

地層処分概念開発史

増田純男*1

研究開発に着手以来数十年、地層処分は科学的な安全性の確認と技術的な実現可能性の保証が最も確実にできる概念として認識され、各国に固有の条件を反映したシステムが開発・評価されて事業を開始する段階に入っている。地層処分事業を円滑に進めていくためには、日本においても、あらためて社会的な合意の基盤となる情報が発信され共有されることが重要である。本稿はこのような情報発信の一つとして、地層処分の概念が選ばれ、具体的な手法が開発されて実施段階に至るまでの経緯を振り返り「いま、なぜ地層処分なのか」を考える一助としたい。

Keywords: 地層処分概念, 処分の原則, 受動的システム, 性能評価, システムアプローチ, 回収可能性概念, 地球化学特性, ニアフィールドアプローチ, 間接的実証, 貯蔵と処分の関係

1 はじめに

地層処分の安全性や実現性を裏づける研究開発の成果が蓄積されてきている一方で、実施段階に入り処分場予定地の選定など社会との接点が増えるにつれて、地層処分に対する社会的な合意の形成が不十分であることが各国において表面化してきている。

日本においても、2012年に日本学術会議が最終処分事業推進における根源的な問題点として、地層処分に対する社会的合意形成が極度に困難である現状に関し、その客観的諸要因を明確にし、直視することの重要性を指摘した。

要因の1つに、地層処分の安全性、実現性と緊要性に関しては専門家間で数十年にわたる多角的な議論に基づき国際的な共通認識が構築されてきたものであるとしても、「なぜ今地層処分が必要か」という基盤的な認識が社会に共有されておらず、このような背景には地層処分の考え方やそれが選択されるに至った経緯等の記録が情報として整理され提供されてこなかったことがあるものと考えられる。

地層処分問題は他の原子力分野における科学技術的課題や対話に必要な知識・情報との特異性から原子力の専門家にとっても理解が容易ではないという側面もあり、今後の事業推進に当たって関係者の共通認識醸成に資するため地層処分概念の開発経緯を振り返ってみる。

2 HLW問題の認知と対策の模索

地層処分の研究開発を最も早く開始したのは米国であり、1955年9月には、米国プリンストンにおいて、記念すべき会議が開かれた。この会議は米国の原子力委員会(AEC)が放射性廃棄物の地層中への処分の可能性を明らかにし、それに必要な研究を明らかにするために、全米科学アカデミー(National Academy of Sciences: NAS)に委託して開催されたものであり、世界的にも前例をみない会議であった。この会議の結果は、1957年、NASレポート「放射性廃棄物の陸地処分」として公表された[1]。

当時、国防用の原子力施設があったワシントン州ハンフォードでは、高レベル廃液用のタンクが小規模の漏洩を起

こす一方、ハンフォードやテネシー州オークリッジ等の原子力施設に隣接するサイトでは、一般のゴミ捨て場と変わりのない放射性廃棄物の地下投棄が定期的に行われており、関係者はこのような状況が長期に継続されるのは問題であるという認識を持つに至っていた。この会議の最も重要な勧告は、高レベル放射性廃棄物(HLW)を岩塩層の中に処分する方法が有望であること、従って岩塩に関する研究を直ちに開始すべきであるということであった。

1965年にコロラド州ロッキーフラッツのPu工場で火災があり、事故処理により超ウラン元素(TRU)で汚染された大量の放射性廃棄物が発生した。1969年になって、これらの廃棄物をアイダホ州内に貯蔵することについて、州知事は1970年代末までには廃棄物を州から撤去することをAECに要求した。AECはこの要求に対して、1970年に地元への事前説明なしに、カンザス州のライオンズを処分場サイトとすると発表、地元と州政府がこれに反対する事態となった。これにより、ライオンズにおける岩塩層を対象にした研究も中止に追い込まれ、本件は、放射性廃棄物処分施設の立地に社会的な合意を得ることの重要性について、関係当事者に全くその認識がなかった最初の事例として、その後批判と反省の対象となった。

3 日本の黎明期

1962年4月、原子力委員会に設置された廃棄物処理専門部会による報告書が取りまとめられ、HLWの最終処分について、「・・・経済性、安全性について最も望ましい方式を確立するため、大きな努力を払って研究を進めなければならないが、国土が狭いので、地震のあるわ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。」とする方針が定められた。

