

「高レベル放射性廃棄物の地層処分はできるか」に対して

『地層処分研究開発第2次取りまとめ』批判への見解

清水和彦 宮原 要

しみず かずひこ みやはら かなめ

核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター
核燃料サイクル開発機構バックエンド推進部(東京事務所)

わが国における地層処分の研究開発は1976年に開始され、99年にはそれまでの成果がサイクル機構の『第2次取りまとめ』として集大成された。適切な場所を選べば、基本的に現状あるいはその延長上にある設計解析技術や安全評価技術に基づき、安全確保が十分に可能であることが示された。この『第2次取りまとめ』については、すでに国によって「わが国における地層処分の技術的な信頼性が示されている」との評価がなされている。しかし、一部には『第2次取りまとめ』の内容について批判的な意見もある。本稿では、そのような批判およびそれらに対するサイクル機構の見解について、主な点を論じる。

地層処分をめぐる動き

原子力発電によって発生する使用済み燃料には、高いレベルの放射能が含まれている。これをいかに処分するかが、原子力の平和利用を推進するうえでの重要な課題となっている。過去には、宇宙処分や海洋底下処分、氷床下処分などのオプションが検討されたが、現在では各国ともに、一定期間、貯蔵管理した後に最終的には地下の岩盤中に処分(地層処分)する方法を目指して研究開発を進めている。わが国では、使用済み燃料を化学的に処理してプルトニウムやウランを回収(再処理)し、再び燃料として使用すること(核燃料のリサイクル)が原子力利用の基本方針となっている。また、再処理した後に残った廃液(高レベル放射性廃液)については、これを安定な状態にガラス固化し、30~50年の間冷却のために貯蔵した後に、地下300m以深に地層処分する方針である。

地層処分の概念は、地下深部の岩盤中に廃棄物を埋設することにより、長期にわたって人間の生活環境から隔離し、将来の世代にも廃棄物による影響が及ばないようにすることである。そのため、地層処分においては、まず火山活動や地殻変動などの影響が小さい安定な地域や岩盤を選定したうえで、そこに多重バリアシステムを構築するという対策がとられる。多重バリアシステムとは、人間が作り上げる「人工バリア」の安全防護機能と、

地質環境が本来的に備える「天然バリア」としての隔離性・包蔵性を組み合わせた多層の防護システムであり、具体的には、ガラス固化した廃棄物(ガラス固化体)を金属製の容器(オーバーパック)に密封したうえで、岩盤の空洞内に粘土(緩衝材)で包み込んで埋設することが考えられている(図1)。

核燃料サイクル開発機構(およびその前身である動力炉・核燃料開発事業団。以下、総称して「サイクル機構」と呼ぶ)は、1976年より高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発を、関係研究機関の協力を得ながら進めている。1999年11月には、それまでの研究成果を取りまとめ、報告書『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次取りまとめ』(以下、『第2次取りまとめ』)として、国に提出するとともに公表した⁽¹⁾。この報告書については、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会が、関連する各分野の専門家からなる分科会を組織して約1年にわたって評価し、2000年10月に「わが国における地層処分の技術的信頼性が示された」とする評価の結果を公表している⁽²⁾。また、『第2次取りまとめ』などを技術的な拠り所として、処分事業や安全規制の枠組み作りが着実に進められつつあり、2000年5月には地層処分の実施の枠組みを定めた「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が成立し、この法律に基づき2000年10月には

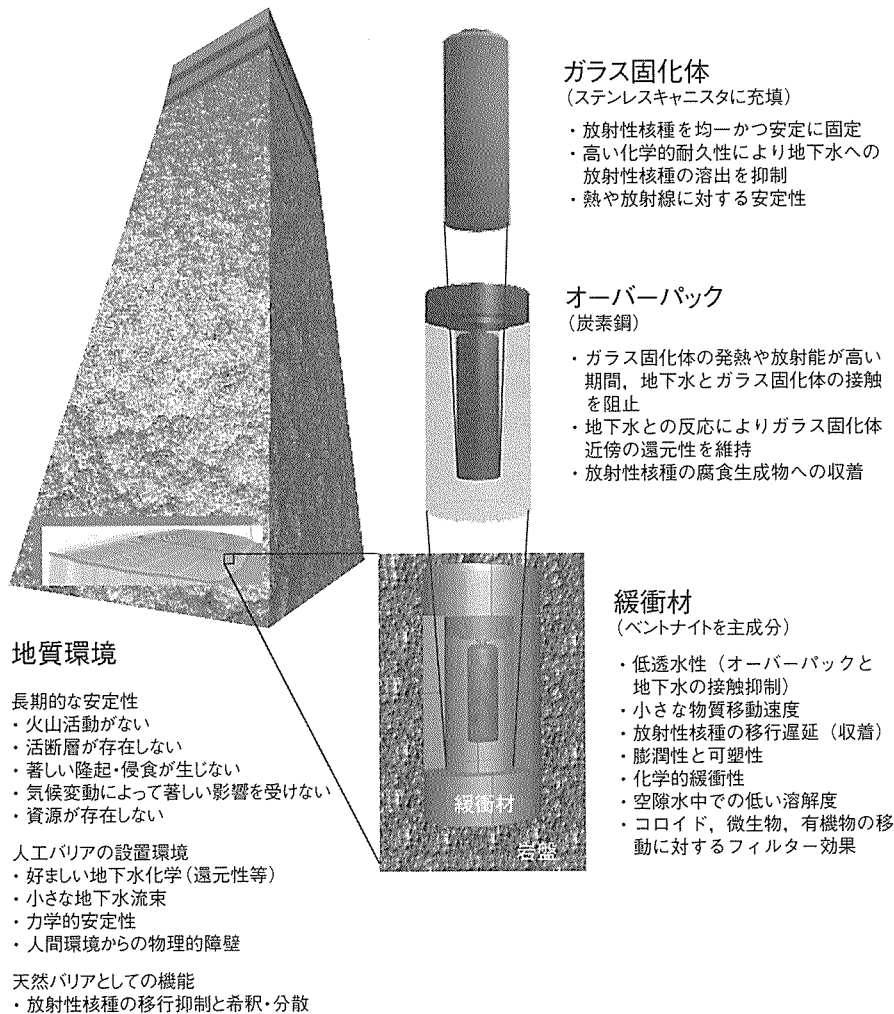


図1—多重バリアシステムの構成要素と期待されるバリア機能⁽¹⁾。

処分事業の実施主体として原子力発電環境整備機構が設立された。

一方で、地層処分の技術的信頼性については批判的な意見もあり、とくに2000年7月に地層処分問題研究グループ(高木学校+原子力資料情報室)が公表した『「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性」批判』(以下、『批判レポート』)は、『第2次取りまとめ』の内容を細部にわたって検討したうえで、技術的な観点から批判を行っている⁽³⁾。これに対しサイクル機構は、このレポートの記述内容の一部には独断や誤解に基づくところがあるとして、2000年10月に『批判レポート』に対する見解を、報告書『「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性」批判に対する見解』(以下、『見解レポート』)として取りまとめ、公表した⁽⁴⁾。

その後、地層処分の信頼性に疑問を呈する論文として、岩波書店『科学』の2000年12月号および2001年3月号に「高レベル放射性廃棄物の地層処分はできるか I, II」⁽⁵⁾⁽⁶⁾が掲載された(以下、『科学12月号』および『科学3月号』と呼ぶ)。この論文の大半は『批判レポート』の内容を踏襲したものであるが、一部、『見解レポート』などを参照して追加された内容もある。

本稿では、高レベル放射性廃棄物の地層処分について広く議論し、理解を深めていただく観点から、『科学12月号』『科学3月号』および『批判レポート』の内容のうち、『第2次取りまとめ』に関連する部分に言及しながら、これらに対するサイクル機構の見解の論点を解説する。技術的な内容は、「地質環境の長期安定性について」「地層処分の工学技術について」および「安全評価につ

いて」に分けて述べる。これらは、『科学12月号』の「地質環境の長期安定性」の問題点および『科学3月号』の「地層処分の工学技術」の問題点と「地層処分システムの安全評価」の問題点に対応している*。

