高レベル放射性廃棄物は、放射能が十分に低くなるまで人間の生活環境から長期間にわたり隔離する必要があるため、深い地層中に処分することが検討されている。1999年には「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」としてその成果が明らかになった。ただ、東北地方太平洋沖地震をはじめとする自然事象が発生しているため、資源エネルギー庁は専門家に依頼し、わが国において地層処分を行えるような長期間安定した地質環境が存在するのかに関して、最新の科学的知見を反映した再評価を実施した。また、地層処分の国民理解を促進するため、地層処分に考慮すべき科学的特性を全国地図として表した科学的特性マップを提示した。

そのような地層処分の実施に向けて中心的な役割を果たしているのが原子力発電環境整備機構（ＮＵＭＯ、東京都港区）である。日本の原子力発電事業に伴って発生する特定放射性廃棄物の最終処分を実施する唯一の事業者であり、安全で確かな地層処分を目指す技術開発を行い、その成果の普及に努めている。その一環として最新の成果をまとめた包括的な技術報告書が公表された。

そこで、包括的技術報告書をもとに、梅木博之・ＮＵＭＯ理事、藤山哲雄・ＮＵＭＯ技術部技術開発統合グループマネージャー（ＧＭ）を取材し、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業について特集した。

放射性廃棄物の地層処分　国民の信頼得るために

人工と天然のバリアで数万年隔離「科学的に可能」

ＮＵＭＯ技術部の藤山哲雄・グループマネージャーにインタビューし、包括的技術報告書で示された内容についてまとめた。

インタビュー

ＮＵＭＯ技術部　藤山哲雄・グループマネージャー

――まず報告書をまとめるにあたって、その意図はどこにあるのですか。

この報告書は、地層処分の実施主体として、わが国の地質環境に対して安全な地層処分を実現するための方法を説明し、実現に向けた技術をはじめ科学的な知見を包括的に示したものです。これを社会に示すことで「なるほどここまで考えているのか」と技術の面で信頼を得られたらと考えております。

――そのために報告書で具体的に示されていることはどのようなことですか。

安全な処分場を造るために大きく3つの柱を設定しております。まずいかにして地層処分にとって好ましい地質環境を選ぶかということです。次に、その選んだ場所で安全性に十分な余裕を持った処分場を造るために、どのような設計をしていくのかです。そして、その処分場が将来数万年以上において、確かに放射性物質が人間に有害な影響を与えないことを、解析技術を駆使して評価し、これならば安全だと確認することです。

これら3つの柱がしっかりとした技術的根拠を持って説明されているということが前提ですが、現段階では処分場の候補地が決まっておらず、活用できる情報に限りがありますので、今後さらに信頼性を得るための技術課題として何をすべきかを抽出する点にも報告書では触れております。

――最初の段階として、どのような地質環境を選ぶのかについてです。

地層処分は、地下深くの地質環境中には何億年前の化石が見つかるように非常に長い間安定な場所があるわけで、廃棄物をそのような安定な地下深部に置いておけば、放射性物質は長期間地下深くにとどまり、安全が確保できるのではないかということです。

――場所については、適正なところが見つかったとして、そこにすぐに処分してよいのですか。

そこは念には念を入れて、人工的に放射性物質の動きを抑えるような施設にします。どのような設計をしていくのかです。そして、その処分場が将来数万年以上において、確かに放射性物質が人間に有害な影響を与えないことを、解析技術を駆使して評価し、これならば安全だと確認することです。

これら3つの柱がしっかりとした技術的根拠を持って説明されているということが前提ですが、現段階では処分場の候補地が決まっておらず、活用できる情報に限りがありますので、今後さらに信頼性を得るための技術課題として何をすべきかを抽出する点にも報告書では触れております。

――最初の段階として、どのような地質環境を選ぶのかについてです。

ボーリング調査など既存の技術や方法を駆使します。重要なのは、いろいろな方法を組み合わせて、地層処分にとって必要な条件を満たす地質環境、例えば地下水の流れが十分遅いかとか、地層が極端な化学的特性（酸性やアルカリ性など）を持っていないかなどを把握することです。

