

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2014.6.NO.110

目 次

センターの活動状況	①
地層処分の5W1H—その考え方の進展—（その1）	④

センターの活動状況

I 運営状況

第13回理事会開催

平成26年6月11日開催の第13回理事会において、平成25年度事業報告、平成25年度決算、平成26年度再処理等資金管理業務に関する事業計画及び収支予算の変更等について付議し、それぞれ原案のとおり承認されました。

第10回評議員会（定時）開催

平成26年6月27日開催の第10回評議員会（定時）において、平成25年度事業報告及び決算について報告するとともに、平成26年度再処理等資金管理業務に関する事業計画及び収支予算の変更、評議員・理事の選任等について付議し、それぞれ原案のとおり承認されました。今回の選任により、次の方が交代されました。

（敬称略）

区 分	退 任 者	新 任 者	新任者所属・役職
評議員	山路 亨	近藤 駿介	原子力発電環境整備機構 理事長
理事（常勤）	並木 育朗	高橋 彰	前東京電力株式会社フェロー
理事（非常勤）	木村 滋	廣江 譲	電気事業連合会 副会長

評議員会後、理事長の選定について提案をし、理事全員の同意の意思表示及び監事全員の異議がない旨の意思表示を得ましたので、6月30日付けをもって高橋彰理事が理事長に選定されました。

Ⅱ 成果等普及活動の実施状況

平成26年度 第1回原環センターセミナーの開催

最終処分安全評価の初歩的知識を習得したい技術者・研究者を対象とした、第1回原環センターセミナー「放射性廃棄物最終処分の安全評価の基礎Ⅰ」を以下のとおり開催しました。このセミナーでは、処分の安全評価の全体像を段階的に学ぶ、第一歩とし、内容をごく基礎的なもの限定して、講義を行いました。講義後の総合討論では、質疑応答を通じて、理解を深めていただきました。

開催日時：平成26年5月23日(金) 10:30～17:45

開催場所：京都大学 東京オフィス 第2、3会議室

講師：公益財団法人原子力安全研究協会

処分システム安全研究所 所長 朽山 修 氏

プログラム：

講義1 放射性廃棄物の発生と放射線の健康影響

講義2 放射性廃棄物処分の安全確保の構造

講義3 放射性廃棄物処分の安全評価とセーフティケース

総合討論



平成26年度 第1回原環センター講演会の開催

平成26年度第1回原環センター講演会を以下のとおり開催しました。地層処分を巡る対話で尋ねられる、Who（だれの責任か）、What（なぜ地層処分か）、When（なぜ今か）、Where（どこを処分地にするのか）、Why（なぜ必要か）及びHow（どのように安全を保証するのか）に対して、放射性廃棄物問題の解決を目指す国々や国際的機関が提示してきた方策や集約意見を振り返りながら、今後の問題解決案について講演して頂きました。

開催日時：平成26年6月13日(金) 15:00～17:00

会場：当センター 第1、2会議室

演題：地層処分の5W1H—その考え方の進展—

講師：公益財団法人原子力安全研究協会

処分システム安全研究所 所長 朽山 修 氏



Ⅲ 国際交流の実施状況

SKB表敬訪問

平成26年5月22日に、当センターと協力協定を締結しているスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）のクリストファー・エッカーベリ社長（Christopher Eckerberg）と同社国際協力部門のSKBインターナショナル社のマグナス・ホルムクビスト社長（Magnus Holmqvist）の表敬訪問を受けました。



NAGRAとの情報交換会議の開催

当センターと協力協定を締結しているスイス放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）のトーマス・アンスト（Thomas Ernst）理事長とストラティス・フォンフォリス（Stratis Vomvoris）国際支援・協力本部本部長を迎え、情報交換会議を以下のとおり開催しました。

開催日時：平成26年5月22日(木)14:00～18:00

議題：日本における高レベル放射性廃棄物処分プログラムの現状
スイスにおける地層処分プログラムの現状とNAGRAの活動

スイスでは連邦政府が策定した特別計画「地層処分場」に基づいて、3段階からなるサイト選定プロセスが実施されています。現在進められている第2段階では、地層処分場の地上施設について地元住民も参加して議論が行われています。情報交換会議では、こうしたスイスのサイト選定プロセスに関する状況、日本の放射性廃棄物処分事業の進捗状況について意見を交換しました。またスイスの2つの地下研究所、グリムゼル試験サイトとモン・テリ岩盤研究所における研究・開発・実証（RD&D）や処分概念等についても意見交換を行いました。



地層処分の5W1H—その考え方の進展—（その1）

公益財団法人原子力安全研究協会
処分システム安全研究所 所長 朽山 修

はじめに

5W1Hとは、情報を伝達する際に最も基本となる要素をまとめたもので、「Who」、「What」、「When」、「Where」、「Why」、「How」の6つからなるといわれています。本日は、地層処分の5W1Hについて考えてみたいと思います。高レベル放射性廃棄物の地層処分は、その性格上、最初は、限られた数の政策遂行者、事業者及び技術者により研究開発がすすめられてきましたが、それを実現するときには、深部地下へ廃棄物を埋設するための入り口として、どこかの地域を使わせてもらわなければならない、その際には、地域の理解と協力を得るために、5W1Hをきちんと示し、社会に説明することが大事になります。地層処分の5W1Hは何かを考えるとなかなか難しいのですが、関連する課題としては、