『第2次取りまとめ』の位置づけ

『第2次取りまとめ』は、わが国における地層処分の技術的可能性を示した『第1次取りまとめ』(1992年)を受け、また、その後の研究開発成果に基づき、わが国において地層処分が技術的な信頼性をもって実施できることを示したものであり、処分事業を進めるうえでのサイトの選定や安全基準の策定の技術的拠り所を与えるものである。実際に、上述したように『第2次取りまとめ』を技術基盤として、わが国における地層処分計画は事業化を目指した段階へと踏み出した。ただし、現在の計画によれば、実際に地層処分が開始されるのは2035年前後であり、『第2次取りまとめ』をもって地層処分の研究開発が終わったわけではない。今後は、国および関係機関ならびに実施主体である原子力発電環境整備機構などが、それぞれの役割に応じて、地層処分技術の信頼性向上のための技術開発や深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発を継続していくとともに、地層処分を安全かつ経済的・効率的に実施するための技術開発、あるいは安全性の評価や安全規制のための研究開発を進めていく。国による評価でも、「第2次取りまとめは地層処分の事業化に向けての技術的拠り所となると判断する」としたうえで、「高レベル放射性廃棄物の地層処分は、国民の理解と信頼を得つつ進められていくべきものであり、引き続き、『第2次取りまとめ』の成果を踏まえた技術開発課題への取組や基礎的な研究開発の継続などを通じて地層処分の技術的信頼性をさらに向上することに努めることが重要である」と述べられている⁽²⁾。

* 『第2次取りまとめ』および『見解レポート』の全文をサイクル機構ホームページ上の地層処分研究開発サイト(<http://www.jnc.go.jp/kaihatu/tisou/tisou.html>)に掲載しているので、詳細な内容についてはそちらを参照していただきたい。

ところが、『批判レポート』などでは、『第2次取りまとめ』で示したような処分場の設計や人工バリアの仕様などが、わが国のどの場所でも画的に通用すると主張しているかのように受け取られているようである。これは誤解であり、『第2次取りまとめ』は、これまでの研究開発で得られた科学的知見に基づき、わが国でも地層処分が成立し得ることを、例を示しながら概括的に論じたものである。これにより、地層処分計画を科学的検討の段階から事業化を目指した段階に進めることについての技術的な判断材料とすることを意図している。将来、地層処分のサイトが決まった段階には、その場所の地質環境条件などに応じて処分施設や人工バリアの詳細かつ最適な設計がなされ、これに基づき安全性が具体的に評価されることになる。

地質環境の長期安定性について

(1) 地震・断層活動と活断層

地震・断層活動に関し、『第2次取りまとめ』は活断層に注目して「わが国における主な地震・断層活動が、少なくとも過去数十万年程度にわたり、既存の活断層(帯)で繰り返し起こっていること」を根拠に、地殻の応力状態が安定している地域であれば、今後も同様の状態が継続するものとし、「活断層を避けることにより、処分場が地震・断層活動によって重大な影響を被る可能性を十分に低くできる」とした。

これに対して、『批判レポート』や『科学12月号』では「活断層の空白地域でも、大小の地震が少なからず発生していること」を根拠に、現存する活断層を避けても、将来的には処分場が地震・断層活動による重大な影響を被ることは免れないとしている。

『批判レポート』などが指摘するように、活断層が知られていない地下で地震が発生していることは事実である。これは、地震の際に地下深部で始まった岩盤のズレが地表まで到達しない場合である。一般には、規模(マグニチュード)が大きな地震は岩盤のズレが地表まで到達し活断層として認識できるが、比較的小さい地震は地表に活断

層が現れないとされている(たとえば、松田⁷⁾など)、『批判レポート』などは、将来的には、活断層として認識されないような地下深部に潜んでいた断層が成長して、あるいは新たな断層が発生して、処分場を破断してしまうような可能性を強調している。

しかし、各活断層ごとに活動規模に固有値がある(ひとつの活断層が起こす地震の最大規模はほぼ一定している)と考えられており(たとえば、松田⁸⁾など)、比較的小さな地震を起こす地下深部に潜んでいた断層が、突然、大きな地震を起こして地表に現れる可能性は小さいと考えられる。現在、日本列島にある(存在がわかっている)活断層の多くは、数十万年以上も前から活動を続けており、1000年前とか1万年前に新しくできた(地表に現れた)ものではない。したがって、将来的にもこれらの活断層が繰り返し活動することにより、地殻の中に蓄積されるエネルギーが解放されるため、処分場という限定された領域において、新しく断層が発生する可能性は非常に小さいと考える。

さらに、『第2次取りまとめ』では、「そういった現象が仮に起こったとしたらどうなるか」といった観点で、新たな断層の発生による影響についても評価している。すなわち、処分場を横切るような新たな断層が発生することにより、廃棄物がせん断されて放射能に汚染された地下水が最短距離で生物圏まで上昇してくると仮定して、その影響を試算している。このような想定を行なった場合でも、地表に及ぶと推定された放射線の影響は自然の放射線レベルを大きく超えることはなかった。適切に選定されたサイトにおいて、このような事態が生ずる可能性が低いことを考えあわせると、新たな断層の発生によるリスクは十分に小さいと考える。この点については、後の「安全評価について」の中でも述べる。

地震・断層活動については、調査段階が進んで対象とする地域が限定されていくにつれて、より具体的な検討が可能になる。その結果に基づき処分場が選定され、また処分場のレイアウトなど工学的な対策が施される。さらに、必要があれば、断層活動を考慮した安全評価を行うことも可能で

ある。いずれにしても、未確認の活断層が存在する可能性などにも注意して調査を進めながら、現存する活断層(帯)を避けて処分地を選定していくというプロセスをていねいにたどることにより、処分場が地震・断層活動によって重大な影響を被る可能性を十分に低くできると考える。

なお、現状において、「わが国に存在する活断層がすべて把握されているわけではない」ことは、『批判レポート』などの指摘のとおりであり、その点については『第2次取りまとめ』も認めている。『科学12月号』では、2000年10月に起きた鳥取県西部地震の例をあげて、この点の重大性を強調している。鳥取県西部地震について、『科学12月号』は「これはM7.3(暫定)の大地震だったが、活断層の知られていないところで発生した」と述べている。確かに、既存の活断層分布図には鳥取県西部地震を起こしたとみられる断層は図示されていない。この点については、『見解レポート』でも「これらの活断層分布図がわが国に存在する活断層すべてを抽出したものではなく、未確認の活断層が存在するだろうことは分布図の作成者が共通に認識しているところ」と述べているように、一般論として認めている。しかし、鳥取県西部地震に限って言えば、地震予知連絡会が地震発生直後に行った記者会見などで明らかにされたように、本震およびその余震が起こった線上で、以前から群発地震が観測されており、地下に断層構造があることは認識されていた⁹⁾。

(2)地震・断層活動による影響

断層活動によって岩盤が破断、破碎されることに加えて、『科学12月号』や『批判レポート』では、地震動(地震の揺れ)や広範囲におよぶ岩盤の変形と応力変化の影響を重視し、『第2次取りまとめ』の検討は不十分としている。『科学12月号』の主張は、岩盤中の亀裂が閉じたり開いたりして地下水の流動特性を変化させるなどの効果により、今後10万年程度を考えると、「地震の影響を受けるごとに多重バリアシステムの性能が徐々に変化することは十分に考えられる」「変化の向きは、地下水による放射性核種の溶出・移動を促進する場合だけでなく、抑制する場合もあ

るだろうから、つねに危険を増す方向ではないが、安全性を損なう要因になる場合があることはほぼ確実だろう」というものである。

大きな地震が起こった後、岩盤に変形や応力変化が残ることは十分に考えられることであり、『第2次取りまとめ』でも、岩手県・釜石鉱山での実際の観測結果として、地震に伴って生じた岩盤の残留歪みや地下水の水圧変化のデータを示している。釜石鉱山では、1990年から1998年の8年間に344回の地震が観測された。そのうち地震時に水圧変化が検知されたのは18回で、いずれも数週間うちに元の傾向に戻っており、変化の程度も季節変動の範囲内であった。

