検討」という報告をまとめた⁴⁾。この報告では、米国の高レベル放射性廃棄物処分計画は過度な目標を設定して柔軟性がないために、袋小路に陥る危険を指摘し、調査研究の進展とともに計画や基準を見直せるような柔軟性を持つべきであることを勧告している。

スイスではグリムゼル岩石実験所で原位置試験が行われ、1985年に提出された Projekt Gewähr 報告書が1988年に承認されて、原子力発電所の運転を続けられることになった⁵⁾。スイスにおける主な議論点は、要求されるような特性を持つ十分に大きな規模の岩体がスイス国内に存在するか、カキライト (断層破砕帯が変質などにより固化した一種の圧砕岩で、核種遅延効果が大さい) に沿う地下水流動モデルの妥当性、造山運動などの構造運動の予測は十分かなどで、宿題を残した形になっている。特に、花崗岩体だけでなく堆積岩も対象とすることが勧告され、堆積岩サイトの調査も実施している。

スウェーデンは、ストリッパ鉱山における国際共同原位置試験等、着々と放射性廃棄物処分の研究開発計画を進め、長寿命廃棄物処分の候補サイト選定のための調査が実施されている。また、低中レベル放射性廃棄物を浅海底下の地下空洞に処分していることが注目される。

フランスは複数の処分候補地で調査を進めていたが、現在は候補地での調査は中断されている。イギリスは低中レベル放射性廃棄物の処分システムの開発に力を入れており、将来はそれを高レベル廃棄物処分の研究開発にも役立てる計画のように思われる。

国際原子力機関 (IAEA) では、高レベル放射性廃棄物地層処分に関する安全原則と技術基準を示した⁶⁾。IAEA の基準は各国の最大公約款的なものであるが、北欧諸国は、独自にもっと詳しい基準案を提案している⁷⁾。ここでは、処分場から発生する放射性核種の平均放射能流入量は、対応する天然のアルファ線放出核種の1000分の1未満に制限することが推奨されている。また、サイトは好ましい水文地質学的特性・地球化学的特性を有し、構造運動・地震活動が活発でなく、天然資源が近くにないことが望ましいとしている。

一般的に、処分サイトの選定が近づくにつれ、サイトの地質問題についての議論が活発になる傾向が認められ、地質学的な現象に関する将来予測の正確さについても厳しい論議が行われている。

3. 低確率天然事象

私達の日常生活においても、発生する確率は限りなく低い、それでも発生する可能性を全く否定できないよ

うな天然事象をどう考えるかという問題は常に潜在的に存在する。この適例は、隕石の衝突である。私達は地上で隕石に当たる確率が無視しうるほど小さいのを知っているのに、安心して生活しているわけであるが、その可能性を否定することは決してできない。隕石の衝突を避けようとするれば、地下深くに潜るのが最も有効であるが、極めて稀な現象である隕石の衝突を心配して地下生活をすれば、物笑いの種になるだけであろう。

深さ1000 m 程度まで貫入するような巨大隕石あるいは小天体が衝突すれば、直径数 km のクレーターを作る。このような巨大クレーターは、地球上に古いものが少数しか残されていないので、数万年以上の長期にわたって見ても、地層処分場に巨大隕石が直撃するような確率は無視しうるほど低いことは明らかである。

巨大噴火も、低確率天然事象の典型である。歴史時代には、幸いそれほどの巨大噴火は経験していないが、縄文時代に日本列島の西南部では巨大噴火に伴い、かなりの厚さの火山灰の被覆による被害を受けたため、当時の西南日本の地域文化が減ったことさえあった⁹⁾。しかし、巨大噴火による被害の大部分は噴出した火山灰や火砕流によるもので、このような地表で広がる現象によって地下深部の地層処分施設本体が直接被害を受けることは考えられない。ただし、地表の施設に被害を与えたり、植生を破壊し地表を荒廃させた結果、地下水流を変えて処分施設に間接的影響を与える可能性は考慮しなければならない。