◆ Who（だれが）：誰が廃棄物発生者か、社会の廃棄物、世代内・世代間倫理、
◆ What（なにを）：地層処分の選択、
◆ When（いつ）：処分と管理または貯蔵の関係、
◆ Where（どこで）：立地、深部地下環境の隔離閉じ込め能力、
◆ Why（なぜ）：処分の必要性和処分概念（技術的成立性）、
◆ How（どのように）：可逆性・回収可能性、段階的アプローチ

などが関係すると考えられます。しかし、考え様によってはこの5W1Hをどういう課題と結び付けるかということについても、違う考え方もあって非常に難しく、今までもこうした課題をめぐって延々議論がされてきたわけです。それが実際にはどう変わってきたのか、それとも昔から変わらないのか、進歩があるのかないのかということが、今私たちが振り返ってみる必要のあることだと思います。これが今日のお話です。

不確実性下の意思決定の議論の歴史

地層処分の実現が非常に困難である究極の原因は、私の理解では、不確実性の存在の下での意志決定を必要とすること、それも個人の意志決定ではなく社会の意志決定を必要とすることではないかと思っています。

地層処分の場合には人間の管理より自然過程の科学的予測に信頼を置いてやろうとしています。しかし、人々は、社会における人間の行動の予測の不確実性を、約束すなわち管理に信頼を置くことにより克服して社会を形成していますので、人間の管理はいつまでもあてになるわけではない、遠い将来は自然にまかすのだということを納得してもらうのは容易ではありません。

また、地層処分では、リスクのもととなる放射能が長期に残留することから、リスクの分配に関する世代内、世代間公平性をいかに満たすかということが問題となります。つまり、今の社会の中で、人々の間に不公平が生じないようにすることと、原子力の便益を受けた現世代が、将来の社会に対して不当なリスクを分配することのないようにするということを満たさなければなりません。このような社会的合理性を満たさなければならないのですが、将来の人々に残すリスクについては、科学的合理性のもとでの予測に頼って考えなければなりません。

このように、科学的合理性と社会的合理性をいかに満たしていくのかということが問題となりますが、いずれも不確実性が伴われる話となり、実践的解決の問題となります。つまりどのような解決策も不完全であることを認めることがどうしても必要になりますが、これが社会とのコミュニケーションの間でうまくいかないという問題がずっとあり、こういうことが議論されてきたということです。

全体として振り返ってみて、これは私の勝手な分け方ですけれども、4つの時期に分けて、見てみたいと思います。

- ◆ 第1期（1950年代から1970年代の中頃）：この時期には、高レベル放射性廃棄物問題が認知され始め、それをどうしたらいいかという対策を模索していた時代というふうに考えられます。
- ◆ 第2期（1970年代後半から1980年代前半）：地層処分が一番良さそうな方法だということ

とが議論されました。

- ◆ 第3期（1980年代中頃から1990年代）：地層処分の技術的成立性というものが科学的に確認された時期と考えることができます。
- ◆ 第4期（1990年代以降）：実際に地層処分しようとして、サイト選定の問題に入ってきたときになかなかうまく進まないという実施段階の問題が出てきています。つまり、社会的課題に留意した地層処分概念の議論がなされてきた時期と見ることができます。

ざっと大まかに見るとこんな感じになるのかなと思います。こういう中でどういう議論がされてきたかを、それぞれの時期の代表的な報告書をもとにして、紹介いたします。

第1期(1950年代～1970年代中頃)：高レベル放射性廃棄物問題の認知と対策の模索

この頃の内容については、私もほとんど分からないので色々な歴史的な本といえますか、そういうものを振り返ったような本を参考にしました[1-4]。一番素直で初心者にも分かりやすいものとしては、「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—」（以下、2000年レポート）の別冊として『地層処分の背景』[3]があります。2000年レポートは、日本でも地層処分を進めるとして、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が制定された際の、技術的根拠資料とされたもので、地層処分のセーフティケースとして使われているわけですが、社会との議論の中で一番大事なこの別冊は意外と皆さんに読まれてないという問題がございます。ここには、地層処分の5W1Hに関する議論がされていますので、今から考えると、この分冊がもっと充実したものであればよかった、この分冊が社会でもっと読まれていればよかったと思います。

さて、原子力の黎明期の廃棄物問題ですが、この時期には、原爆の製造のために、照射済み核燃料を硝酸に溶かしてプルトニウムを回収する際に、発生する放射性廃棄物の扱いがさまざまところで深刻な話として出てきました。長崎に落とされた原爆のためのプルトニウムを抽出したハンフォード工場のサイトにおいては、発生した高レベル放射性廃液のタンク貯蔵中に、漏出による汚染が発生することがございました。このサイトでこの後徐々に進んだ地下の汚染は、現在に至るまでにも除染しきれずに環境修復の努力が続けられています。米国に限らず、イギリスやソ連などの諸外国でもいろいろな問題がこういう時期にはたくさんあったということです。

そうこうしているうちに、東西冷戦の中での核開発競争が急速に進むことで核戦争の危険性が現実化

しつつあるとの危機感を抱いた当時の米国大統領のアイゼンハワーは、1953年12月に国連総会において、「平和のための原子力（Atoms for Peace）」の演説を行い、世界は原子力発電の開発へと向かいました。これは他方で、それまで以上に多量に放射性廃棄物が発生することを意味していました。