地下水の流れは、その地域の動水勾配(地形や地質条件に左右される地下水圧の勾配)と岩盤の透水性によって決定される。『科学12月号』や『批判レポート』が危惧するように、これらが地震に伴う変形や応力変化の影響を被ることは十分に考えられる。『第2次取りまとめ』にも、兵庫県南部地震(1995年)の直後に淡路島北部の広い範囲で観測された湧水と井戸の水位低下や、南海道地震(1947年)の際に道後温泉で観測された源泉の水位低下の例をあげている。ただし、兵庫県南部地震の際の湧水は地表付近の地下水であることが同位体分析によって推定されており、また、南海道地震の際の道後温泉での水位低下は3か月後に回復している(詳細については、『第2次取りまとめ』分冊1 II-40~45を参照)。

そもそも、わが国で地層処分の対象となるような岩盤は数百万年~数千万年前あるいはそれ以前に形成されたもので、現在までに無数とも言える回数の地震動を経験している。ところが、釜石鉱山の地下坑道を利用した割れ目調査の結果によれば、割れ目のほとんどは花崗岩体ができて間もない時期に形成されている。大地震のたびにたくさんの割れ目が発生して、岩盤の透水性がいちじるしく変化していくということではなさそうである。地震に伴い、岩盤中に局所的な応力の集中や解放が起こって割れ目が開閉し、小規模な水流が生じたり、あるいは地下水の混合が起こって一時的に水質が変化するようなことはあるとしても、地下数百m~1000mにある処分場を取り巻く地下水

の流れやその水質が、処分システムの性能に支障を及ぼすほど劇的に、かつ長期にわたって変化するとは考えにくい。

処分場周辺の地下水の挙動については、現地での状態を調べたうえで、安全評価上のパラメータ(動水勾配や透水係数など)を設定し、それにある程度の幅を持たせることによって、処分システムの安全性を十分な余裕を持って評価できると考える。『第2次取りまとめ』では、たとえば動水勾配として0.001, 0.01, 0.1の三つのケースを想定して安全評価を行っている。これによって、場所による地形条件や地質条件の違いはもとより、地震を被ったときの振動や応力変化などの影響も十分に包含できていると考える。

(3) 地下深部の環境に関する技術と知見

『科学12月号』では、「地層処分実現のためには非常に高密度・高精度の地下の情報が必要だが、その探査技術の開発だけでも優に100年以上かかる」や「深さ1000m付近の地下水も浅部との間を循環する地下水であること、大規模な地下処分場を造れば地下環境や地下水循環が変化することは間違いないが、それに関する知見はまだ少ない」といった一部の地球科学者の発言を引いて、実際に地層処分にとって適切な場所が選べる保証はないとしている。

しかし、地層処分実現のために、100年以上もかけて探査技術の開発をしなければならないほどに「非常に高密度・高精度の地下の情報が必要」だろうか。地層処分の長期安全性の観点から、岩盤には人工バリアの設置環境として好ましいことや、天然バリアとして機能することが期待されるが、たとえば、地下深部の地下水は動きが遅く、水質が還元性であるため、金属を腐食したり物質を溶解・運搬する能力が小さいことなどは、現状の探査技術でも十分に確認できる。また、深度数百m~1000mの地下に坑道を掘削して処分場を建設することは、現在の工学技術でも十分可能である。このことは、炭坑や金属鉱山、海底トンネルなどの実績からも容易に理解できる。

『第2次取りまとめ』では、対象とする岩種や地域を特定することなく幅広い地質環境を想定し

たうえて、地層処分の実現性について検討した。わが国の地質環境の多様性や将来の変化、あるいはそれらの不確実性を考慮するため、さまざまな地質環境条件を設定して評価した。また、極端な想定として、天然バリアの機能を無視したケースについても評価を行った。それでも、それらの結果から想定される被ばく線量やその時間的な変化は、個々の条件に応じてばらつくものの、全般的に低いレベルに取まっている。このことは、地層処分システムにおいて地質環境の条件が多少変化しても、全体としての性能が大きく変わるものではないことを意味する。換言すれば、地層処分システムの安全性は、深部地質環境が普遍的に有する、還元性や低透水性などの特性によって決定づけられるものであり、深部地質環境のすべての条件が精緻に把握でき、その将来的な変化が正確に予測できなければ、地層処分の安全性が説明できないわけではない。設定する地質環境条件に、不確かさの程度に応じた適切な幅を持たせることにより、今の地球科学のレベルでも地層処分の安全性を十分に検討することはできる。これが、『第2次取りまとめ』の結論である。

一方、処分場を建設した際の地下環境や地下水循環の変化を実際的に把握した事例が、まだ少ないのは事実である。ただし、全くわからないというわけではなく、ある程度の予測は可能である。サイクル機構では、岐阜県の東濃鉱山や岩手県の釜石鉱山において、坑道掘削による周辺の岩盤や地下水への影響を把握するための研究を実施してきた。たとえば、東濃鉱山の堆積岩中に直径6 m、深さ150 mの立坑を掘削して影響を調査した例がある。その際、立坑を掘削する前に表層での水理観測(気象条件、河川流量等の観測)やボーリング孔を利用した水理試験(透水係数、間隙水圧等の計測)の結果などに基づき水理地質構造モデルを作って、立坑内への湧水量や周辺での地下水位の変化を予測した。予測の結果は、『第2次取りまとめ』にも示したように、立坑の掘削を通じて実際に観測された変化と良く一致した(詳細については、『第2次取りまとめ』分冊1 III-45~50を参照)。現在、サイクル機構では、岐阜県瑞浪市と北海道幌延町において、二つの深地層

の研究施設計画を進めているところであり、ここでは、実際に地下500 m~1000 mまで坑道を掘削して、それによる地下環境や地下水循環への影響を観測したり、そのための手法を整備していく予定である。繰り返しになるが、地層処分の研究開発は、『第2次取りまとめ』をもって終了したわけではない。

地層処分の工学技術について

(1) 工学技術と深部坑道の安定性

『第2次取りまとめ』では、わが国の幅広い地質環境を考慮するため岩盤を大きく硬岩系と軟岩系にわけたうえで、それぞれについて既存の文献データや東濃地域、釜石鉱山における実測値をもとに、一般的な特徴をとらえて処分場の設計検討を行なうための条件を設定した。

これに対して『批判レポート』は、一軸圧縮強度や側圧係数などを例に、実際の岩盤の物性にはバラツキがあるので、平均値のようなひとつの値を前提に設計したのでは坑道の安定性は保てない可能性があるとしている。そして、「当然のことながら以上の結論は、掘削された坑道がどのような場合にも崩壊することを意味するものではなく、『どのような場合にも崩壊しない』とは決して証拠立てられないことを示したものである」と総括している。

しかし、『第2次取りまとめ』は、想定した岩盤条件に対する設計例を示したもので、その設計例がいかなる岩盤にも適用できると主張しているわけではない。将来、地層処分のサイトが決まった段階には、『第2次取りまとめ』に示した設計の考え方を基礎として、岩盤物性のバラツキの程度など、その場所の条件に応じて適切に処分場を設計することが重要である。それは、現状あるいはその延長上にある工学技術によって達成できると考えている。上述したように、土木工学の分野には、すでに鉱山やトンネルなどでの多くの経験があり、また、サイクル機構も、わが国の代表的な岩盤である花崗岩と堆積岩を対象に、地下500~1000 m程度までの深地層の研究施設を建設して、工学技術の確認を行う計画である。『科学3

月号』が「地下深くの処分場建設から閉鎖までの一連の事業が、鉱山開発など過去に類似例はあるものの、規模や条件の厳しさの点で、今後の技術開発を待つ部分が多い」と述べているように、地層処分の工学技術については、鉱山開発や海底トンネルの建設などで培われた技術や、『第2次取りまとめ』に示したような考え方をもとに、今後も技術開発が進められていくのである。