噴火の時などに、地下でマグマが貫入したり、割れ目を作るような場所は、火山の中心部の比較的狭い範囲に限られる。日本は火山の多い国であるが、火山は日本列島の中でも地域的に偏在していて、相当遠い将来にわたっても火山活動は生じないと予想できる地域も広くある。日本における火山活動の歴史・分布については、従来から綿密な研究がなされている。地層処分の長期安全性をさらに確かめるためには、確率は極度に低いとはいえ、火山活動・マグマ貫入の特性に関する研究は今後重要になるであろう。

地層処分場のような地下施設が地震に強いことは既実証されている。直感的に、地下に原因のある地震の影響を地下施設は大きく受けると思込んでいる人も多いが、実際には、地表より地下の方が震動が小さい。今世紀最大といわれるような被害を出した中国の唐山地震の際に、その震源域の地下深部にあった炭鉱の被害が小さかったように⁹⁾、地下の方が震動が小さいことを示す実例が多数ある。また、大きな地震ほど、卓越する波長が長くなり、巨大地震の主要な地震波の波長が処分施設の

単位構造より長いと、施設に対する影響はかえって小さくなることもある。閉鎖後の処分施設が地震によって大きく破壊することは考えられないが、地震の影響によって地下水の流れに変化が起きるとか、長期間における構造上の小さな緩み等によって、地層処分における封じ込め機能が損われる可能性に注意する必要がある。また、断層活動の直接影響として、岩盤の変形や新しい割れ目の開口の可能性などを研究する必要がある。

4. 極めて緩慢な地質学的事象

地質学的な変動は、本質的に極めて緩慢である。人間にとってはあまりに緩慢なため、地質学的変動があることを知ること自体が難しい。日本列島は地殻変動が激しいと言われているが、大陸に比較して相対的に激しいということであって、変動の絶対速度はやはり緩慢である。地層処分場において地盤の隆起があると、地下深部に埋設した効果を減らすことになるが、年平均1 mm 以上の速さで地盤が隆起するような地域は限られている。地下水の汲み上げ等の人為的原因によって、かなり速く地盤沈下が生じることがあるが、このような現象は表層の浅い部分の局地的現象なので、深部にある地層処分施設への影響は特別の場合以外はない。自然原因によって、年平均数 mm 以上の速さで地盤隆起あるいは地盤沈下をしている場所は、プレート境界近くで、プレート間の相互作用の直接的影響を受ける地域がほとんどである。火山や活断層の影響で速い地殻変動を呈する場所があるが、これらは局地的であり、やはり、地質構造から予測できるような場所に限られている。

年平均1 mm の隆起が100万年続けば、合計1000 m の地盤隆起になるので、高レベル放射性廃棄物の地層処分の場合は注意が必要である。極めて緩慢な地質学的事象でも、高レベル放射性廃棄物のように長期の隔離を必要とする場合には、必ずしも無視できない。しかし、変動の予測が正確になされていれば、例えば隆起の予測される地域であれば、より深部に埋設するというような対応策をとれる可能性はある。そのためにも、変動の長期未来予測が重要になる。

5. ナチュラル・アナログと地質学的事象

地質学的事象は、極めて緩慢あるいは低確率であるから、実際の変動の様相を直接観察によって解明できる機会は少ない。しかし、地層中に残された痕跡を地質学的に研究して、過去のできごとを解明し、その過程を復元することができる¹⁰⁾。近代科学は、経験に基づいた実証性を重んじているが、地質学的事象は長期すぎて、人

間の経験だけでは理解が難しい場合が多い。このような場合には、地球の46億年の歴史に学ばなければならない。

地層処分のシステムに部分的にでも類似性のある天然事象を探し出し、その解明によって、実験が困難な長期の挙動を実証的に研究する方法がナチュラル・アナログ研究である。オクロ鉱床の天然原子炉跡は超ウラン元素の挙動を知ることのできる貴重なナチュラル・アナログであるが¹¹⁾、最近の同位体化学の進歩により当時の温度や核種の挙動が詳細に明らかにされ¹²⁾、また、オクロ鉱床の近くに別の天然原子炉も発見されているので、今後さらに研究の進展が期待される。日本のウラン・トリウム鉱床もナチュラル・アナログとして研究が進んでいる^{13),14)}。また、希土類元素も超ウラン元素の一部と化学的に似た挙動をする¹⁵⁾。