そこで当時の米国原子力委員会(AEC)の要請に従って、この放射性廃棄物をどうすればよいかに応えたのが、1957年の全米科学アカデミー（National Academy of Sciences、NAS）による『放射性廃棄物の陸地処分』という報告書です[4]。

ここでは、廃棄物は固体にして、岩塩層に定置するのがよいと勧告しています。まず、廃棄物は、液体のまま長期にわたって貯蔵管理することは好ましくない。液体は非常に動きやすく具合が悪いということがあります。それから、長期間にわたって貯蔵管理することも大変難しそうだということで、何か考えないといけないというのがあります。このため、まずは固体にするというのが処分の基本になっています。実際に現在までに、高レベル廃棄物に対しては、ガラスやセラミックス、あるいはガラスと金属の混合体にするという方法が、固化技術の開発として検討されて、現在の日本などでは、ホウケイ酸ガラスで固めることになっています。このように、廃棄物を処理処分するときに固体にしておくことは、特に受動的な安全系の中で大事な話で、これが第一のバリアにいつなるわけです。けれども、そういうことの大事さが、廃棄物は初めから固体になっていてそこから話を始めるためにそれで済んでしまい、皆さんにはその大事さがなかなか伝わりにくくなっているかもしれません。

当時米国では、色々な議論をしながら岩塩層に処分しようとしたのですが、結局、安全性に疑念があることや、国や原子力委員会が信頼しきれないことなどがあって、1970年に処分場サイトの地元と州政府の反対により計画が中止されたという模索の時代がありました。

日本でもやはり非常に初期の頃には、どういう方法がよいか模索していた時期があり、1962年の原子力委員会の廃棄物処理専門部会中間報告では、高レベル放射性廃棄物の処分方式として、タンク貯蔵等の閉じ込め方式は常に監視を必要とするので、最終的な処分とは言えない、最終処分方式として「容器に入れて深海に投棄すること」、「天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層に入れること」としていました。「国土が狭い地震のある我が国では、最も可能性のある最終処分方式としては深海投棄であろう」とか「現在では低レベル、中レベルの廃棄物に留め、高レベルについては研究により安全性が確認されるまで実施すべきではない」という書き方がしてあります。この頃は日本に限らずIAEAでも、低、中レベル

については海洋投棄をしようということではいろいろなことが進められていた時代と言えるかと思います。

1973年の原子力委員会環境・安全専門部会放射性固体廃棄物分科会報告では、「高レベル固体廃棄物の処分方法として、人造の保管施設を用いた保管方法について国際的な技術の進展に注力しつつ研究開発を進める」としています。廃棄物は発生するけれどもすぐ困るわけではないので、様子を見ながら色々な方法を考えましょうというのがこの頃の時代です。

第2期（1970年代後半～1980年代前半）：地層処分の選択

それがだんだんと煮詰まってまいりまして、1970年代後半から1980年前半には、地層処分が一番いい方法だということがいわれるようになってきました。

国際的にもそういう議論がされてきて、1977年にOECDの原子力機関（NEA）から国際的な技術的意見の集約レポート『原子力発電に伴う放射性廃棄物管理の目標・概念・戦略』[5]が出されました。Polvaniさんというこのレポートをまとめたときの委員長の名前を取って仲間内ではPolvaniレポートと言っています。これが、放射性廃棄物を処分する方法として地層処分を選んだ一番大もとのレポートとしてよく知られている報告です。

それから、1980年に米国のエネルギー省（DOE）から『商用放射性廃棄物の管理に関する環境影響評価報告書』（EIS-0046F）[6]という報告書が出されています。EISというのは、環境影響評価書（Environmental Impact Statement）であり、実際には何かの事業をするとき、その事業が国全体あるいは社会全体の社会環境や自然環境に対する大きな影響があるときには、この事業をすることが最終的には社会のためになるかどうかを評価するために環境影響評価を行います。最近では環境影響評価というと自然環境に限定されるような感じがありますので、SEA（Strategic Environmental Assessment）＝戦略的環境影響評価という呼び方がされています。例えば、フィンランドで原則決定があるというのがこういうところに当たるわけです。米国もEISというものを出して、これで地層処分が一番いい方法だというのを出したレポートとなります。

また、1982年のOECD/NEAの『放射性廃棄物の処分：原則のオーバービュー』[7]というレポートがあります。これはこのときの委員長の名前を取って、Coadyレポートと呼ばれているものです。Polvaniレポートはどちらかというと、地層処分が技術として一番いいということを中心に書いているものですが、Coadyレポートは、社会的な合理性といいますか、原則はどうでしょうということをもう一度見直したものであり、地層処分選択の社会的倫理的正当性というか、そういうものがここで述べられています。

このころ日本の状況はどうかといいますと、1975年あたりには世界的にだんだんと環境の話が出てきて、投棄による海洋汚染を防止するために、廃棄物の海洋投棄を国際的に規制しようというロンドン条約が発効しています。こういう中で低、中レベルの放射性廃棄物も海洋投棄はあまり好ましくないということが出てきました。それを受け、原子力委員会でも1976年に、「当面地層処分に重点を置き、我が国の社会的、地理的条件に見合った処分方法の調査、研究を進め、今後3年から5年のうちに処分方法の方向付けを行い、1980年後半から実証試験を行うことを目標とする」ということを決めました。この1976年というのが日本の地層処分研究開発の出発点となりました。動力炉・核燃料事業団（後に現在の日本原子力研究開発機構に統合）に廃棄物対策室をつくったそうです。スタートメンバーは5人でやられたと聞いています。