このように、当時の国レベルの検討の記録には、「地層処分」の語は見当たらず、また地層処分とみなされる概念やそれに類似した考え方が議論された経緯もないことから、地層処分という選択肢は検討の対象にはなかったものと考えられる。

4 HLW対策オプションとして地層処分に関心

ローマクラブが1972年に発表した「成長の限界」において、人口増加や工業の発展がこのまま進んだ場合、天然資源が枯渇し、環境汚染が自然の持つ自浄能力を超えて全地

Retrospect on Progress of Geological Disposal Concept by Sumio MASUDA (masuda@nsra.or.jp)

*1 原子力安全研究協会

Nuclear Safety Research Association (NSRA)

〒105-0004 東京都港区新橋5丁目18-1 新橋パークサイドビル5階

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会主催第33回バックエンド夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

球的に進行すると警鐘を鳴らしたことが大きな契機となり、環境問題が世界的に注目されるようになった。

そして、同年ストックホルムで開催された「国連人間環境会議」において「人間環境宣言」が採択され、環境保全を目的とする国際的な協調と連携による対応が開始された。

このような状況の下で、1977年にOECD/NEAが各国の専門家から成るグループの協力によって取りまとめた「原子力発電計画に伴う放射性廃棄物管理の目標・概念・戦略」報告書（Polvani報告書）[2]は、廃棄物問題を包括的な視点から捉えた最初の報告書となり、多くの国において、これを拠り所とする放射性廃棄物対策に関する計画が策定され組織的な活動が開始された。また、廃棄物処分の基本原則に関する専門家の意見を集約した「放射性廃棄物の処分：原則の概観」（Coady報告書）[3]が取りまとめられた。これらの集約意見から、貯蔵は人間による制度的・継続的な管理が必要、社会的、倫理的側面を考慮すると永続的介護（perpetual care）を必要とせずに人間環境から隔離できる受動的（passive）なシステムによる手段が望ましいとされ、最終的な措置として地層処分が注目されることとなった。

5 地層処分概念の骨格形成

1974年、NPT未加盟のインドがプルトニウムを利用した核実験を実施した事態を憂慮した米国のカーター政権は、1977年に商業用再処理とプルトニウム利用の無期限延期政策を発表した。これにより放射性廃棄物対策の大幅な見直しが必要となり、1979年には、14の関係省庁からなる検討グループ（IRG）が放射性廃棄物の管理方針についてパブリックコメントを踏まえた報告書[4]を取りまとめて大統領に政策提言を行った。この中でHLWについては、6つの候補技術（鉱山型地層処分、深海底堆積物中定置、深孔ボーリング、岩石溶解、群分離・消滅、宇宙放出）を評価し、その中から、鉱山型地層処分概念がもっとも早期に実用可能な方策であると結論づけられた。

地層処分技術の開発は、地質環境や廃棄体など個々のバリエーションを組み合わせ、多重バリエーションとして総合的にみるシステムアプローチを採用すべきであること、処分場による長期にわたる隔離の程度は処分場の設計、地層、気候及び人間活動の変化の影響に関する解析モデルによってのみ予測的に評価可能であること、永久処分へのアプローチは技術的に保守的な方法で段階的に進めるべきであること、回収可能性概念については、回収が必要な状況や技術的側面に関してさらなる定義が必要であること等現在にも共有される地層処分に関する主要な論点を当時のIRG報告書に見ることができる。

6 地層処分研究開発への取り組み本格化

国連人間環境会議における決議の1つを受けて、各国において地層処分の研究開発への取り組みが本格的に始められることとなった。スウェーデンにおいては、新規原子炉への燃料装荷の許可条件として、電力会社が使用済核燃料（SNF）あるいはHLWを安全に処分する可能性を示すこ

とを要求する「原子力条件法」が1977年に成立した。スイスにおいては、国民投票により原子力発電の継続にはHLW対策の技術的実現可能性の提示が条件とされ、1978年に原子力施設の必要性の証明と放射性廃棄物の恒久的な安全管理が可能であることの保証を求めるよう原子力法が改訂された。カナダにおいては、「核燃料廃棄物管理プログラムに関する1978年の連邦政府とオンタリオ州政府との共同声明」に基づき、地層処分の研究開発を実施することが決定された。