ナチュラル・アナログの考え方は、近年広範囲に引用されるようになりつつある。水谷¹⁶⁾は、「反応速度が著しく遅い現象では理論や実験というものはほとんど役に立たない。本質を見極めるには野外の事実を観察し、それを速度論的に解析する以外に方法はない。」と述べている。変形速度が著しく遅い力学現象でも同様のことが言える。地質学的事象の処分施設への影響を解明するには、広い意味でのナチュラル・アナログ研究を欠かすことができない。

6. シナリオ解析

シナリオ解析とは、一種の思考実験であるが、地層処分のように長期かつ複雑なシステムの安全性を評価するために実施される。シナリオの設定法は多様であるが、例えば、地層処分システムに対し将来発生する可能性が少しでもあると考えられる事象やプロセスを網羅的に抽出し、それらの事象やプロセスを組み合わせるにより、さまざまな仮想的な変化の過程（シナリオ）を組み立ててみる。このようにして作成したシナリオの多くは、極めて発生確率が小さいが、比較的高いと思われるシナリオについては、シナリオに合わせてモデルを組み立て、定量的に影響を評価する影響（コンシークエンス）解析を実施する。

シナリオは、もしそのようなことが起こればどうなるかということ、実験的に調べてみるためのもので、シナリオ通りのことが実際に発生するとは限らない。研究のためには、人工バリアが全く機能を失うことを想定してみたり、将来の世代によって掘られたボーリング孔が処分場を直接貫通する事態を想定するといった、現実には起こり難いシナリオまで設定してみることもある。

地層処分のためのシナリオには、さまざまな種類があり、分類方法もまだ定説はないが、基本的には次の4種のシナリオに分類できると思われる。

(1)「通常シナリオ」(normal scenario)は、広義には基本シナリオと変動シナリオの総称である。通常、地層中の移行媒体は地下水とされる。狭義には「最もありそうなシナリオ」を指すが、このシナリオでは少なくとも初期には人工バリアからの放射性核種の漏洩はほとんどないので、研究用にはかえって不便なこともある。

(2)「基本シナリオ」(basic scenario)は、処分システムの性能を研究するための基本にするシナリオである。地下水移行シナリオのうち、処分後の変化がないと仮定したものが採用されることが多いが、最もありそうな変化を加味する(normal evolution scenario)こともある。

(3)「変動シナリオ」(altered evolution scenario)では、処分後に処分場環境が変化したときの処分システムの性能の変化を評価するために、基本シナリオにさまざまな環境変化を加えて解析をする。例えば、地下水移行シナリオに対する地殻変動の影響などを加味する。

(4)「異常シナリオ」(abnormal scenario)は、隕石・小天体の衝突による直接放出のような、基本シナリオとは異なったメカニズムによる放出シナリオである。地下深部にある処分場に直接達するような巨大隕石が衝突する確率は極めて低い。

一般に、直接放出のような異常シナリオにまで発展するような大規模な天然事象の発生する確率は低いが、いったん発生すれば影響が大きいと予想されるため、評価・検討が実施される。地殻隆起のような緩慢な地質学的事象も、例えば100万年というような長期では、処分した廃棄物を地表に直接露出させ、異常シナリオに到達する可能性がありうる。しかし、降起速度が小さいか期間が短いときは、直接露出のような異常シナリオまで達せず、地下水移行に多少の影響を与える変動シナリオ程度にとどまる。

一般に、異常シナリオに達するような大規模な天然事象に比較して、同種の小規模な天然事象の発生する確率はずっと大きい。地震のところで説明したように、小規模な天然事象はほぼ変動シナリオの範囲で扱うことができる場合が多い。通常シナリオ・基本シナリオ・変動シナリオはほとんどの場合広い意味での地下水移行シナリオに帰結するので、地下水移行とその変化をいかにモデル化するかが、シナリオ解析に続く段階で重要になる。