これを受けて1980年に、放射性廃棄物対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発の推進について」で、高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発の推進について、次のような5段階の手順を経て行う地層処分計画が示されました。

- ◆ 可能性のある地層の調査として、地層処分の対象となり得る可能性のある地層を抽出
- ◆ 地層の調査により、有効な地層を絞り込み、その地点において工学バリア原位置試験を行い、地層処分の試験地を選定。
- ◆ 設定された試験地において模擬固化体を用いた原位置試験を行い、コールドでの処分システムを確立。
- ◆ 実固化体原位置試験として、実固化体による試験によってホットでの処分システムを確立。
- ◆ ガラス固化体を試験的に処分場に搬入して試験的処分。

こういう手順でやったらどうですかという非常に素朴な、技術主導型の発想です。今、国でやろうとしていることも見かけ上似ていて、こうやればできると思っている人もいるように見えます。実際には、サイトを決めるというのはこんな簡単な話ではありません。こういうところで先祖返りするとちょっと困るのですが、やはり何もなしで、素朴に考えるとこういうふうになってしまうということです。初期の頃はこういうふうと考えられていたということです。

【地層処分の選択：Polvaniレポート】

1977年のPolvaniレポート[5]では、地層処分を選択するときの意味合いとしてまず最初に考えているのが、貯蔵と処分の問題です。貯蔵というのはどうい

うものかということ、回収する意図を持って廃棄物を措置することをいいます。貯蔵は継続的な監視（surveillance）を要する一時的な手段です。処分は回収する意図なく廃棄物を放出し、あるいは措置することとしています。放流物を液体や気体として環境放出する場合、このPolvaniレポートの時点ではこの放出（discharge）も処分と考えているわけですが、この場合、処分は非可逆的です。固体廃棄物を地層処分する場合には、回収が可能なのもあるが、それはもともと意図されたものではないとして、処分における回収や監視の意味を整理しています。この意味で、処分の概念では、継続的監視は必要とされないが、限定した期間監視することが望ましいケースもあると考えています。その中で、現世代は、廃棄物を一定期間安全に貯蔵する能力は確かにあるが、ある種の放射能は将来における危険性が予測できないほど長い時間にわたり残存するものがある、従って、封入隔離の健全性を人間による継続的、制度的な管理に頼るとしても、極めて長い期間に及ぶ隔離に信頼を置くことはできないという言い方をしています。これが地層処分のもともとの考え方なのですが、非常な長期に対しては、人間による継続的、制度的な管理に頼ることができないという発想が、なかなかいつまで経っても社会に通用しないということがございます。

それからもう一つは、自らのエネルギー需要を原子力に頼る現世代の責任は、残存する廃棄物が将来世代の重荷にならないような方法で管理する必要性にこそあると考えられると書いてございます。ここでも管理という用語が使われていてちょっと分かりにくいのですが、制度的管理の管理はinstitutional controlの方のコントロール（control）であり、ここでのいう管理はマネジメント（management）の方の管理です。いろいろなことをきちんとするという方の管理です。

世代間の倫理とは、長寿命の放射性廃棄物を必要な期間安全に隔離するための技術的な解決法を見出さなければならず、その方法は我々自らが受け入れられないような状況に将来世代を直面させるものであってはならないということを意味しています。ただし、このときに、全ての人間活動はどれだけ技術的、経済的な資源を投入しても、ゼロにすることのできない危険性を伴うものであり、目標達成には適格な判断と責任感が必要であるとしています。そういうことの前提でいろいろな処分オプションとして、深地層処分、海洋底下の地層処分、海洋底上の処分、氷床処分、地球外処分、消滅処理、こういうものを考え、これらのうち安定な地層、地層というのは岩塩層、粘土層、硬岩層、こういう中に閉じ込めることが最も進歩した解決方法であるとしています。これは永久的かつ絶対的に閉じ込めることを意図する

ものではないけれども、ある程度の期間そういう隔離、閉じ込めができるような方法となり得るので、それであれば短寿命廃棄物に対しては数百年、長寿命廃棄物に対しては10万年、あるいはそれ以上の隔離、閉じ込めを目指すようなことをやればよいと考えますというのがこの報告書です。

【地層処分の選択： DOE/EIS-0046F】

米国DOEの環境影響評価書[6]もやはり同じようなことで、技術的なオプションとして地層処分、超深孔処分、岩石溶融処分、島内地層処分、氷床処分、井戸注入処分、海洋底下処分、核種分離・消滅処理、宇宙処分などを考えました。そのときの判断基準として、放射線学的、非放射線学的な影響が小さいこと、技術開発の十分な見通しがあり、妥当な期間で開発可能なこと、国内法、国際的な合意に合致すること、将来の原子力産業の規模や方式の推移に影響されないこと、万一の場合、修正、修復措置の可能性があること、長期的な維持管理、監視の必要性がないこと、こういうようなことを判断基準として使って、このうち何がいいかを評価しています。そして結論として、地層処分は開発の優先権が与えられる処分方法であるとして、地層処分の選択の正当性を論じています。

【地層処分の選択： Coadyレポート】

Coadyレポート[7]は1982年とちょっと遅れて出てきたものであり、「放射性廃棄物の処分：原則のオーバービュー」とタイトルに書いています。原則というのは倫理的、社会的な基準であり、そういうものがちゃんとしているかどうかということです。