――我々はそれを見ることができないわけです。数万年という期間じっと機能しているのですか。

それを説明するためには、将来そこで起こり得る処分場の状態と廃棄物の動きについて、科学的・技術的な知見をもとに数学的なモデルを設定し、コンピューターを用いた数値計算を駆使し、予測を行います。こうなるであろうとの予測なので、確定的なことは言いにくいのですが、将来の予測には不確実性があることをあらかじめ考慮し、いろいろなケースを想定したシミュレーションを行って予測しております。その結果は、報告書に示されておりますが、廃棄物を天然の岩盤と人工的な対策の組み合わせによって長期間閉じ込めることは可能であること、そのあいだに廃棄物に含まれる放射能は減衰するため、遠い将来、仮に地表に放射性物質が出てきたとしても、人間に有害な影響を与えることはないことが確認できています。

――日本にそのような安定な場所があるのですか。火山はあるし地震も多い。

確かに日本は火山や活断層が多いですが、国土のすべてがそれらに覆われているわけではなく、数百万年、数千万年といった長い期間、大きな変化が生じていない安定な場所が広く存在します。重要なのは、ある地域が決まって、そこの地質環境が数千万年前から今現在までどのような歴史をたどってきているのかを丹念に調べることです。現在の科学技術を使えば評価することはできます。それをもとに将来の地質環境はこうなるであろうとの予測をします。その結果、この地域に将来火山が生じる可能性はあるのか、地層の隆起が生じても地質環境の特性に大きな変化はないか、といったことを評価します。報告書では、その予測も既存の技術を使えば可能であることを示しています。

――具体的にはどのように処分場を設計しているのですか。

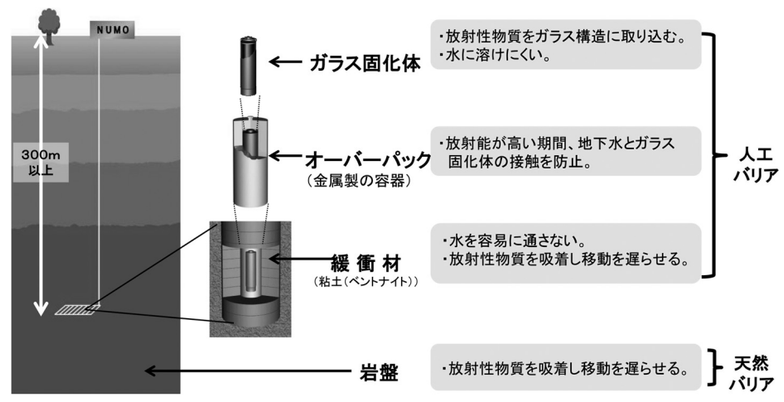
地下500㍍と1000㍍を例として処分場の設計をしております。基本的には、天然の岩盤（天然バリア）、金属製の容器とベントナイトという水を通しにくい粘土で覆う人工バリアが形成する多重バリアで、廃棄物を取り囲むということになります。それも日本の地質環境の特徴、例えば断層や割れ目が多く存在するといった状況に合わせた形で設計しており、それに見合うような材料を提示できるように一連の設計の考え方や方法をまとめてあります。

――将来どうなるかという話が中心となりましたが、処分する前の段階はどうなっているのですか。

処分場を閉鎖する前、廃棄物を処分施設まで運んできて、地下に埋めていく間の操業中ですが、万が一事故を起こして、運搬中に廃棄物を落としてしまったとか、廃棄物に強い衝撃が加わるようなことまであえて想定し、埋め戻す前の状態についてもしっかりとした安全性の評価を行っています。この結果、想定外のことが起きたとしても、容器が耐えて放射性物質が周辺に影響を及ぼさないことが確認できています。

――最後になりましたが、報告書のポイントをまとめてください。

1999年の「第2次取りまとめ」によって、わが国において地層処分が成立しうることが科学的根拠をもって示されましたが、本報告書は、それ以降の研究や技術開発成果を取り入れ、地層処分を実施するための技術をより詳細に、実践的にしています。特に、地下深部の地質環境のデータが蓄積されたことを反映してわが国の代表的な岩種の地質環境モデルをつくり、処分場の設計や安全性の見通しを確認したことは、わが国における地層処分の信頼性をより説得力をもって示すことができたと考えています。ただし、本当の安全性は、処分場の候補地が決まり、その場所の調査結果を踏まえた処分場の設計と安全評価の結果をもって確認すべきものです。それを的確に行うために、今後とも技術の信頼性向上に引き続き取り組んでいきます。