とくに、『科学3月号』では、オーバーパックを埋設する作業を無人化・遠隔操作するための技術開発や処分場を埋め戻すための技術開発の必要性を指摘している。『第2次取りまとめ』でも、オーバーパックを埋設する方法や必要な設備について検討を行っており、その結果に基づき「現状の技術の延長上にある技術を用いて、基本的には廃棄体や緩衝材の搬送・定置を行うことができる見通しが得られた」としている。そのうえで、「今後、これらの概念の実用化に向けて、アクセス施設におけるエレベータの落下や斜坑搬送車両の制御喪失時の対策などの安全性に関する詳細な検討や、遠隔定置に関わる各機構、廃棄体および緩衝材の施工品質(定置状態)などについて実規模試験を通じた確認などが必要となる」と述べている(詳細については、『第2次取りまとめ』総論レポート IV-118~125を参照)。何度も繰り返すが、『第2次取りまとめ』は、必要な技術開発がすべて完了したと主張しているわけではない。今後の技術開発によって、必要な技術を整備していかなければならない、その見通しはある、と言っているのである。

一方、埋め戻しに関し、『科学3月号』は「埋め戻しが不十分であれば、酸素が供給されるなど地下環境の化学的性質が期待通りではなくなって、腐食が進みやすい条件になる可能性もある」と述べている。もちろん、埋め戻しを適切に行うことは重要であり、そのための技術開発は今後も継続していく必要がある。ただし、「埋め戻しが不十分であれば、酸素が供給される」というのは、必ずしも正しくない。施工の仕方によって、埋め戻した部分の間隙が多くなったり、少なくなったりすることはある。そして、その間隙には空気や水が浸透することになる。したがって、処分場が閉

鎖された直後には、多少の差はあれ、埋め戻した部分に空気(酸素)が残留している。ただし、坑道が埋め戻されると、それまで低下していた地下水面が地表付近まで徐々に回復してくる。その後は、残留した酸素は埋め戻し材や緩衝材に含まれるさまざまな物質(たとえば、炭質物や鉄分など)と反応して消費されていき、やがては酸素のほとんど存在しない還元的な環境となる。埋め戻した部分を通して地表から酸素が供給されてくるわけではない。しかしながら、埋め戻し材や緩衝材中に取り込まれた酸素が消費される反応については、まだ定量的な評価ができる段階ではないので、『第2次取りまとめ』では、緩衝材と埋め戻し材中に取り込まれた酸素がすべてオーバーパックの腐食に使われると仮定した。これにより、処分場に残留する酸素による腐食については、相当に安全側(大きめ)の評価になったと考えている。

なお、『科学3月号』は、「処分場を“閉鎖”した後の管理や監視は、処分場近隣の地域で今後何十万年にわたって住民が安心して生活するために非常に重要である」とし、「政府の計画では処分場閉鎖後300年のモニタリングが予定されているが、10万年や100万年といった長い寿命をもつ放射性核種に対してまったく不十分である」「地下深くのモニタリングを長期間続けようにも、寿命がきた測定機器の交換すらむずかしい」と述べている。しかし、『科学3月号』では原子力関係者の定義としているが、「地層処分は積極的な管理や監視を必要としない技術」であることは、国際的に認められた考え方である。むしろ、『科学3月号』が指摘するように、何万年という長期にわたって人間が管理することが困難であるからこそ、人間の管理に依存しない方法として地層処分が選択されているのである。また、その背景には、高レベル放射性廃棄物の問題は原子力発電の恩恵を享受しているわれわれの世代が解決すべきであり、後世に「つけ」を残すべきでないとの国際的なコンセンサスがある。地層処分という発想は、地下深部の地質環境が地表に比べて安定であり、本来的に物質を長期にわたって隔離・保存する能力が高いことに、その根拠を置いている。これは、古代の遺跡が良好な保存状態で地下から

発掘されたり、地質時代に形成されたウラン鉱床やさまざまな金属・非金属鉱床が長期にわたって地質環境中に保存されている、という経験的な事実にも裏づけされている。

(2) 人工バリアの健全性について

人工バリアの健全性について、『科学3月号』と『批判レポート』は、ガラス固化体やオーバーパックスの長期的な変化に関する『第2次取りまとめ』の検討が足りないとして批判している。このうちガラスの溶解速度に関しては、オーバーパックスの腐食により供給される鉄イオン、放射線による内部損傷、ガラスの結晶化、ガラス中での放射能の不均質分布の影響が考慮されておらず、ガラス固化体の溶解は実際には『第2次取りまとめ』の計算よりもずっと早くなるであろうとしている。しかし、『見解レポート』に示したように、『第2次取りまとめ』に当たっては、鉄イオンや放射線によるガラスの溶解速度への影響は小さいこと、およびガラスの結晶化やガラス中での放射能の不均質分布が起らないように品質管理できることを、国内外の研究成果や実証試験などに基づき確認している。そのうえで、溶解速度を1桁高く設定したケースについても安全評価を行っており、ガラスの溶解速度については適切に検討していると考えている。

一方、オーバーパックスについて『批判レポート』は、『第2次取りまとめ』における腐食速度の設定の根拠とした実験の信頼性が乏しいとし、その理由として試験片が小さいことや実験期間が短いことを挙げている。しかし、『第2次取りまとめ』では、実験データをもとに不確実性を検討して評価に用いる腐食速度を注意深く設定しており、地層処分の安全性を検討するという観点からは、現状の知見に照らして妥当であると考えている。たとえば、還元による腐食についての4年間の実験データは、腐食速度が時間とともに低下していく(表面に皮膜が形成されるため)ことを示しているが、腐食速度を設定する際にはこのことを考慮せず、保守的に(初期の値を用いて)設定している。現在、より大きな試験片を用いた実験や長期の実験を継続中であり、将来的には地下施設

内で実規模の試験を行うことも考えている。この点に限らず、今後の研究開発においては、『第2次取りまとめ』で示したような技術や知見を、より現実に近い試験で確認したり、実際の地質環境に適用することを通じて、信頼性をさらに高めていく予定である。

以上の考え方については『見解レポート』に示したが、『科学3月号』でも、人工バリアの健全性に関する実験に関して、「実験は限られた条件を模擬したたかだか数年の期間のものにすぎない」「ガラス固化体の実物で試験したわけではない」として、実験規模や実験期間への批判が繰り返されている。さらには「ガラス固化体の実物を使った実験を非常におこないにくいのが、高レベル放射性廃棄物処分技術の本質的困難の一つである」と述べている。言うまでもなく、ガラス固化体の取り扱いが容易ではない。初期のガラス固化体は、直接接触すれば数秒で死に至る程の放射能を有している。また、その放射能は時間とともに減衰していくが、何万年という長期にわたって継続する。確かにそれは、高レベル放射性廃棄物の処分技術における本質的な課題である。だからこそ、そのようなガラス固化体を如何に安全に取り扱って、処分していくか、そのために努力しているのである。ガラス固化体が有する潜在的な危険性を十分に認識したうえで、わが国の地層処分計画が議論され、必要な研究開発が進められているのである。

『科学3月号』は、ガラス固化体の発熱量に関しても、『批判レポート』の主張を繰り返している。『第2次取りまとめ』では、日本原燃(株)仕様のガラス固化体で貯蔵期間を50年として計算した値を例示的に採用している。これに対し、『批判レポート』は、フランスやイギリスから返還されてくるガラス固化体の方が放射性物質の充填量が多いこと、および国の方針では貯蔵期間は30~50年であり50年は安全側の評価ではないことをもって、『第2次取りまとめ』の取扱いは「合格点以下」としている。『科学3月号』でも、「このように放射線量が高いガラス固化体は、隣に埋設したガラス固化体からの熱の影響を受けないように埋設間隔を広げても、緩衝材温度

が100°Cを越えることがありうる」と述べている。『第2次取りまとめ』では、地層処分の対象となるガラス固化体の大部分が日本原燃(株)仕様のものであることを踏まえて、上記の設定とした。『科学3月号』や『批判レポート』が指摘するように、ガラス固化体の仕様の違いなどにより処分時の発熱量は変化する。『見解レポート』に示したように、発熱量が『第2次取りまとめ』の設定より大きくなれば、その分、ガラス固化体近傍の温度は高くなるが、サイトの地質環境条件に応じて処分場を適切に設計することなどにより対応は可能である。