1972年11月ロンドンでの「海洋汚染防止に関する国際会議」において、「廃棄物その他の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」が採択され、HLWも禁止の対象として規定されることとなった。このため、日本においては、1976年10月、「HLWの処分については、当面地層処分に重点をおき、わが国の社会的、地理的条件に見合った処分方法の調査研究を進め、今後3～5年のうちに処分方法の方向付けを行うものとし、さらに、昭和60年代から実証試験を行うことを目標とする。」ことが原子力委員会決定された。この方針に基づき、1980年には、5段階立地選定プロセスを経て行う地層処分研究開発計画が定められた。可能性のある地層の概査からスタートし、第2段階において有効な地層を選定し、さらに、試験地を絞り込み、その地点で模擬固化体、次いで実固化体を用いた試験を行って、地層処分システムを確立するという手順であった。しかしながら、このような地点絞り込み方式は、1984年時点で隘路に入り込み、以降それ以上の進展をみることはなかった。

7 地層処分概念の具体化

後に日本の地層処分概念に最も大きな影響を与えることとなった報告書が米国で取りまとめられた。NASの「放射性廃棄物の地層処分による隔離システムに関する調査報告書」（NAS1983報告書）[5]がそれである。本報告書は公開と同時に日本においても紹介され、月刊誌「エネルギーレビュー」において、1983年10月号から10回に分けて東京大学鈴木篤之助教授（当時）による詳細な解説記事が掲載された[6]。

本報告の特徴は自然の地質環境が本来備えている隔離性能に着眼した考察が科学的な丁寧さをもって行われたことであった。地下深部に処分した放射性廃棄物が生活圏に影響を及ぼす可能性には、人間侵入や自然事象による廃棄物への接近の経路と地下水による放射性核種の溶解と運搬による経路（地下水移行経路）の二つがあると整理した上で、報告書の大半を地層処分システムの基本性能を決定付ける地下水移行経路に関するメカニズムの考察に当てている。このような考察において、安全性の支配的要因として重要な視点は、廃棄物を地上に置く場合は放射エネルギーの大きさであるが、地下に置く場合は放射性物質の地下水への移行量が支配的となることとされている。地下水移行に関して、放射性核種が地下水に溶け出したとしても、それが生活圏まで到達するか否かは核種の地下水への溶解度、岩石による核種の着着効果、及び地下水の移動速度から決まる放射性核種の生活圏までの移動時間が放射性核種の寿命と比較

して長いか短いかによるとしている。このため、本報告書では、核種の溶解度と岩石への収着効果、及び地下深部における地下水の水理学的特性についての研究成果が整理され、これらの科学的根拠に基づき、地質環境が本来的に有する自然のバリア機能が考察されている。特に、地球化学特性を地層処分システムの観点から丹念に検討した例は地層処分研究の歴史上、本報告書が最初のものとなった。

8 日本の研究開発方針の転換

5段階立地方式はサイトを決めてそこに適合する処分システムを作るアプローチであった。このため、各地で物理探査やボーリング調査を行う必要が生じ、必然的に地域社会との接触が起きた。地域社会においてこれらの調査は将来における地層処分場の立地を想起させるものであったことから、各地で住民から懸念の声が上がり、調査は計画通りには進まなくなった。また、計画推進に当たっては、地層処分についての国民的理解を目指した情報提供や対話の重要性が痛感されることとなった。このため、まず地層処分に関する研究開発の進め方を提示することを目的として、1989年12月、「HLWの地層処分研究開発の重点項目とその進め方」（以下、「重点項目報告書」という）が取りまとめられ、原子力委員会はこれを新たな研究開発方針として了承した。重点項目報告書は前述のNAS1983報告書に示された地層処分システムの考え方を参考に、日本における地層処分システム概念を明らかにして、そのような処分システムを設置するのに適した地質環境の条件を検討することによりサイト要件を具体化して、それを根拠にサイト選定プロセスに移行するというアプローチへの転換を目指した。多重バリアシステムに関する諸外国でのこれまでの研究開発成果を参考にすると、地層処分の安全性を決定づける重要な要素はまず人工バリアとその近傍の地層（「ニアフィールド」という。）における安全性能であり、その外より広い地層（「ファーフィールド」という。）における性能はその安全性をさらに確かなものとするという役割を担っていることが示された。この観点から、ニアフィールドの人工バリアとその近傍の地層の研究に重点的に取り組み、多重バリアシステムの性能評価研究に地質環境調査研究の成果と人工バリア等の工学技術の開発成果を集約する研究開発アプローチが採られた。ニアフィールド性能評価研究を研究開発計画の中心に置き、工学技術開発と地質環境調査研究に対して課題を提示しつつ、研究開発の優先順位を示し、また両領域の成果を性能評価に集約するというアプローチをとることにより、ニアフィールド性能評価研究を「管制塔」として、研究課題の過不足を明らかにしつつ課題間の相互フィードバックを図ることにより、合理性の高い研究管理が可能となった。