梅木博之・NUMO理事

包括的技術報告書について

科学技術の背景を整理し提示
安全性を説明する姿勢 常に

2000年に特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律が成立し、原子力発電環境整備機構（ＮＵＭＯ）が設立され、地層処分に向けて事業が進められてきたわけです。ＮＵＭＯは、高レベル廃棄物を受け入れていただく地域を探すという重要な責務がありますが、それと並行して様々な研究開発、技術開発を関係機関とともに進めてきたところです。第2次取りまとめ（わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分について30年以上にわたる研究成果を取りまとめたもの）において、わが国でも地層処分が成立しうることについて、いろいろな評価を受け、事業に入りました。その後も信頼性を高めるための施策を進めてきましたが、2011年3月の東北地方太平洋沖地震による東京電力福島第一原子力発電所の事故を踏まえて、わが国における地層処分の技術的信頼性について、今一度現時点での知識のベースを見直し、取りまとめて広く国民に示したのが今回の包括的技術報告書です。

わが国における地層処分の技術開発が信頼の持てる安心できるものなのかを改めて示すこと。また、これから処分地を受け入れていただく地域が現れた時に、すぐにでも技術的な対応ができるのかについて返答できるようにすること。これらの意図、メッセージがきちんと伝わるように科学技術的なバックグラウンドをきちんと整理し、体系立てて分かりやすく提示できたことが特徴です。

地層処分技術とは、科学技術の進歩をはじめ関係研究機関で得られた成果を生かして初めて成り立つ学際的な領域です。ただ、得られた成果は膨大なものとなっており、それを適切に取り扱って報告書としてまとめあげるのに苦労はしましたが、各分野とのコミュニケーションを図り、全体として整合性のある論理構成になっているかという点を工夫しました。

特に報告書は、国際的なスタンダードに倣って安全な地層処分を実現するための方法が説明できるように、国際機関（ＯＥＣＤ／ＮＥＡなど）が示すセーフティケースの作成の考え方を参照して作成しました。セーフティケースの趣旨は、今我々がもっている科学技術的な知識、インフラをもとにその都度更新して常に説明し、社会に確認してもらうという作業に努めるのは、実施主体としては当然のことです。今後受け入れる地域が出てきたならば、この報告書の雛形をあてはめていくという意味では、これから長い事業期間の中で1つの指針になると考えております。

報告書をどのように活かしていくのかについては、技術的な信頼性をさらに高めるため、今後どのようなことを技術開発していけばよいかについて考慮しつつ、国とも適宜相談し、日本全体としての研究開発計画に方向性を与えることに活かしていきたい。また、報告書は現在、日本原子力学会のレビューを受けているところです。また、すでに全国で資源エネルギー庁とともに対話活動を行っております。今後、ＯＥＣＤ／ＮＥＡの国際レビューを受けて、それを踏まえて地層処分技術の安全性を広く理解していただく材料として活用していきたいと考えています。

日本の地層処分技術を考える

【高レベル放射性廃棄物とは】

日本では、原子力発電所で使い終えた燃料を再処理し、資源として利用できるウランやプルトニウムを取り出すことにしている。この再処理の過程で発生する高レベル放射性廃液をガラス固化したものが高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）である。現在原子力発電所などには、約1万8000㌧の使用済み燃料が保管されており、これを今後再処理すると、すでに再処理された分を合わせて、ガラス固化体の本数は約2万5000本相当となる。

この大量のガラス固化体をどうするのか。これはこれまで経済的で安定したエネルギーとして原子力を利用してきた我々現世代の課題であり、次の世代に負担を押し付けないためにも、できるだけ早く最終処分に道筋をつける必要がある。

【地層処分について】

高レベル放射性廃棄物の処分の問題は、日本だけの問題ではない。原子力を利用してきた全ての国に共通した課題である（再処理を選択していない国では、使用済み燃料が高レベル放射性廃棄物である）。