実際、人工バリア周辺の温度は、廃棄体の発熱量や貯蔵期間のほか、サイトの地温勾配(地下深部にいくにしたがって、温度が高くなる割合)、処分場の深度、岩盤と緩衝材の物性(含水率や熱伝導率)、廃棄体の配置間隔などによって決まるものであり、どれかひとつの条件が厳しくなったからといって、人工バリアの機能が破綻するものではない。重要なことは、サイトの地質環境条件や処分する廃棄体の特性に応じて、適切に処分場を設計・建設し人工バリアを施工することである。『第2次取りまとめ』は、それが現状あるいはその延長上にある技術によって達成可能であることを述べたものである。なお、上に挙げた条件のうち緩衝材の含水率について、『科学3月号』は「緩衝材の初期含水量を高めることで、緩衝材は水をオーバーパックから遠ざけるという役目を果たしにくくなる。初期含水量の数%の違いが緩衝材の最高温度に効いているため、緩衝材の品質管理も厳しく問われるなど別の難点が発生することも考えられ、問題を軽視すべきではない」と述べている。品質管理などの問題を軽視すべきでないのは当然だが、「緩衝材の初期含水量を高めることで、緩衝材は水をオーバーパックから遠ざけるという役目を果たしにくくなる」というのは見当違いである。緩衝材は粘土の一種で、水を含んで膨潤する性質がある。処分場が埋め戻された後は、地下水面が地表付近まで回復してくるので、緩衝材中には自由に地下水が吸収されていくことになる。ただし、その状態の緩衝材中では、水は拡散によって移動するため、その速度は非常に遅

い。また、緩衝材中に含まれている含鉄鉱物などは、水を還元する働きをもっている。また、緩衝材は、これを通過する地下水に含まれる物質を収着する作用がある。このように、地層処分において緩衝材に期待している役割は、地下水の動きや性質を制御したり、物質の移行を遅延する効果であって、オーバーパックと水の接触を遮断することを期待しているわけではない。

安全評価について

『科学3月号』では、『第2次取りまとめ』の安全評価に対し、「放射性核種の挙動などは科学的にまだ明らかでないことが多く、推算値に頼っているものが多い」としている。地層処分システムが及ぼす長期間にわたる人間環境への影響については、適切なモデルとデータの組み合わせによる現在の安全評価手法を用いて評価できるとの国際的な意見集約がある⁽¹⁰⁾。安全評価においては、不確実性が大きかったり、科学的な知見が十分でない場合、現実性を考慮しつつ過小評価とならないよう十分なパラメータの幅を与えるなど、適切にシステムの性能を控え目に見積る安全側にたった考え方にに基づき、適宜簡略な評価を行うことにより安全性の判断に資することができる。

安全評価のモデルについて『科学3月号』では、「コンピュータで計算できるように、ある程度単純なモデル化がなされている。現段階での最善はつくされているとしても、そのモデルがどれだけ現実を反映しているか、とくに危険性を過小評価していないかが問題である」としている。『第2次取りまとめ』では、わが国の幅広い地質環境を対象とすること、また、天然の岩盤が不均質性を有することに配慮し、ニアフィールド(人工バリアとその近傍の岩盤をあわせた領域)の性能に重点をおいた評価を行うこととし、特性がよくわかっていることから天然バリアよりも不確実性が小さい人工バリアに対しては適宜現実性を考慮して核種移行に関わる現象のモデルを構築し、現実的条件で信頼性の高いデータを用いることとした。一方、天然バリアに対しては、地下水の流れる経路を表す概念的なモデルにおいて、処分場

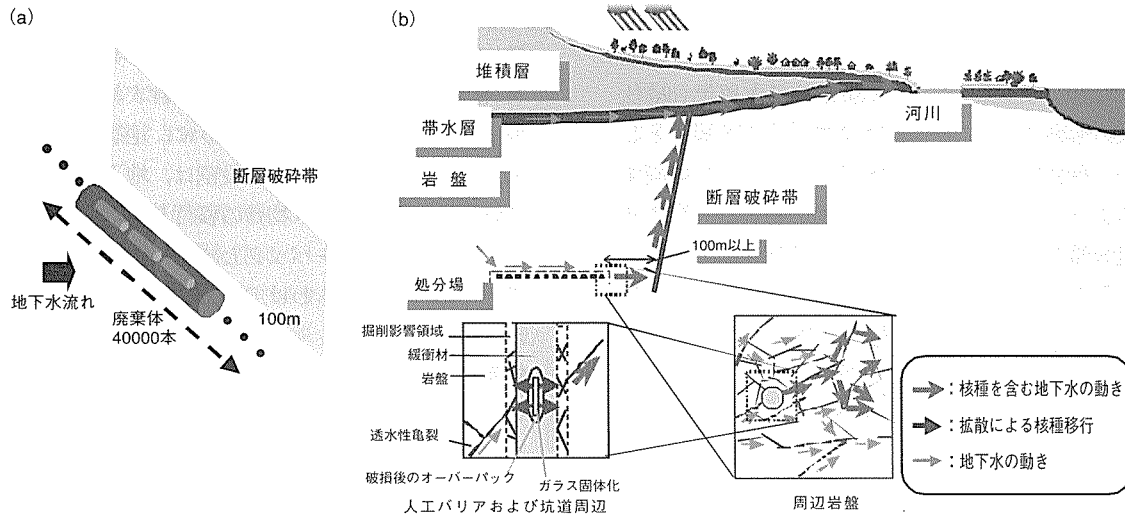


図2—レファレンスケースにおける地下水移行経路概念モデル。

下流側 100 m の位置に大規模な断層破碎帯(地下深部から地表まで鉛直に配置する)が存在することを仮定し、すべての廃棄体(4万本)から断層破碎帯までの距離を一律 100 m とした(図 2(a))。また、処分場から地下水を介して移行した放射性物質が、処分場下流側の岩盤における連続性のある亀裂中を、直線距離にして 100 m 下流側の断層破碎帯へ移行することとし、その後断層破碎帯中を上向きの地下水の流れに沿って、最短距離で地表近傍の帯水層に到達することを仮定した(図 2(b))。このモデルは、地層処分システムの性能を控えめに見積もる安全側にたった考え方に基づいている。したがって、過小評価しているとの批判は適切ではない。

安全評価の解析ケースについて『科学 3月号』では、「考える限り安全側にたった評価を行うことは必要不可欠」とし、「評価にあたっては被曝線量が高くなる場合も十分に組み合わせる必要がある」としている。『第2次取りまとめ』では、図 2 で示した概念モデルに基づき、複数の解析ケースの基準となるレファレンスケースをもとに、

- モデルやデータにともなう不確実性を考慮したケース、
- 地質環境の多様性や処分場の仕様の幅を考慮した多様な地層処分システムに対する解析ケース、
- 天然現象によるシステムへの影響を考慮した

ケース、

- 人間活動が影響を及ぼすケース

などをそれぞれ設定した。システム性能の総合的解析では、すべての組み合わせによる解析を行うのではなく、感度解析で得られた結果をもとに、「過度に保守的」な組み合わせとにならないよう合理的に解析ケースを設定し、可能な限りケース数を減らすことにより、解析の追跡性や評価のわかりやすさを向上させた。

この解析ケースの組み合わせの考え方について『科学 3月号』は、「適切な処分地選定と工学的対策をとるので過度に保守的な設定の評価はしない」としているが、どの程度をもって“過度”とするか自体が大きな問題である」としている。この点にこたえるため、まずどのような要因が安全評価上重要だったかについて述べることにする。『第2次取りまとめ』の感度解析の結果から、地下水の流れが人工バリアと天然バリアの性能に影響を及ぼすために安全評価上とくに重要なことがわかっている。これは以下のような理由による。

岩盤中において地下水は亀裂開口幅や亀裂充填物等の影響を受け、局所的には複雑な動きをしつつ巨視的にみると動水勾配が生じている方向に流れる。岩盤中に人工バリアが設置されると、地下水は人工バリアを迂回するように流れ、人工バリア周辺の特定の範囲内の流れが人工バリア中の拡散で支配される核種移行に影響を与えることにな