9 地層処分の特異的側面への配慮

立地問題という社会との接点が増えるにつれて、技術的課題に加えて社会的・経済的な課題がクローズアップされてきた。1987年にユッカマウンテンを処分候補地とすると

廃棄物政策法で定められたが、アメリカの地層処分計画がなぜうまくいかないのか、どんな改善策があるのかについて、NASの「HLW処分の再考」レポート[7]が取りまとめられた。

地層処分と鉱山開発の間の根本的な相違の認識、すなわち、鉱山開発は作業を進めながらの試行錯誤による安全確保が可能であるが、数万年に及ぶ地層処分の安全性は科学を適切に活用して解決すべき問題であること、将来予測に含まれる不確実性を残存させつつも安全性を保証するために、工学設計、地質現象のモデル化、性能評価、ナチュラルアナログ、予期されない事象への対応可能性等の組み合わせにより確信（Confidence）を得ること、地層処分に関する公平性、信頼性についての道義的、倫理的な要求は地層処分の本質的な要素の一つであること、及び技術的な予測の限界から究極的な答えは民主社会の大衆の選択であることを再認識すべきであること等が指摘された。

10 地層処分場閉鎖後の長期安全性評価

地層処分による安全性は機能が発揮されるべき時間が長期間となるため、通常の技術システムの安全性のように全時間空間において実証することは不可能である。このため、性能評価あるいは安全評価という予測解析に基づく方法が用いられるようになった。このような方法によって地層処分の安全性を論ずることが可能であるとの専門家の見解は、1991年にOECD/NEAの集約意見「放射性廃棄物の処分：長期安全性は評価できるのか？」[8]として取りまとめられ、IAEAとCEC（欧州共同体委員会）も含めた共同声明として発表された。

受動的なシステム（passive system）による安全性について人間の時間感覚をはるかに超える期間にわたる予測を行うことに対する課題は、①万年オーダーの処分システムのふるまいとその影響は理解できるであろうか、②予測したふるまいが実際に起こるふるまいを代表していると確信できるであろうか、③広範な読者に予測方法と結果を分かりやすく（transparentに）説明できるであろうかという疑問である。疑問に答えるという目的は以下の3つの方法、すなわち、①広範な国際的コンセンサスが得られている主要な論点を示すこと、②長期安全評価の定量的結果は一般的にどのように解釈されるかを説明すること、③評価結果の受容性に影響するいくつかの鍵となる問題を手短かに議論すること、によって達成されるとしている。その上で、放射性廃棄物の処分システムを含めあらゆる技術システムに対して安全なふるまいが続くという絶対的な証明は不可能、達成されなければならないことは処分システムが現在及び将来世代に十分なレベルの安全を与えることを確信するという間接的な実証である。このため、安全バリアの漸進的な劣化を含む起こる可能性のある状況と一連の安全バリアの破壊を含む可能性の低い状況のもとで、放射性核種の放出の結果がどのくらい深刻か、どのくらい起こりそうかという観点から安全性を評価する。また、遠い将来の生活状況の予測は不確かなので、数千年以上後の被ばく線量の計算は現在の生活習慣に基づく。したがって、そのような計

算は遠い将来の人の受ける実際の影響を予測するというより、そのような放出がもし今起きたらどのくらいの線量になるかを示すという観点で行われることとなる。

11 貯蔵と処分の関係

HLW 対策の選択肢として、地層処分による受動的な管理については、原子力コミュニティにおいても必ずしも共有された認識とはなっていない。実際、OECD/NEA において、原子力技術開発委員会（NDC）のメンバーから、なぜ貯蔵では不十分かという問いかけが廃棄物管理委員会（RWMC）になされ、これを契機に両委員会の共同作業として貯蔵と処分の関係について検討する場が設けられた。長期管理のための代替戦略について、貯蔵の役割拡大の実行可能性、より長期間に拡大する動機とその意味合いの検討等が行われ、2006 年に「長寿命放射性廃棄物の管理における貯蔵の役割」、ROST（Roles of Storage）報告書として取りまとめられた[9]。総合的な結論として、

