

# 日本の地層処分研究と技術的受容性

Research and Development, and the Technical Acceptance on Geological Disposal  
in Japan

○竹内真司\*・師岡慎一\*\*・勝田正文\*\*

Shinji Takeuchi, Shin-ichi Morooka, and Masafumi Katsuta

## 1. はじめに

我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発は、1976年に開始されて以来、地層処分の技術的可能性や信頼性等を取りまとめた報告書（動力炉・核燃料開発事業団 1992, 核燃料サイクル開発機構 1999）が公表されるとともに、二つの深地層の研究施設（幌延, 瑞浪）を活用した研究開発等により多くの技術的知見が蓄積されてきた。これらの成果を踏まえて 2000 年に実施主体である原子力発電環境整備機構 (NUMO) が設立されたが、地層処分のサイト選定は難航している。このような状況を踏まえ、国は 2017 年 7 月 28 日に地層処分の国民理解の促進等を目的に科学的特性マップを提示した(資源エネルギー庁, HP)。地層処分は、多様でかつ専門的な知識が必要とされる分野であることから、全ての分野についてその詳細を理解することは専門家間でも容易なことではない。加えて、放射性廃棄物による被ばくリスクや処分場の受容といった、科学技術のみでは対応できない側面を有している、いわゆるトランスサイエンス（池内, 2012）の問題である。このような地層処分に関わる科学技術的・社会科学的な専門的知識が利害関係者に分かりやすく伝えられてこなかったことが、地層処分あるいは処分場の受容性を阻害している一つの要因と考えられる。また、これまでに検討されてきた高レベル放射性廃棄物の処分方法については、長期にわたる放射性物質の閉じ込めの観点から他のオプション（工学的な貯蔵, 海洋放出, 核種変換, 地球外処分など）に対して、地層処分が優位性を有する可能性が国際的にも議論された (OECD/NEA, 1977)。その後、研究開発は地層処分のみに対して行われてきたように受けとめられていることから、“地層処分ありき”の進め方に対する批判も受容性の阻害要因の一つと考えられる。

さらに、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律で規定された地下 300m 以深という深部の地質環境（地質, 地下水流動, 地下水の水質, 岩盤力学などの特性）は目に見えないことに加え、処分される放射性廃棄物の生物圏への影響については、数万年～数十万年程

---

\* 日本大学文理学部 College of Humanities and Sciences, Nihon University  
〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40 TEL 03-5317-9311 FAX 03-5317-9430  
E-mail: takeuchi.shinji@nihon-u.ac.jp

\*\* 早稲田大学理工学術院

度の長期に渡る安全性の確保が求められるものの、時空間的に廃棄物とその周辺の状態を直接確認できないことや、数十万年先の安全評価結果の不確実性は、心理的不安を抱かせることとなり、これらも技術的受容性を阻害している要因になっていると考えられる。

本稿では、国際的な議論の中で地層処分が選択された経緯、地層処分の概念とこれまでの研究開発成果について概説した後、地層処分事業が進まない現状を踏まえ、地層処分の技術的受容性を阻害する要因について検討した結果を紹介する。さらに回収可能性を考慮した地層処分や長期間の地上管理など、地層処分のオプションとしての放射性廃棄物の能動的管理の技術的側面について言及する。最後に、今後放射性廃棄物処分を進める上での対応策を提示する。

## 2. 国際的な議論の中での地層処分の選択の経緯-地層処分の背景-

ここでは国際的に地層処分が採択された経緯について概観する（増田，2016）。

最初の地層処分に関する議論は、1955年9月の全米科学アカデミー（National Academy of Science: NAS）のプリンストン会議における、放射性廃棄物を岩塩層中に処分する方法の有効性に関するものである（NAS, 1957）。1977年には、経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）が取りまとめた報告書「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」の中で、地層処分、地上での工学的貯蔵、長寿命核種の消滅、地球外処分などの比較により、長期にわたる信頼性のある閉じ込め手段として地層処分が推奨されている。なお、地上での工学的貯蔵についてもこの間に魅力的な処分概念を詳細に評価する期間として有効活用されるべきとの議論がなされている（OECD/NEA, 1977）。さらに、OECD/NEAが1982年に取りまとめた「放射性廃棄物の処分：原則の外観」では、放射性廃棄物処分の管理に関する基本原則に関する意見集約として、将来世代に対する責任としては、廃棄物処分問題は現世代が負担し、将来世代の負担を極力少なくするという考え方が支持されている。また受動的システムと永久管理の比較では、後者の管理を将来世代に負担させることを考えるべきではないとしている。さらに、回収可能性については、処分の定義（回収する意図なく放射性廃棄物を放出しあるいは措置すること）からすれば、処分施設における廃棄物の回収計画はないことは明らかであるが、これは回収が不可能であることを意味していない。分散状態ではない物質であればほとんどの回収は可能である。また何らかの理由で処分された廃棄物の回収機能を付与する決定がなされた場合でも処分システムの健全性を犠牲にしないよう留意が必要であると示されている（OECD/NEA, 1982）。