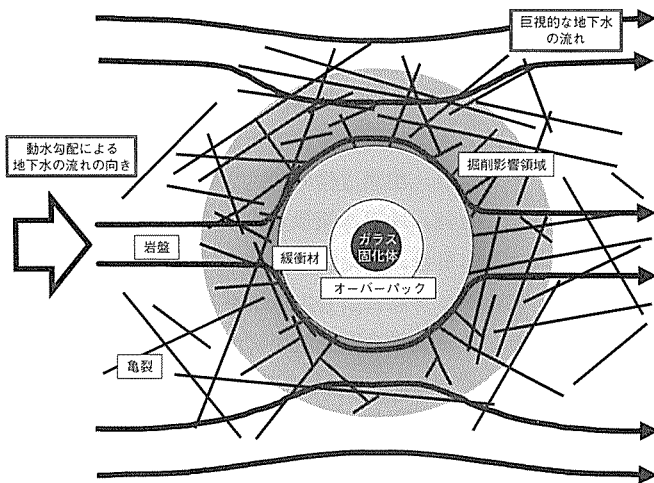


図3——人工バリア周辺の岩盤中の地下水の流れ。

る。その影響範囲内において複雑な動きを示す地下水は完全混合するとみなしてよく、したがって、影響範囲内においては局所的な流速を積分した流量(フラックス)により地下水の流れを代表できる(図3)。『第2次取りまとめ』においては、核種移行に影響を与える人工バリア周辺の岩盤の範囲を、坑道の掘削により水理学的に変化をきたす領域(掘削影響領域)と同じと仮定している。人工バリアから放出された核種は人工バリア周辺の岩盤中の代表値である流量により下流側へ運ばれ、天然バリアである岩盤中を移流・分散・拡散により移行していく。地下水流量が小さい場所へ人工バリアを設置すれば、流量により下流側の岩盤へ運ばれる核種量が少なくなる。また、人工バリア周辺岩盤中に核種が停滞することにより人工バリア中の濃度勾配が小さくなり、その結果、人工バリアから放出される核種量が少なくなる。したがって、地下水流量が小さければ、人工バリアと天然バリアは相互に有効に機能を発揮することとなる。

地下水の流れに関し『科学3月号』は、「地下深くと地表付近の地下水の連絡に解明すべき点が多い」「地下深くの花崗岩についても、地下水の水みちとなる亀裂が、欧米の地質学的変動が少ない地域の岩体に比べて多い」としている。『第2次取りまとめ』で得られた知見に基づけば、地下深部での地下水は地表からゆっくりと移動したものであり、地下水の年代測定の結果では、地表水が地中にしみ込んでから少なくとも1万年以上

が経過していることを示すようなデータ⁽¹⁾も得られている。また、北欧の岩盤に比べてわが国の岩盤が水理学的に決して悪いものではなく、明瞭な亀裂の多い北欧の岩盤よりもむしろ良好な岩盤もあるとの報告もある⁽¹⁾。

また地下水の流れの取り扱いに関し、『科学3月号』は、「地下深くは透水性が低いという、期待されるとはいえどこでも成り立つとはいえない観測例にもとづき、地下水流速を低めに設定している」とし、『批判レポート』では、透水量係数、亀裂頻度、動水勾配の各設定が過小評価であるとしている。これらの点に関しては、『見解レポート』において、

- ・透水系数のデータについて深度400m程度以深では、それ以浅に比べて透水系数が1桁以上小さくなる傾向が認められること、
- ・ボーリング孔内で観察される小さな亀裂は、亀裂ネットワークモデルで対象としたようなスケール(一辺200mの立方体)で見れば、亀裂同士のつながりが乏しく、地下水が流れる経路を形成しない可能性があること、
- ・地下深部の動水勾配は、深度が深くなるほど小さくなるとの実測例があるものの、地形の勾配に応じた地下水面の勾配に比例するものとして、様々な地形を考慮し、動水勾配に十分な幅を見込んでいること

など、『第2次取りまとめ』における地下水流動の取扱いや設定の合理性を述べた(詳細は、『見解レポート』参照)。さらに、地下深部の透水性に

関し『科学3月号』は、「一つの狭い地域のなかでもボーリング孔ごとに大きく異なっていて、100万倍以上ものばらつきがある」としている。透水性のばらつきについては、『第2次取りまとめ』では、6桁の透水係数のばらついたデータに基づき、亀裂の透水量係数の分布を求め、安全評価に用いている。すなわち、このような不均質性によるばらつきを評価に取り込んでいる。また『科学3月号』は、「大地震による応力場の変化で亀裂が開閉するなどして、地下水流速や化学的環境が大きく変化する可能性もありうる」としている。地震や処分場建設の影響については、すでに述べたとおりである。

『科学3月号』は、「限られたボーリング調査や非破壊的な物理探査に頼らざるをえない。そのような測定で、地下深くの地下水の挙動を完全に把握することは不可能に近く、情報の不確定さには慎重でなければならない」としている。また、「例えば、地下水の流速が速いと、放射性核種の移動が速くなって地質などへ吸着される量が減るため、生活圏に達する核種の量が大きく増える。このほかに有機物やコロイドに核種が吸着して、地下水の流れに乗って移動が促進されることも無視できない」「細菌などの微生物が地下の化学的環境に影響を与えたり、放射性核種を移動させたりする可能性もあるが、微生物の影響については現段階ではわかっていないことが多い」としている。これらの不確実性については、段階的にサイトの地質環境を調査することにより適切に取り扱われると考える。『第2次取りまとめ』では、すでに述べたように、人工バリアから漏出した核種が岩盤により核種移行を遅延させる効果などを受けずに直接生物圏に至ると仮定するケースを評価し、諸外国の防護レベルを下回ることを示すことにより、天然バリア中での核種移行にかかわる現象についての理解に不確かな部分が残っていたり、解析に用いる情報が十分に得られていなかったとしても、それらの不確実性に影響されない評価の一例を示すことができたと考えている。『科学3月号』では、生物圏において深井戸を用水とする場合を組み合わせることを求めているが、仮にこのケースに深井戸での用水を組み合わせたとして

も、線量は諸外国で提案されている安全基準の範囲(100~300 $\mu\text{Sv}/\text{年}$)におさまっている。

『科学3月号』の「どの程度をもって“過度”とするか」に関しては、たとえば単純に山地の動水勾配と、地表近傍の透水係数分布を組み合わせることは、地下水流量も大きくなり、処分場の環境としては、いたずらに保守的な設定をしたことになり、それにより、人工バリアにも影響を及ぼすため、線量の評価結果に大きく影響すると考えられる。しかしながら、適切な場所や十分な深度を選ぶことにより、動水勾配、透水係数ともに適切となる岩盤を選ぶことが可能と考えられ、『第2次取りまとめ』においてもこの裏付けを得ている。すなわち、安全評価上の重要な特性に留意しつつ、適切なサイト選定と工学的対策に基づいて注意深く処分システムを構築することは可能である。したがって、このように構築される処分システムに対する安全評価において、実測データなどに基づく不確実性の幅から考えて可能性が十分に小さい、過度に保守的な地質環境パラメータの幅や組み合わせを、必ず起こる(生起確率1)ものとして機械的に与えることは合理的ではない。

以上のことから、『第2次取りまとめ』における取り扱い、地下深部での地下水の流れを現段階において合理的に評価したものと考えている。実際の地質環境に対しては段階的に調査を行い、予備的な設計や安全評価を適宜繰り返すことにより、次の段階で調査する必要のある不確実性を低減すべきパラメータを明らかにし、次の段階の調査計画に反映させることができる。また、調査の進展に応じて適切に調査領域をせばめつつ、ボーリング等の実測データと統計処理により誤差を極力小さくするように地質環境の詳細な情報を得ることにより地下水の流速を把握することが可能である。さらに、地下施設の近傍であれば、トレーサ試験や非破壊的な物理探査により、推定の信頼性を確認することができる。処分事業の実施において、将来サイトが決まった段階には、このように段階を踏んでその場所の地質環境条件などに応じて処分施設や人工バリアの詳細かつ適切な設計がなされ、安全性が具体的に評価されることになる。『第2次取りまとめ』は、地層処分計画を研