＜放射性廃棄物の概要＞

廃棄物の処分として、これは、ある特定の措置により利益を受けることと、そのコストを負担することとの比較に関係しているとしています。コストといっても金額的なコストではなく、便益とリスクのようなバランスになるということです。このときの問題は、利益を受ける人とコストを負担する人が異なる場合、事情は複雑になります。しかし、現代社会は高度に一体化しているので、ある措置により利益を受ける人と受けない人を区別しようとするのは非常に難しい、すなわち、原子力を利用するか放射性廃棄物を処分するという措置があったときに、それで誰が得をして誰が損をするか区別することは非常に難しいということを言っています。

放射性廃棄物対策ではその他の全ての廃棄物と同じく、コストや利益の評価に必要な技術情報は、技術者、科学者及び経済専門家により提供される。しかし、最終判断をするのは政治家であり、放射性廃棄物の場合は、彼らの決定は、原子力に係る議

論では、往々にして生じる感情的な反応を考慮に入れてなされることになる。これが筋道だということです。ここでは放射性廃棄物の処分というのは社会技術だということが書いてございます。社会が生み出した廃棄物を社会が解決しなければならないということを1982年の時点ですでにこのレポートに書いています。

＜将来の世代に対する責任＞

将来の世代に対する責任としては、防止できる危害と知りつつその発生に関与することは間違いである、危害発生を防止できるのにその措置を取らないことは間違いであるとして、将来世代に対してきちんとしたことをやらなければいけない、つまり、行為から利益を得るものがそのコストも負担すべきという汚染者負担の原則があるとして、現世代が出した廃棄物は現世代がきちんとしまし、将来世代に対して責任を取りましようといっています。ただし、どの程度にどのように実現するかを考えると実はなかなか難しく、廃棄物を何とかするにしても、上記の原則を完全無欠の形で満足させることはできない。個々の課題における特質を考慮しつつバランスを取って実践的に解決していくことが社会の目指すことである、としています。これはどういうことかといいますと、原子力や放射能の利用により多くの利益が将来世代に引き継がれます。実際はそうだけれども、放射性廃棄物の処分にに関する議論では、この多くの利益が将来世代に行くという方の評価は非常に難しく、危険の方は残ったリスクが評価できるのですが、利益の方はどれだけ将来世代に引き渡せるかを評価するのは難しいということが書いてあります。そういう意味で、全ての影響に無制限の責任を認めることは実現不可能な経済的な約束をすることになるため、絶対的な安全性が保証できない以上、将来世代に対しては現世代が自らの許容レベルより悪くない状態を残すことが一般的に認められると考える、こういうようなまとめ方をして将来世代に対する責任の取り方を提示しています。

＜希釈分散と閉じ込め＞

希釈分散と閉じ込めについても検討されています。Coadyレポートでは希釈分散をdispersalという言い方をしています。希釈分散というのは環境に計画的に放出して、空気や水により許容レベルより十分低いレベルに希釈することで、これは個人の被ばくを考えて制限するのではなく、環境に蓄積する総量による集団の被ばくを考えて制限する必要があるとしています。放出すれば復元が不可能なので、限られた量についてのみ適正な方法と考えられるとしています。これに対して閉じ込めの方は、環境への放出を制限するため廃棄物の周囲にバリアを設置する方

法として多重バリアが有効であるということが書いてございます。環境への放出が遅れるということで、より将来になるほど予測の不確実性のため影響の評価が困難となるが、これは、より将来になるほど放射性崩壊により影響が小さくなるという事実によってある程度相殺されると考えています。

＜処分の方法＞

処分の方法としては、今のようなことを考えながら、一方は永久管理または無期限貯蔵、もう一方は受動的（passive）なシステム、という分け方をしています。一方の、人間の継続的関与として制度的管理が必要な方法については、これを支持する人はどう考えているかということ、回収を意図しないとしても廃棄物は監視下に置くべきである。将来、技術は改良され良い方法が発見されるかもしれないので、不可逆な状態にすべきではない。現在でも多くの廃棄物の貯蔵に安全な方法が使用可能である。その間に毒性も減少し扱いやすくなる。こういうことからずっと継続的に関与すべきであると言っています。

一方の監視、保守などの無期限の関与を必要としない方法、これを受動的なシステムと呼んでいます。こちらを支持する人は、処分後の廃棄物の管理が将来世代の負担になることを避けたいと考えています。それと、長期の制度的管理に対して悲観的ということです。管理は結局中断されてしまうと考えています。もともとパッシブな方法にしておけば、例えば処分施設が忘れ去られてもリスクの増大はほとんど起こらないので、始めからそういうふうにおこなえばいけないということです。こういうような2つの考え方があるといっています。

そういう2つの考え方を見ると、監視継続の管理方式に賛成しない人、永久に管理しようというのは駄目だと言っている人たちでも、将来のある一定期間は管理を継続し、部分的にパッシブな工学バリアや天然バリアに取り替えて、その施設を使用することが適当との考えに同意しています。問題は、ある程度管理しましょうという管理期間をいくらに決めるかが問題なのです。これは管理がいつまで続くかということを考えれば、恐らく数百年を超えないということで合意ができると思われるというふうになっています。