我が国においては、1972年に採択され1975年に発効した、「ロンドン条約」（通称）により高レベル放射性廃棄物の投棄が禁止対象となったことを受け、当時の原子力委員会放射性廃棄物対策技術専門部会の議論の結果、当面地層処分に重点をおいた調査研究を進めることが原子力委員会決定として公表され（原子力委員会，1976）、以来、国家プロジェクト

として位置づけられ研究開発が進められている。その後、1980年には原子力委員会は、同放射性廃棄物対策専門部会の検討結果を受け、地層処分研究開発について以下の5段階で実施する方針を了承した（原子力委員会、1980）。なお、上記専門部会報告書には、地層処分の代替技術として、群分離・消滅処理や長期貯蔵（処分の実施が遅れた場合の対応として）の研究開発、海洋底下処分に関する調査も推進する必要がある旨が記述されている。

第1段階：可能性のある地層の調査

第2段階：有効な地層の調査

第3段階：模擬固化体現地試験

第4段階：実固化体現地試験

第5段階：試験的処分

これにしたがって、当時、研究開発の主体であった動力炉・核燃料開発事業団は、第1段階の調査を進め1984年に中間報告を取りまとめた。この中でわが国における有効な地層は岩石の種類を特定することなく広く考え得ることや、地質条件に応じて必要な人工バリアを設計することで、地層処分システムの安全性を確保できる見通しが得られたこと、処分の実施主体は適切な時期に具体化すること、などが示された。しかしながら、このような有効な地層を絞り込む方式は、調査結果の評価において客観的な判断基準がなかったことや現地調査（物理探査やボーリング調査）の合意形成が難航したことにより次段階以降には進展しなかった（増田、2016）。

上記中間報告の1年前に公表されたNASの報告書（1983）では、地層処分に関して地下深部に処分した廃棄物が生活環境に影響を及ぼす可能性として地下水移行経路に着目した考察が行われ、科学的なデータに基づいて地質環境が本来的に有するバリア機能が紹介された。これによれば、ほとんどの放射性核種はその場所に固体のまま留まっている、溶出した核種のほとんどはその近傍で崩壊する、わずかに運ばれる放射性核種は大量の地下水により希釈される、などとしており、岩種を基準とした処分場の適否判断は適当ではないとした（NAS, 1983）。同時期にスウェーデンSKBが報告した地層処分の実現性評価報告書

（SKBF/KBS, 1983）やスイスNagraが1985年に公表した放射性廃棄物処分の実現可能性に関する報告書（Nagra, 1985）などが公表され、それらの中で提案された多重バリアシステム

### 3. 地層処分の概念-安定な地質環境と安全評価の考え方-

地層処分の基本的な考え方は、地下300m以深の安定な岩盤（天然バリア）に放射性廃棄物を人工バリア（ガラス固化体+オーバーパック（鋼鉄製容器）+緩衝材（粘土系材料））で覆った状態で埋設することによって放射性廃棄物と人間環境との距離を確保し（隔離）、さらに、地下深部の還元的な環境における化学反応の進行の抑制と緩慢な地下水流速によ

り、漏出する放射性核種の移行を人工バリアとその周辺岩盤で抑制する（閉じ込め）というものである（図1）。地層処分にとっては人工バリアの長期的変形を受けにくく、地下施設建設への影響も小さく抑えられるような堅硬な岩盤や、緩衝材の変質や劣化が生じない程度の低い地温、放射性核種の移動速度が遅く、緩衝材の流出などが抑制されるような緩やかな地下水流速、ガラス固化体や放射性核種の溶解性、人工バリアの閉じ込め性の低下が抑制されるような酸性（低 pH）ではない地下水条件を有する岩盤が安定な地質環境ということになる。このような環境は内部・外部からの擾乱に対して、地質環境が有する緩衝能力によって、長期にわたって突発的あるいは急激な機能喪失を生ずる可能性が低いことから地層処分にとって安定であると考えられている。このような地質環境は日本列島全体を対象とするような広い領域の安定性が必要となるものではない。

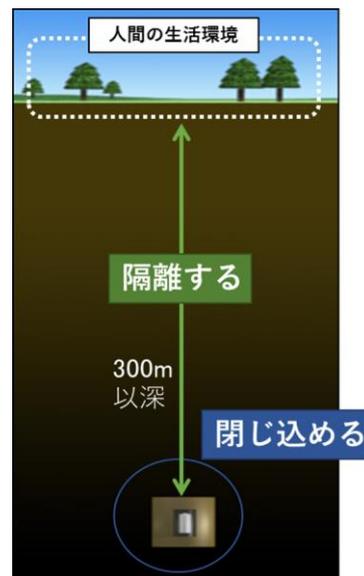


図1 地層処分の概念 (NUMO 資料)