- ① 長期貯蔵の政策が、例えば新たな技術開発あるいは多国間共同施設に基づく解決策を念頭に置いて採用されたものである場合、解決法に関する調査を実施し、開発するための活動を活発に進めなければならない。したがって、ただ単に待つだけでは十分ではない。
- ② 貯蔵施設の複数回の更新を伴うきわめて長期間にわたる貯蔵計画は非現実的であり、現世代の管理の及ばない著しい不確実性が組み込まれることになり、この種の貯蔵が履行を怠られることによって事実上の終結点（endpoint by default）になってしまう。
- ③ 責任が将来世代に手渡されるのであれば、いずれ将来世代がその責任を取り除くことができるように、責任に対処する財政面及び知識面での手段も一緒に引き継がなければならない。
- ④ 期限が設定されていない貯蔵などの「確定していない」解決策は持続可能なものではない。
- ⑤ 必要な決定を先延ばしにすることによって廃棄物を際限なく貯蔵し続けることは安全性の観点から最も多くの不確実性を伴う最悪のオプションである。

したがって「貯蔵は決して放射性廃棄物管理にとつての終結点となることはできない。」とされた。

12 まとめ

- ・ 1950 年代にアメリカにおいて初めて検討されて以来、HLW あるいは SNF の最終処分の方法に関する実現性の最も高いオプションとして、世界各国において地層処分が採用されている。
- ・ 現在までに実績のある HLW 対策技術は地表における貯蔵と岩塩層中での地層処分（米国 WIPP；現在は貯蔵状態）である。
- ・ 海洋底下処分と分離変換技術はある程度の規模で研究開発が行われた（ている）が、代替オプションとはなっていない。
- ・ 1983 年の NAS レポートが現在日本を含め各国で採用

されている地層処分概念具体化に輪郭を示すこととなった。

- ・ 日本の地層処分概念は 1989 年の「HLW の地層処分研究開発の重点項目とその進め方」による研究開発方針に基づき具体化されてきた。
- ・ 地下に定置した貯蔵状態から施設を閉鎖する最終的な合意が得られるまでは、回収可能性を残す、という考え方が国際的なトレンドになりつつあり、結局、地層処分事業とは地下貯蔵事業であり、処分事業が終了して初めて地層処分概念が成立することになる。
- ・ 地層処分概念は、世代内及び世代間の公平性への配慮、制度的管理なしに自然の機能に委ねる安全確保策、予測に基づく安全性の間接証明、必ずしも実験的証拠ではなく多面的な論拠を用いる安全性説明、といった通常の工学システムとの特異性から、テクニカルコミュニティにおいてさえ理解が進みにくいという側面を内蔵する。
- ・ とは言え、地層処分に関する多くの公開文献にもとづけば、地層処分を放棄するような決定的（あるいは、致命的）欠陥が見いだされていることはない。

参考文献

- [1] NAS: The Disposal of Radioactive Waste on Land, National Academy of Sciences. (1957).
- [2] OECD/NEA: Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes. (1977).
- [3] OECD/NEA: Disposal of Radioactive Waste: An Overview of Principles Involved. (1982).
- [4] DOE: Report to the President by the Interagency Review Group on Nuclear Waste Management, TID-29442. (1979).
- [5] NAS: A Study of The Isolation System for Geological Disposal of Radioactive Wastes Waste, Isolation System Panel, National Research Council. (1983).
- [6] 鈴木篤之：ピグフォード報告 高レベル廃棄物の地層処分について，エネルギーレビュー，1983.10~1984.7. (1983).
- [7] NAS: Rethinking High-level Radioactive Waste Disposal, A Position Statement of the Board on Radioactive Waste Management, National Research Council. (1990).
- [8] OECD/NEA: Disposal of radioactive Waste: Can long term safety be evaluated? An International Collective Opinion. (1991).
- [9] OECD/NEA: The Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive Waste. (2006).