究開発だけの段階から実施を目指した段階に進めることについての技術的な判断材料を与えることを意図したものであり、『科学3月号』の「今後10万年以上にわたって地層処分が確実に安全にできることを、特定の場所についてあらかじめ科学的に保証することはしていない」という批判は『第2次取りまとめ』の目的を理解していない。

一方、『科学3月号』は、『第2次取りまとめ』で評価した「断層が処分場を直撃して、人工バリア内から放射性核種が直接生活圏に到達する」という断層シナリオについて、「多少極端な状況の想定」と位置付け、このシナリオにさらに深井戸による用水を組み合わせることを求めている。『第2次取りまとめ』においては、断層シナリオについて、適切なサイト選定と設計により発生の可能性を十分に低くできると判断したものの、仮に発生した場合の影響を例示しておくことは、今後のサイト選定において有益な情報を与えると考え、接近シナリオとして評価した。

断層シナリオの取り扱いにおいては、新たな断層が処分場を横切るとし、その影響を受ける300体の廃棄体から移行する核種は、人工バリア、天然バリアにおいて移行遅延効果を受けずに、断層中を地表に向かって流れる地下水により運ばれ生物圏に至るという簡略かつ極めて悲観的なシナリオを想定した。生物圏については、わが国において代表的と考えられるレファレンスケースで設定した生物圏をそのまま適用することにより、影響の程度を例示することとした。

『第2次取りまとめ』の評価結果は、断層シナリオの発生はもとより十分に小さいと判断でき、発生した場合の影響については、上記の悲観的なシナリオを想定しつつも、天然の放射線レベルをいちじるしく上回らないことから、将来の人々が被ると考えられる放射線による影響が、処分場によっていちじるしく変わることはないと考えてよいものであった。このような接近シナリオの取扱いでは、発生した場合の影響だけではなく、発生する可能性が極めて小さいことや評価の考え方が極めて保守的(影響を大き目に見積る)であることなどをあわせ、総合的に判断すべきものと考え、『科学3月号』で述べているように、深井戸

を組み合わせればさらに線量の値は大きなものとなるものの、このような極めて悲観的なシナリオの計算結果を安全基準と単純に比較し、安全ではないと主張することは適切ではない。このような考え方は、以下に述べる最近の国際的な議論とも整合がとれている。

国際放射線防護委員会(ICRP)は、従来断層シナリオのような発生の可能性が小さいシナリオについて、その発生の確率と影響の積によるリスクを指標として評価することを勧告してきた⁽¹²⁾。これに対し、1993年のICRP Pub. 64⁽¹³⁾において、確率と影響に分けて示すことを提唱した。これは確率と影響の積にしてしまうと、確率の大きさが把握できないことに留意したものである。最新のICRPの勧告⁽¹⁴⁾では、被ばくを評価する上で考慮する必要のあるシナリオとして、自然のプロセスによるものと処分場にボーリングを掘削するなど、将来の人間の活動により直接的に処分システムの性能に影響を及ぼすもの(人間侵入)に大別し、自然のプロセスによるものについては、リスクにより評価するという従来からICRPが提唱してきた考え方をオプションとして残しつつも、個々のシナリオの定量的な確率設定が困難なことに鑑み、線量と事象の発生する可能性を別個に分けて評価する方法を勧告している。この方法では、起こる可能性の高いシナリオに対しては、放射線学的影響を評価する際、線量の基準値として勧告する線量拘束値である0.3 mSv/yと比較する。一方、発生する可能性の小さいシナリオに対しては、そのシナリオが起こる確率の正確な定量化を要求せず、その発生する可能性のおおよその大きさを示すとともに、それが発生した際の放射線学的影響を評価し、評価の保守性も勘案して、それらを総合的に判断することを求めている。

なお、『科学3月号』では、「破局的なシナリオ」として、「人工バリアに大きな不具合がある場合も評価をしておくべきである」としている。『第2次取りまとめ』では、このような工学的対策の初期欠陥に関する解析ケースとして、オーバーパックの不完全な密封や埋め戻し・プラグの施工不良を想定した評価を行い、諸外国で提案されている基準を十分に下回ることを示した。一方、

緩衝材の製作・施工にかかわる不具合については、適切に品質管理し、仮に不備があったとしてもそれを検出し、補修することが可能であると判断し、解析から除外した。仮に、廃棄体1体に対する緩衝材にかかわる不具合について評価を行ったとしても、天然バリアでの核種移行遅延効果を見込むことができるため、断層シナリオでの「廃棄体300体から移行する核種は人工バリア、天然バリアにおいて移行遅延効果を受けず断層中を地表に向かって流れる地下水により運ばれ生物圏に至る」という想定に比べ、影響は十分に小さい(断層シナリオの結果から考えて1~10 μ Sv/年未満)と考えることができる。

さらに、『科学3月号』では、「破局的なシナリオ」のような「事態が地下深くの処分場でおきていないことを長期にわたって常に確認できるようにする手だてが、周辺住民を含む社会全体の安心のために必要不可欠である」としている。

適切なサイト選定と工学的対策に基づき、将来のさまざまな不確実性に対して、システムの性能が十分頑健であり、余裕をもって安全を確保できるシステムを構築できる見通しを『第2次取りまとめ』で得ている。具体的には、適切なサイト選定によって、地層処分にとって重要な天然現象(火山・火成活動、断層活動など)について、過去数十万年以上にわたる活動の履歴が明らかで、少なくとも将来10万年にわたり、システム性能にいちじるしい影響を及ぼすと考えられる事象が発生しないような、地質環境の長期の安定性が見込まれるところを選ぶことができること(地質環境の長期安定性)や、適切な工学的対策により、将来の人間活動による影響や地表環境の変化による影響を被りにくいよう、適切な深度を設定すること(適切な処分深度)などにより、恒常性のあるシステムを構築することができる。『第2次取りまとめ』に基づく頑健なシステムの構築例を図4に示す。

今後に向けて

『科学3月号』では「地層処分を確実に安全におこなうために、何がどうわかっていないのかと

いう問題意識がみられない」としている。地層処分の安全評価の目的は、処分システムの将来挙動を正確に予測し、将来の人間への影響を言い当てるものではなく、地層処分システムの性能を現在適用できる安全指標と対比して、地層処分の技術的信頼性を判断するための材料を提供することである。すなわち、個々の計算結果である数値に絶対的な意味があるわけではなく、さまざまな条件を考慮するという手続きや、それをシナリオ、モデル、データで表現する方法、それらに基づく解析の結果などを総合的に評価することにより、地層処分の安全性が判断されるのである。処分システムの将来挙動に関連する現象のメカニズムが完全に解明され、地質環境に関する詳細な情報がすべて得られなければ安全評価ができないということではない。

『第2次取りまとめ』では、わが国における地層処分概念の成立性や安全評価の信頼性を示すため、ここで述べた天然バリアの機能を無視したケースのように評価の考え方のほか、たとえば以下のような側面から評価結果を支持する知見を提供している。

- 補完的解析: 地層処分が長期間にわたって天然の放射線レベルに有意な影響を及ぼさないことを確認することにより、線量評価を補完するために、生物圏での長期予測の困難さに伴う不確実性の影響を被りにくい指標の例として放射性物質の濃度を用いた解析結果をあわせて示している。
- 諸外国の安全評価結果との比較: 対象とする地質環境や廃棄体の特性に違いはあるものの、各国の安全評価では、適切なサイト選定と工学的対策が施されれば、防護レベルを十分下回るとの結論で一致している。
- 多重バリア性能の冗長性: 人工バリアとその近傍の数十m程度の岩盤により、十分な放射性物質の保持性能が期待できることがわかっている。このことは、人工バリアの近傍よりさらに外側の岩盤による放射性物質の保持性能が期待できればさらに安全性を高めることを意味する。
- ナチュラルアナログによる傍証: たとえば、