現時点で最も有効な手段

そこで、国際的な長い議論の末、地層処分が最も適切な最終処分方法であるとの基本的な考え方が共有された。各国共通の考え方の重要なポイントは、まず、高レベル放射性廃棄物は、放射能の低減に極めて長い期間を必要とするため、人間が管理し続けることは困難である。将来の世代に管理を継続する負担を残さないためにも、現世代の責任できちんと解決の道筋をつけるべきであるということである。

そのためには、高レベル放射性廃棄物を人間の生活環境から長い期間にわたって適切に隔離することが必要不可欠である。この隔離方法として、地下深くの安定した岩盤に埋設する〝地層処分〟が最適で、現時点で他に有効な手段は見当たらないとされている。

【地層処分方法】

地下深くの安定した地層に埋設する地層処分は、〝人工バリア〟と〝天然バリア〟を組み合わせた多重バリアシステムで、長期にわたり放射性物質を人間の生活環境から隔離し、その動きを抑え閉じ込める方法である。

人工バリアとは、ガラス固化体、オーバーパック（金属製の容器）、緩衝材（締め固めた粘土）で構成される。ガラス固化体は、放射性物質をガラスの中に閉じ込め、長期にわたって地下水に溶け出しにくくしたもので、直径約40㌢㍍、高さ約1・3㍍の大きさである。オーバーパックは、厚さ約20㌢㍍の金属製の容器でガラス固化体を包み込み、地下水がガラス固化体に接触するのを防ぐ役割を担う。そしてさらにオーバーパックを厚さ約70㌢㍍の緩衝材で覆い、地下水と放射性物質の移動を遅らせる。

一方、天然バリアとは、地下深部の岩盤のこと。地下深部は、酸素が極めて少ないため、腐食が起こりにくい。また、地下水の動きも極めて遅く、万一、放射性物質が地下水に漏れ出したとしても、岩盤にしみ込んだり、吸着されたりすることで、その移動がさらに遅くなる。

【最終処分に向けた取り組み】

高レベル放射性廃棄物等の最終処分（地下300㍍以深の地層への処分）を計画的かつ確実に実施するため「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）」が2000年5月に成立した。この法律により、処分地を選定するための3段階の調査プロセスが定められ、最終処分の基本方針等を経済産業大臣が策定し、処分の実施主体として原子力発電環境整備機構（ＮＵＭＯ）が設立された。

処分地選定のプロセスは、①文献調査（過去の地震等の履歴、活断層・火山の位置などを文献で評価：2年程度）、②概要調査（地下の岩石や地下水の性質と状態等をボーリング調査などで把握し評価：4年程度）、③精密調査（地下施設での調査等で詳細評価：14年程度）となっている。ただ、2002年にＮＵＭＯが調査受け入れ自治体の公募を開始したが、現在に至るまで、文献調査を実施するに至っていない。そこで、2013年12月に最終処分関係閣僚会議が設置され、これまでの取り組みの抜本的な見直しについて議論し、15年5月、最終処分法に基づく基本方針が改定された。

包括的技術報告書の骨子

安全な地層処分の実現に向けた技術やそれを支える科学的知見を包括的に示したのが「包括的技術報告書」である。その内容の要点を４つの柱でまとめた。

▼第１の柱　どのように適切な地質環境を選ぶのか

わが国の多様な地質環境の中から、放射性廃棄物を長期にわたって人間の生活環境に有意な影響を与えないように隔離し、閉じ込めるために必要な条件を備えた適切な地質環境を選定するための調査・評価技術を示す。

わが国の地質環境に関する全国レベルの情報・データに基づき、母岩の断層・割れ目などの現実的な特性を反映させ、深成岩類、新第三紀堆積岩、先新第三紀堆積岩類という地質学的に異なる特徴を持つ三種類の母岩に対して処分場の設計および安全評価の対象となる地質環境モデルを作成した。このことは、多様な地質環境を対象に取得した地質環境情報を地質環境モデルとして解釈・統合するための技術基盤を整えていることを示している。また、こうした技術の適用性が深地層の研究施設計画などによって確認されている。