しかし、シナリオ解析は見落としをしないことが重要である。地層処分システムの長期的な性能に係わりがある可能性のあるさまざまな事象を抽出し(表-2)、か

表-2 地層処分シナリオに係わる天然事象とその主な対策

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

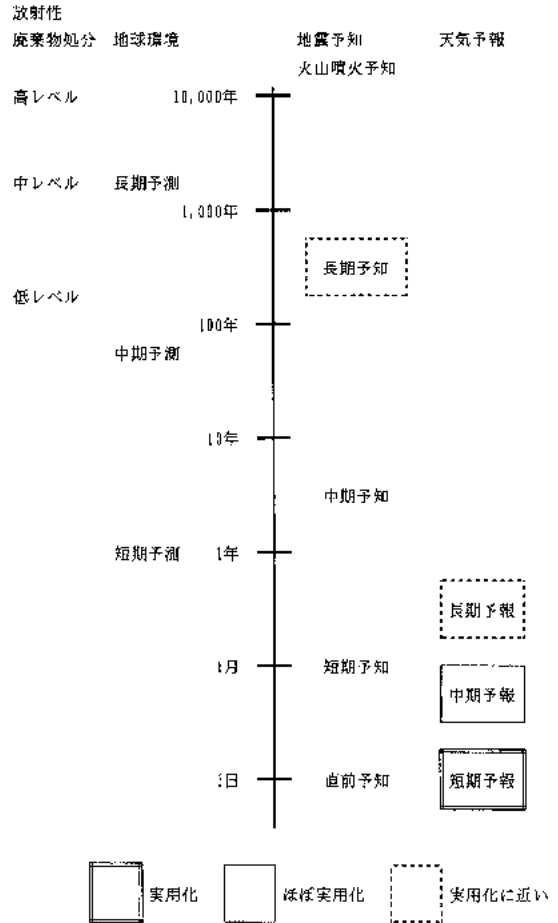


図-2 地球技術における未来予測と期間

なり影響が小さいか確率が低いと思われる事象でもシナリオ解析の段階では検討に加える必要がある。組み立てられた多様なシナリオを分類・選別した上で、定量的な評価の必要のあるシナリオを抽出し、モデル化して影響解析を実施することになる。

7. 地質未来予測

地質事象が、地層処分システムにどのような影響を与えるかを知るためには、結局、地質事象の未来予測が必要になる。地球に関する未来予測の中でも、天気予報は長い歴史がある。また、地震予知や火山噴火予知については組織的な研究開発が実施され、最近では地球環境の未来予測のための研究が始められている。

地層処分はこれらの問題に比べて、はるかに長期の予測を必要とする。その代わりに、地層処分システムは地質環境の変化に対する耐久力が大きいので、大きな変動し

か問題にならない。変動の発生時期はごく大まかに知ることができれば十分であるが、変動の性質や最大変動量の子測が重要である。このような超長期予測の特性は、地球科学の特質にはむしろ合致している。例えば、地震予知の場合、日時を特定するような短期予知はまだ困難であるが、地震空白域や活断層の研究による長期的子測はかなりの精度で可能になっている（図 2）。

地層処分のための長期地球未来予測としては、次の7種の手法が考えられる¹⁷⁾。

(1) 外挿法

過去の傾向をそのまま未来に延長する方法で、事象の継続時間が長く、変化の小さい地殻変動の未来予測には有効である。地球の近い過去を研究する第四紀学やネオテクトニクスが有効であるが、安易な外挿は適切でない場合もある。

(2) 類推法

過去の似た事象からの類推による予測手法で、いわゆるナチュラル・アナログもこの一種である。天気予報や地震のような地球未来予測で最も多く使われる手法である。例えば、地震空白域による地震予知は類推法の一つである。

(3) 確率評価法

現象の生起確率によって定量的に安全性を評価する手法である。天然事象は、しばしば場所や時間によって生起確率が変動することに注意しなければならない。

(4) 実験法

予測対象と似たような状態を人工的に作って実験を行う方法で、室内実験、モデル実験、原位置実験がある。条件をコントロールできるので、現象の本質をとらえるために有効な方法である。