つまり、こういうことを考えたら比較的短期間に無害なレベルに崩壊する廃棄物は、制度的な管理に依存した方法で処分をすることができます。これが今の浅地中埋設、あるいは管理型処分という言葉で呼ばれるものに当たります。その他の全ての廃棄物については、このような管理に依存しないパッシブな処分方法を開発することが目標であるとしています。こちら側が地層処分のような方法です。

そういう意味でパッシブなシステムと永久管理と

いう2つを比べてみると、結局のところは、今現在求められている方法は受動的な方法であることから考え、制度的管理はその継続が保証され、その有効性が信頼できる範囲でのみ依存できる方法である、と結論付けています。従って、制度的管理の意義は、受動的なシステムとともに制度的管理を採用し、受動的システムで十分と判断された以上の安心を求める場合もあるということです。モニタリングやその後の記録の保存などもあります。しかし、この場合、もともと施設の安全確保に制度的管理は必要な要素ではないのだから、この管理が将来世代の負担の先送りであると考えるべきではないとしています。つまり、受動的システムで十分というものを作っておけば、制度的管理をするかどうかは将来世代が選ぶものだから、それは将来世代に不当に引き渡す負の遺産とはならないという考え方をしています。

第3期（1980年代中頃～1990年代）：地層処分の技術的成立性

こういうことで地層処分を選択するということが1970年代の終わり頃からずっと議論されてきました。その考えの下に1980年代中頃から90年代にかけては、本当にそういうものが作れるのかという技術的成立性の議論がずいぶんなされてきた時代になります。ここには非常にたくさんのレポートがあります。その中で代表的なものをいくつか選んだということです。1983年の全米科学アカデミーNASのレポート『放射性廃棄物の地層処分における隔離システムの研究』[8]、1983年のスウェーデンのKBS-3概念として非常に有名なKBS-3レポート『使用済燃料の最終貯蔵』[9]や、OECD/NEAとIAEA、CECの共同報告書『放射性廃棄物処分：長期にわたる安全は評価できるか?』[10]があります。

これらのもとに、1980年代中頃から1990年代には、地層処分の技術的成立性をきちんと主張することにより、各国は、長寿命放射性廃棄物管理として、地層処分を基本方針として進めていくことを決めています。スウェーデンで原子力条件法が成立し、スイスでも1985年に放射性廃棄物処分の実現可能性に関する報告書Project Gewährが連邦評議会にだされています。地層処分をやっていきましょうということが国全体に対して問いかけられて、そういうものが原則として決定されていった時代ということになります。

日本でも1984年に原子力委員会の下にあった放射性廃棄物対策専門部会は、以下のような報告書「放射性廃棄物処理処分方策について（中間報告）」を出しています。

- ・ 我が国における有効な地層としては、未固結岩等の明らかに適性に劣るもの以外は岩石の種類を特定せずに可能性を探る。

- ・ 同一種類の岩石でもそれが賦存する地質条件によって適性に差異がある。
- ・ 地質条件に対応して必要な人工バリアを作り、安全確保が可能。
- ・ 処分予定地の選定では自然的条件と社会的条件等に柔軟に対応する余地がある。
- ・ 処分予定地の選定は動燃が電気事業者の協力を得て行い、検討の結果は国が評価を行って妥当性を確認する。
- ・ 実施主体については適切な時期に具体化する。

【地層処分の技術的成立性：全米科学アカデミーレポートNAS-1983】

このような一連のレポートの中で非常に大事だと思われるレポートは、1983年のNASのもので、Pigford氏たちが中心になって作成したレポートです[8]。ここでは何が議論されているかということ、地層への閉じ込め技術には2種類のシステムがあることです。1つは完全に地下水が存在しないようなところに閉じ込めるということで、岩塩のケースです。第2のものは、地下水が少しは残っているだろうけれども地質環境が本来的に備えている隔離性能によるケースです。ここでの閉じ込めと隔離の概念では、地下水が全く存在しなかったら廃棄物は閉じ込められてそこにずっといるけれども、地下水があったら少しは出ていくかもしれない、それでも地表に出てくることはないという意味で隔離という言葉を使っているようです。

地質環境が本来的に備えている性能とは何かというと、地質特性の岩盤による隔離性、水理特性の透水係数、間隙率、動水勾配、地球科学特性の核種の地下水への溶解度限界、放射性核種の岩石への収着特性を挙げています。すなわち、放射性核種の元素としての化学的性質に応じて、溶解度や、遅延係数すなわち岩石に収着して遅延するときのパラメーターなどが決まり、こういうものによって議論すれば、物質移動論（科学的議論）と多重バリア概念による処分システムの信頼性を提示する、つまり、これで科学的に議論ができることを示した非常に重要なレポートになります。

内容は何を言っているかを今風に焼直して図-1に示します。地表に人が住んでいる生活環境があります。地下に高レベル放射性廃棄物であったり、使用済燃料であったり、TRU廃棄物であったり、こういう廃棄物があります。生活環境に廃棄物が行くためには、人間侵入や隆起侵食などの自然事象による廃棄物への接近と、地下水による放射性核種の溶解と運搬、この2つしかありませんということです。接近シナリオ、地下水シナリオと呼ばれるものは廃棄物が生活環境に移行する経路を表したものです。