このことから、わが国の多様な地質環境に対してその特性を調査・評価し、処分場の設置に適した地質環境の選定を可能とする技術基盤が整った。

▼第２の柱　どのように安全性を確保した処分場をつくるのか

わが国における地下深部の地質環境の特徴を反映した地質環境モデルに対して所要の安全機能を持つ処分場の設計を行う。また、処分場を建設・操業・閉鎖するための技術を示す。

安全機能を持つ処分場を設計するため、設計因子を基軸として処分場の構成要素（オーバーパックや廃棄体パッケージ、緩衝材などの人工バリアとそれに関連する構造躯体、処分区画や処分坑道などの地下施設、止水プラグなどのアクセス坑道の閉塞部、地上施設など）に期待する機能が発揮されるように設計要件を設定し、これを満足するように設計するための方法が整った。

また、この方法を用いて、三種類の検討母岩として示した多様な地質環境条件に柔軟に対応して処分場を設計する手順とその結果を示すことができた。さらに、このような処分場を建設し、操業・閉鎖するために必要な技術についても実績の蓄積や技術開発が着実に進められており、今後の技術開発によって近い将来に実用化できる見通しを得ている。

これらのことから、地層処分で想定される多様な地質環境に対して、所要の安全機能を満たす処分場を建築するための技術基盤が整ったということができる。

この処分場を対象として、処分場の閉鎖前および閉鎖後の長期間にわたる安全性について、解析によって評価する。

処分場閉鎖前までの安全性については、施設の特徴と平常時の運転状況を踏まえ、遮蔽・閉じ込めの安全機能が正常に機能している状態における施設周辺の影響を評価し、操業中の処分施設周辺の放射線量は、事業許可規則で規定されている目標線量（50㍃Ｓｖ／ｙ）よりも低くなる見通しを確認した。さらに、施設の遮蔽や閉じ込めといった施設の安全機能が喪失する可能性のある異常状態に至る様々なシナリオを検討し、廃棄体の落下などによって廃棄体に衝撃が加わるといった万一の異常状態が発生しても、放射性物質の漏洩が起こる可能性は極めて低いと考えられることを確認した。

閉鎖後の安全性については、期待する安全機能が発揮されるように構築された処分場において、可能性が最も高いと想定されるシナリオ（基本シナリオ）を設定している。そこで国際的に安全性の判断として勧告されている線量拘束値（300㍃Ｓｖ／ｙはもとより、基本シナリオに対する事業者の目標として設定した目安線量（10㍃Ｓｖ／ｙ）を下回る結果が得られた。

▼第３の柱　処分場が安全であることをどのように確認するのか

基本シナリオに対し、科学的知見に基づいて合理性をもって考えられる範囲において安全評価上重要な変動因子を考慮したとしても、処分場の安全性が確保されることを評価するために変動シナリオを設定している。この変動シナリオに対する目安として設定した国際的に安全性の判断の指標として勧告されている線量拘束値（300㍃Ｓｖ／ｙ）に対して、全てのケースでこれより低い線量の結果が得られた。

さらに、発生の可能性が極めて小さいとされる稀頻度事象シナリオと人間侵入シナリオを設定した。それらのシナリオについても、目安とする線量（閉鎖後1年目：20～100ｍＳｖ、2年目以降1～20ｍＳｖ／ｙ）を下回ることが明らかとなった。

▼第４の柱　地層処分の信頼性をさらに向上させるために今後何をしていくべきか

地層環境の調査・評価、処分場の設計、安全評価にかかわる最新の技術を適用した一連の作業を通じて、さらなる信頼性向上に向けた技術課題を抽出し、これらに対する今後の取り組みについて示す。

これまでに得られた技術開発の成果を踏まえ、今後具体化されていく規制要件の事項に応じて、サイトの調査・評価、処分場の設計、安全評価に関する具体的な技術要件までを階層的に整理し管理する取り組みを進めていく必要がある。また、今後も更新・蓄積されていく膨大な知識・情報・データについて、品質、情報の追跡性、取り出し容易性などを確保しながら分野間・世代間で共有し、継承していく取り組みを進めていく必要がある。

このような要件マネージメント、知識マネージメント、さらに長期の事業展開を見据えた人材育成も含めた「技術マネージメント」について、ＮＵＭＯと関係研究機関が協調して進めることが重要である。