(5) 概念モデル法

概念モデルによって未来予測をする方法である。プレートテクトニクス・モデル等の発展により、大きなスケールの地殻変動の予測が可能になりつつある。

(6) 数値シミュレーション法

予測対象と完全に同じ過去の現象はありえないし、実験も複雑な地下の状況を完全に再現することは不可能である。さまざまな要素が絡みあった現象の未来変化を予測するには、コンピュータによる数値モデル実験が必要になる。ただし、シミュレーションの信頼性を確保するために実験や類推法などによるチェックが必要である。地層処分のモデル検証のために、大規模な地下実験施設の建設やナチュラル・アナログ研究が各国で実施されている。

(7) 安全評価モデル

シミュレーションとは異なり、対象とする現象とは必ずしも似ていないが、安全性を総合的に評価できるモデルを構築する。決定論的モデルと確率論的評価モデルがある。

8. 地層処分のための地下実験

ここまで述べてきたように、地層処分のためにさまざまな研究開発がなされている。しかし、自然は複雑であり、そのすべてが解明されているわけではない。特に、地下深部の現象についての理解はまだ不十分である。そこで、地層処分と同じような深度と環境下での実験が必要になる。地層処分のための原位置試験の目的には、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ージビリティ・スタディ

以上のように、地層処分技術の開発にとって、原位置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、原位置試験は必ず必要なプロセスである。

日本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、日本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、日本の深部地下水の状態を調査する必要がある。原位置試験においても、地下水に関する実験が特に重要である。

日本列島の中でも地質環境はさまざまであるので、処分地域が特定されていない現在は、さまざまな地域の地下深部の地質環境や地下水の特性に関するデータを収集する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 中村治人 (1991): 各国における高レベル放射性廃棄物管理, 原研センタートビックス, No. 20, pp. 1-5.
- 2) JOHNSON, C. A. (1989): Geoscientists help make 10,000-year decisions, *Geotimes*, Vol. 34, No. 1, pp. 12-13.
- 3) GOLDSTEIN, M. (1991): Nuclear waste disposal dilemma; lessons learned from WIPP, *Geotimes*, Vol. 36, No. 8, pp. 5.
- 4) National Research Council, Commission on Geosciences, Environment, and Resources (1990): Rethinking high-level radioactive waste disposal, National Academy Press, 34p.
- 5) 阪田貞弘 (1988): スイスにおける放射性廃棄物の処分, 原研センタートビックス, No. 8, pp. 1-7.
- 6) International Atomic Energy Agency (1989): Safety principles and technical criteria for the underground disposal of high level radio-active wastes, Safety Series No. 99, IAEA, Vienna.
- 7) The Radiation Protection and Nuclear Safety Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden (1989): Disposal of high level radioactive waste. Consideration of some basic criteria, A consultant document.
- 8) MACHIDA, H. (1984): The significance of explosive volcanism in the prehistory of Japan. Geological Survey Report, No. 263, pp. 301-313.
- 9) 銭綱 (1988): 唐山大地震—今世紀最大の震災, 朝日新聞社, 375p.
- 10) 日本第四紀学会 (1987): 百年・千年・万年後の日本の自

- 然と人類，第四紀研究にもとづく将来予測，古今書院，231p.
- 11) 藤井 勲 (1991) : 20億年前の天然原子炉 (オクロ鉱床) を訪ねて，地質ニュース，No. 439, pp. 30-39.
- 12) 日高 洋 (1991) : ナチュラル・アナログとしてのオクロ鉱床—同位体化学的アプローチ—，地質ニュース，No. 448, pp. 46-53.
- 13) 坂巻幸雄，金井 豊 (1991) : ナチュラル・アナログとしてみたウラン・トリウム鉱床，地質ニュース，No. 439, pp. 40-49.
- 14) 金井 豊，坂巻幸雄，瀬尾俊弘 (1991) : 岐阜県東濃地域におけるウラン系列核種の挙動とナチュラルアナログとしての有用性，地質調査所月報，Vol. 42, No. 5, pp. 249-260.
- 15) 上岡 晃 (1991) : 地殻表層部における希土類元素の挙動—東濃ウラン鉱床周辺の例—，地質調査所月報，Vol. 42, No. 5, pp. 275-287.
- 16) 水谷伸治郎 (1991) : 地球表層部における変質の速さを考える，地質ニュース，No. 440, pp. 34-46.
- 17) 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, No. 9, pp. 495-499.

(1991年8月15日受付，1991年11月30日受理)