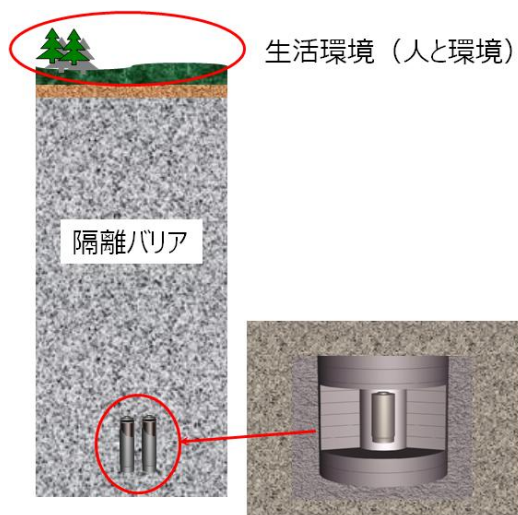


図-1 生活環境と放射性廃棄物

レポートでは、廃棄物を地上に置く場合は放射能インベントリの大きさが安全性の支配的要因の一つであるが、地下に置く場合は放射能の地下水への移行量が支配要因となると書いています。何が言われているかという、この廃棄物のすぐ周り、概念的に丸で囲んだ領域（ニアフィールド）に放射性物質は全部閉じ込められて、ここに閉じ込められているうちにほとんどが減衰してなくなってしまう。その領域からほんの少し出てくるものはこの隔離バリアを動いて地表に移行する間に十分希釈拡散されて問題ない恰好になるということです。

隔離とは、この丸で囲んだ領域が、地表の生活環境から隔離されていて放射性物質のやり取りがほとんど起こらないことを意味しています。

ではこの領域に閉じ込めるための性質は何かというと、廃棄物とその周りで溶解度制限が成り立てばよく、遅延係数が高ければよいということです。そ

れを示すためには先ほどのような地質環境がそういうふうになっていけばいいという概念になります。

表-1に放射性廃棄物の中に含まれている典型的な核種の半減期とガラス固化体1本あたりに含まれる総放射能が書いてあります。実際、これはどのくらいのオーダーかが問題となるもので、10のべき乗で書いてあり、 10^{15} Bqとか 10^{13} Bqとあります。固体はほとんど溶けません。ガラスの溶解速度が書いてありますが、ガラスが永遠に溶けないということはありませんから少し溶けますが、それでも微量です(表の第4列)。また、セシウムやストロンチウムなどごく一部の元素以外は、ガラスがなくても、元素そのものが酸化物、水酸化物等になって溶けません。このことは、溶解度を実験的に求めれば分かります。この結果、溶解度制限によって出てくるものは大きく桁が違ってきます(表の第5列)。例えば、Am-241で 3×10^{13} Bqであるのが 6×10^6 Bqですから、7乗近くの差があります。100万分の1以下になってしまうということです。

そのくらいの濃度の地下水が極めてゆっくりと動いて放射性核種を運搬します。今度はこれがたとえ廃棄物から出てきたとしても、例えばニアフィールドの100メートルを動くのに数万年、数十万年かかるすると、半減期は表の第2列に示した値ですからその間に全部なくなってしまうことになります。表の下半分に示した非常に長半減期のものはニアフィールドではなくならないですけれども、半減期が長いほど単位質量あたりの放射能（比放射能）は小さくなり、含まれる初期の放射能も非常に小さく、溶解度から計算される放射能も非常にちょっとしかないわけです。その放射能は、結局上の生活環境に上がるまでに、地下で1年間に1リットル（ 10^{-3} m^3 ）が動いて運ばれるとすると、この4万本分が地表まで運ば

表-1 溶解度制限による溶出抑制と遅い地下水流速と収着遅延による移行抑制

	半減期	1本あたりに含まれる総放射能 (Bq/本)	ガラスの溶解速度 (Bq/年)	地下水への溶解度 (Bq/L)	起こる結果
Sr-90	29年	5.5×10^{15}	7.8×10^{10}		オーバーバック内で1000年で減衰
Cs-137	30年	7.6×10^{15}	1.1×10^{11}		
Am-241	432年	3.0×10^{13}		6.1×10^6	数万年以上の地下水移行時間で減衰
Am-243	7370年	7.9×10^{11}		3.6×10^5	
Se-79	6.5万年	1.7×10^{10}		6.1×10^2	地表に運ばれる少量の地下水が大量の地表水で希釈
Sn-126	10万年	3.0×10^{10}		6.6×10^5	
Tc-99	21万年	5.2×10^{11}		2.5×10^3	
Zr-93	153万年	7.4×10^{10}		8.6×10^3	
Np-237	214万年	1.8×10^{10}		1.2×10^2	
Cs-135	230万年	1.8×10^{10}	2.6×10^5		

れたとしても、最終的に、生活環境では1年間に 10^8 m³ぐらいの河川水が流れているようなところへ行くということで、大量の希釈分散が起こり問題がなくなるということです。

このように、このNASレポートでは、地層処分では、溶解度制限、収着遅延、遅い地下水流速といった、地下の地質環境の本来的な自然の性質のおかげで、放射性物質は廃棄物の近傍に全部閉じ込められたままになって処分が完了すると考えています。このレポートにより、地層処分がサイエンスになったといえるのではないかと思います。

【放射性廃棄物の処分の長期安全性の評価】

こういうものを受けて、1991年のOECD/NEAの報告書[10]でも、国際的意見の集約として、実際に安全評価に用いられる科学的手法に関する専門家の共通認識をまとめ、安全評価の手法は今日得られており、地層処分の場として提案された場所から得られる情報と合わせてその手法を用いることで安全評価ができることを唱っています。