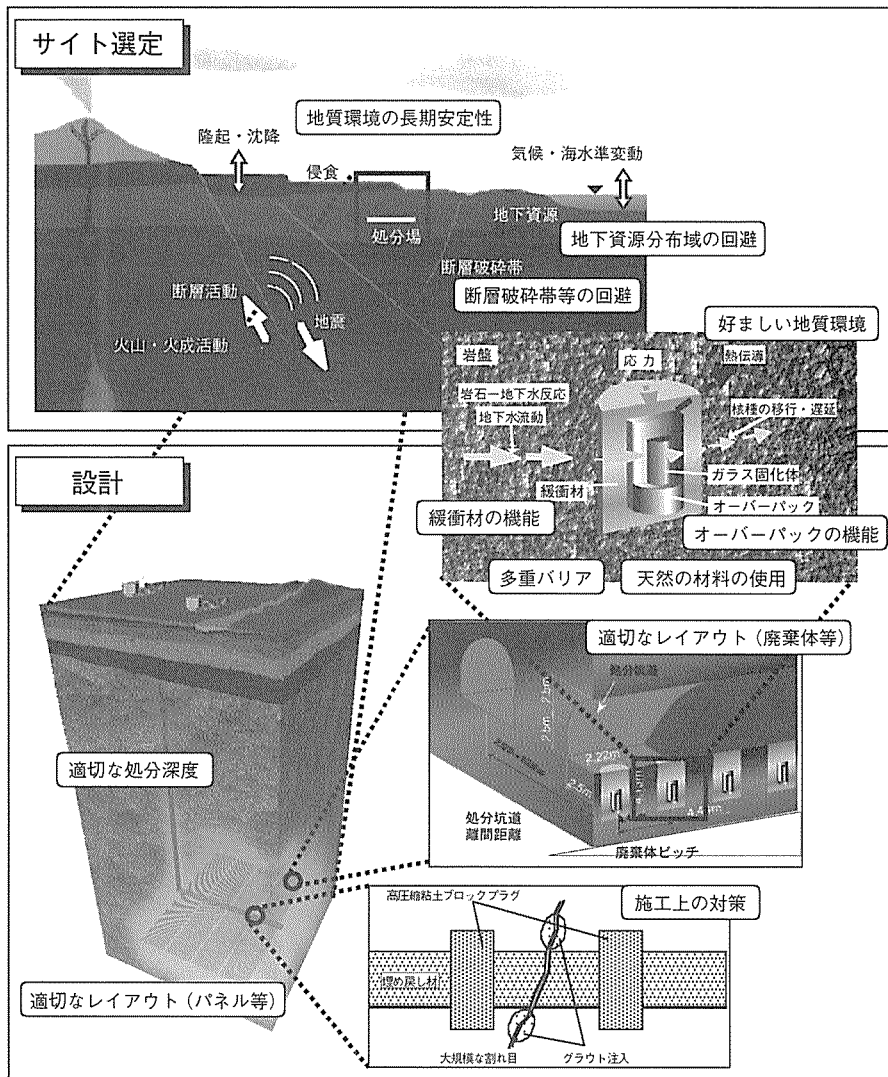


図4—適切なサイト選定と工学的対策による頑健な処分システム構築の例。

東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究では、さまざまな地質環境の変化にもかかわらず、地下深部に存在するウランが極めて長期にわたり保存され、人間環境に有意な影響を及ぼさなかったとの事例が確認されている。これは、その研究対象とする地質環境の条件に依存するものの、地層処分システムのもつ安全機能を傍証するものと考えることができる。

『科学3月号』で、「ナチュラルアナログから、地層処分がうまくいく例があることを示せても、必ず安全にできることまでは保証できない。大事なのは、地質中に保存された場合と保存されなかった場合の条件の違いを明らかにして、望ましい

条件が現実の処分場でどれだけ長期間確実に実現するのかを検討することである」と述べているように、ナチュラルアナログ研究において、対象とする研究事例の環境条件が、実際の地層処分の条件とどのような違いがあるのかを明らかにすることが重要である。『第2次取りまとめ』では、この点に留意し、天然ガラスや金属材料の考古学的出土品、ウラン鉱床などの事例を整理した。あくまでナチュラルアナログは、安全評価の信頼性を高める論拠の一つとして示しているのであり、これだけをもって、安全な処分が実現できると述べているわけではない。

また、『科学3月号』では「不安を抱かせるような数字であっても、それを社会に示していくこ

とが信用につながるであろう」としている。『第2次取りまとめ』では、適切なサイト選定と工学的対策を前提に、わが国において地層処分が成立することを幅広い地質環境条件を考慮して示した。すなわち、個々に想定される最悪の条件を組み合わせた評価や、処分システムの性能が破綻するような非現実的な条件の提示は、あえてしていない。何故なら、適切なサイトを選定し適切な工学的対策を講じるという現状あるいはその延長上にある技術により達成しうることに基づき、システムが期待どおりの性能を発揮し、安全性を確保できることを確認することが『第2次取りまとめ』の目的であるからである。処分地が選ばれていない現段階における『第2次取りまとめ』のような簡略かつ保守的な評価において、地層処分の成立が困難な条件を想像して並べ立てることは、今後のサイト選定や安全審査のプロセスに対して不必要な制約を与えてしまうと考えたからである。このような検討は、段階を踏んで注意深く進めていくべきものである。

今後、安全基準の策定や処分地の選定が進めば、地層処分の安全性は処分地に対する設計や安全評価に基づき具体的に検討されることになる。また、その結果については、安全規制等の手続きに基づいて判断されることになる。さらに、処分場の建設、操業、閉鎖などの各段階においても、地質環境の条件などを確認しつつ、くり返し安全性の確認がなされていくと考えられる。

冒頭に述べたように、わが国の地層処分計画は、研究だけの段階から事業化を目指した段階へと一歩踏み出した。しかし、研究開発は終わったわけではない。『第2次取りまとめ』までの研究開発は、サイクル機構が中核的推進機関となって進めてきた。今後は、国の基本方針に基づき、実施主体である原子力発電環境整備機構、国および関係機関が、それぞれ役割を分担して研究開発を進めていくことになる。サイクル機構は、『第2次取りまとめ』で示したようなこれまでの研究開発成果を踏まえ、今後とも深地層の研究施設や実核種を用いた室内研究施設等の研究資源を活用し、深

地層の科学的研究、実測データの着実な蓄積とモデル高度化による地層処分技術の信頼性の向上と安全評価手法の高度化に向けて研究開発を着実に推進していく。そのため、これまでも増して関連するさまざまな分野の専門家や研究機関の参加と協力を得て、また、サイクル機構の研究開発に対する批判的な見解についても真摯に受け止め、研究の内容や成果を広く社会に情報発信しながら、品質の高い研究開発を透明性をもって進めていく所存である。

文献

- (1) 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次取りまとめ, JNC TN1400 99-020-025 (1999)
- (2) 原子力委員会: 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価, 平成12年10月11日, 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会(2000)
- (3) 地層処分問題研究グループ: 「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性」批判, 地層処分問題研究グループ<高木学校+原子力資料情報室>(2000)
- (4) サイクル機構: 「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性」批判に対する見解, JNC TN 1410 2000-008(2000)
- (5) 藤村陽・石橋克彦・高木仁三郎: 科学, 70, 1064 (2000)
- (6) 藤村陽・石橋克彦・高木仁三郎: 科学, 71, 264 (2001)
- (7) 松田時彦: 地震研究所彙報, 65, 289(1990)
- (8) 松田時彦: 活断層, 岩波新書(1995)
- (9) 地震予知連絡会: 第139回地震予知連絡会記者レク資料, 平成12年10月10日, 国土地理院(2000)
- (10) OECD/NEA: Disposal of Radioactive Waste: Can long-term Safety be Evaluated? An International Collective Opinion(1991)
- (11) 小島圭二: 応用地質, 23(2), 45(1982)
- (12) ICRP: Radiation protection principles for the disposal of solid radioactive waste, ICRP Publication 46(1986)
- (13) ICRP: Protection from the potential exposure: A conceptual framework, ICRP Publication 64 (1993)
- (14) ICRP: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 81(2000)