【日本の研究開発の方針転換】

日本も、1980年代中頃から90年代にかけてこういう考え方をうまく採用するようになってきました。1989年には、原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分の重点項目とその進め方」で、研究開発の方針転換が行われました。5段階立地方式の難航から、計画推進に当たって、地層処分についての国民的理解の重要性を再認識し、その中で特に科学的基盤を国民に示すため、多重バリアシステムの性能を明らかにして、これに基づき長期間にわたり安全性が確保できる技術的方法を具体化する。このために、地層処分の技術的信頼性に関する研究開発成果を報告書に取りまとめて、国が評価するに当たっての重点項目とその進め方を提示する、ということになりました。

当時の動機がやった研究開発の中心に1991年の第1次レポートと1999年の第2次レポート（いわゆる2000年レポート）があるのですが、その研究開発の中心は、1983年のNASレポートで紹介したように、地層処分の安全性を決定づける重要な要素は、人工バリアとその近傍の地層における安全性能であり、その外の広い地層における性能はその安全性をさらに確かなものにするという役割であるということで、ニアフィールド概念という考え方を中心に置こうとしました。研究開発は、人工バリアとその近傍の地層の研究に重点的に取り組む。これは、廃棄物のすぐ周りの条件がきちんとしていれば溶解度制限、核種移行が非常に遅くしか起こらないということが確保できますので、それによって地層処分が成立するということをきちんと示すという考え方です。こう

いう研究開発アプローチをしています。

そして、これをより確かなものにする、もともと地質環境が持っている安全機能に関する性質をより確かなものにするために、多重バリアとしてオーバーパックで囲んだり、粘土緩衝材を置いたりしているということです。これによって閉じ込めがより確かなものになるようにしているということです。地層処分の隔離と閉じ込めを確保するのは、もともとは安定な地質環境に依存してやるのですが、それが十分に確かに働くように人工バリアを付け加えるという、これが多重バリアシステムです。そうしますと、地質環境に求める安全性能としては、廃棄体のすぐ周辺が、溶解度制限が成り立つようになっていればいい、つまり透水係数が小さいこと、pHが高かったり低かったりしないという条件になるわけで、問題は、そういうような条件を確保できる場所が日本にもあるかということになります。そう考えると、もともと地下の環境というのは透水係数が小さいような環境だし、pHも中性のものが多くいます。それを乱すようなものさえ避けていれば、こういう場所は十分見つかるという考えに至るわけです。それで2000年レポートのときには、変動帯にある日本の中でも地層処分は十分できるという考え方になったわけです。つまり、日本列島全体は変動帯にあるかもしれないけれども、地層処分が成立するようなこういう地質環境、廃棄体のすぐ周りがちゃんとしているという地質環境はそこら中にあるので、じゃあ、日本でも十分できるじゃないですかという恰好になったのがこのポイントです。世界もやはり同じように考えてこういうような地層処分概念を採用しているという意味では、1983年あたりのNASやKBSのレポートが中心になってこういうものが作られています。

（以下、原環センタートピックスNo.111に続く。）

【本稿は、平成26年6月13日開催の平成26年度第1回原環センター講演会「地層処分の5W1H－その考え方の進展－」の前半の内容を再構成したものです。後半については原環センタートピックスNo.111に掲載します。】

参考文献（第1期から第3期）

第1期(1950年代～1970年代中頃)：高レベル放射性廃棄物問題の認知と対策の模索

1. J. Samuel Walker: The Road to Yucca Mountain, The Development of Radioactive Waste Policy in the United States, University of California Press (2009).
2. W. Alley and R. Alley: Too Hot to Touch: The Problem of High-Level Nuclear Waste, Cambridge

University Press (2013).

3. JAEA地層処分研究開発部門,第2次取りまとめ
「別冊：地層処分の背景」
http://www.jaea.go.jp/04/tisou/haikai/haikai_01.html
4. The Disposal of Radioactive Waste on Land,
Washington, DC, National Academy of Sciences,
National Research Council (1957).

第2期（1970年代後半～1980年代前半）：地層処分の 選択

5. NEA Group of Experts, Objectives, Concepts and
Strategies for the Management of Radioactive
Waste Arising from Nuclear Power Programmes,
OECD/NEA (1977), (Polvani Report)
6. Final Environmental Impact Statement
Management of Commercially Generated
Radioactive Waste, DOE/EIS-0046F (1980).
7. Disposal of Radioactive Waste: An Overview of
Principles Involved, OECD/NEA (1982), (Coady
Report)

第3期（1980年代中頃～1990年代）：地層処分の技術 的成立性：基本概念の確立

8. Waste Isolation Systems Panel, Board on
Radioactive Waste Management: A Study of the
Isolation System for Geological Disposal of
Radioactive Waste, National Research Council,
National Academy of Sciences, Washington, DC
(1983).
9. Swedish Nuclear Fuel Supply Co/Division KBS:
Final Storage of Spent Nuclear Fuel - KBS-3,
Stockholm, Sweden (1983).
10. OECD/NEA, IAEA and CEC（共同報告書）：
Disposal of Radioactive Waste, Can Long-term
Safety be Evaluated? An International Collective
Opinion, OECD/NEA, IAEA and CEC, Paris
(1991).

編集発行

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

〒104-0052 東京都中央区月島1丁目15番7号（パシフィックマークス月島8階）

TEL 03-3534-4511（代表） FAX 03-3534-4567

ホームページ <http://www.rwmc.or.jp/>