さらに安全評価（後述）に求められる期間の予測が可能な地点であることが必要となる。これは地質環境の理解度とその地点での予測可能な期間に依存することとなる。

このような地層処分が成立する上で安定な地質環境に擾乱をもたらす要因として、隆起・侵食、火山噴火、人間の掘削行為、断層活動、熱水・深部流体の流入、海水準変動が考えられる。これらのうち、隆起・侵食、火山噴火、人間の掘削行為は上述の隔離性に影響する（距離を縮める）要因となり得る。また断層活動、熱水・深部流体の流入、海水準変動は閉じ込め性に影響する（移行経路の短絡、酸化性地下水の流入など）要因となり得る。上記の要因は、日本列島においては発生する位置が限定的であったり、変化速度が緩慢だったりするため、影響を受ける地点は避けることができると考えられる。さらにこれらの擾乱をもたらす可能性のある要因の将来の変動は、発生位置や過去の変動の周期性を把握することが可能であり、この偏在性や周期性の特性に基づいて将来のある一定期間における変動予測が可能と考えられる（図2）（吉田 2012）。また、将来予測の不確実性に関しては、より近い将来の方が予測結果の蓋然性が高く（例：100 万年後より

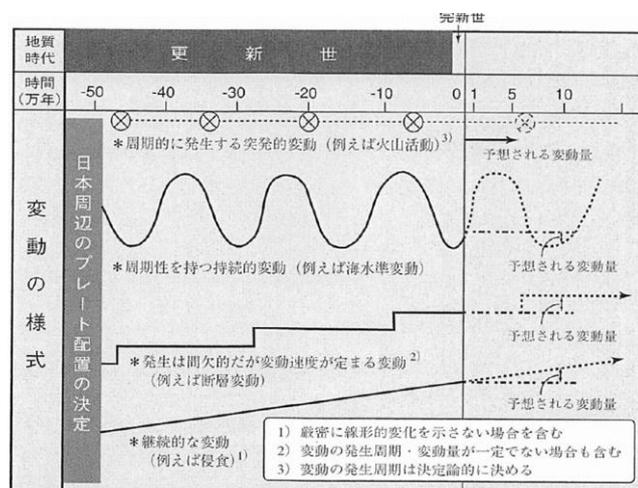


図2 地質環境の将来予測の考え方（吉田，2012）

10 万年後の方が予測結果の不確実性は小さい)、さらに変化速度が緩慢な現象ほどより長期の予測が可能と考えられる。このような予測においては科学的客観性が確保されていることが求められることから、専門家間あるいは専門家とその他の利害関係者との間での十分な議論が必要不可欠である。

地層処分場の閉鎖後長期の安全性は、放出された放射性核種によるサイト周辺の住民の被ばく線量を数値解析により評価する。この際、数万年～数十万年先の安全性を直接実証する(言い当てる)ことは不可能なことから、シナリオに基づくモデルを構築して予測するという間接的な手法をとる。すなわち、起こり得る事象(シナリオ)を検討し、人工バリア、天然バリア中での地下水や核種移行などのモデル化を行い、地質環境のデータに基づいて将来のシステムの振る舞いを数値解析により予測し、影響を定量化する。これによりシステムの安全性が確保されるか否かを判断するための材料を提供する。この安全評価の妥当性は、上述のシナリオの十分性、採用したモデルやデータの妥当性、数値解析の手順や実施の適切性などの観点から、第三者に理解されるように透明性が確保されていることが重要である(増田, 2016)。例えば、安全評価の中身(記述されたシナリオ、採用したモデルやデータ)が明らかにされない評価結果と、各プロセスの中身が開示された評価結果を比較した場合、後者の方がより透明性が確保され、第三者に理解される程度が高いことは明白である。このような観点から、核燃料サイクル開発機構(現、日本原子力研究開発機構)が 1999 年に公表した、地域を特定せず日本の代表的な地質環境を想定して実施した地層処分の安全評価に関する報告書(H12 レポート; 通称)では、ガラス固化体 40,000 本のオーバーパック全てが 1,000 年後に機能を失って漏洩した放射性核種が、深度 1,000m に設置した処分場から 100m の距離にある断層破碎帯に沿って地表付近の帯水層に移行し、これをひとが取り込んだ場合の被ばく線量を基本ケースとして評価した(図 3)。解析では多様な岩種、多様な地下水組成、複数の動水勾配、シナリオ、データ、モデルの不確実性を設定した。その結果、天然バリアを考慮しないケース(人工バリアのみ)や隆起・侵食速度が極端に早いケースなどで上述の基本ケースと比較すると高い(3~4 桁大きい)最大被ばく線量を示したが、いずれの結果も諸外国で提案されている安全基準値(100~300  $\mu$  Sv/y)あるいは我が国の自然放射線レベル(900~1200  $\mu$  Sv/y)を下回ることを示された(図 4)(サイクル機構, 1999)。

近年では、安全評価結果だけでなく安全性の確保に関する様々な論拠や証拠を統合して、地層処分システムの安全性を説明する「セーフティーケース」(IAEA, 2012)の概念が導入されている。これは、最大限の努力を払って証拠を集め、議論を尽くして処分システムの安全性を説明したもので、地層処分計画を進める中で技術の進歩や地質環境に関する知見の蓄積を反映しながら繰り返し作成し、恒常的に信頼性を向上させるものである。

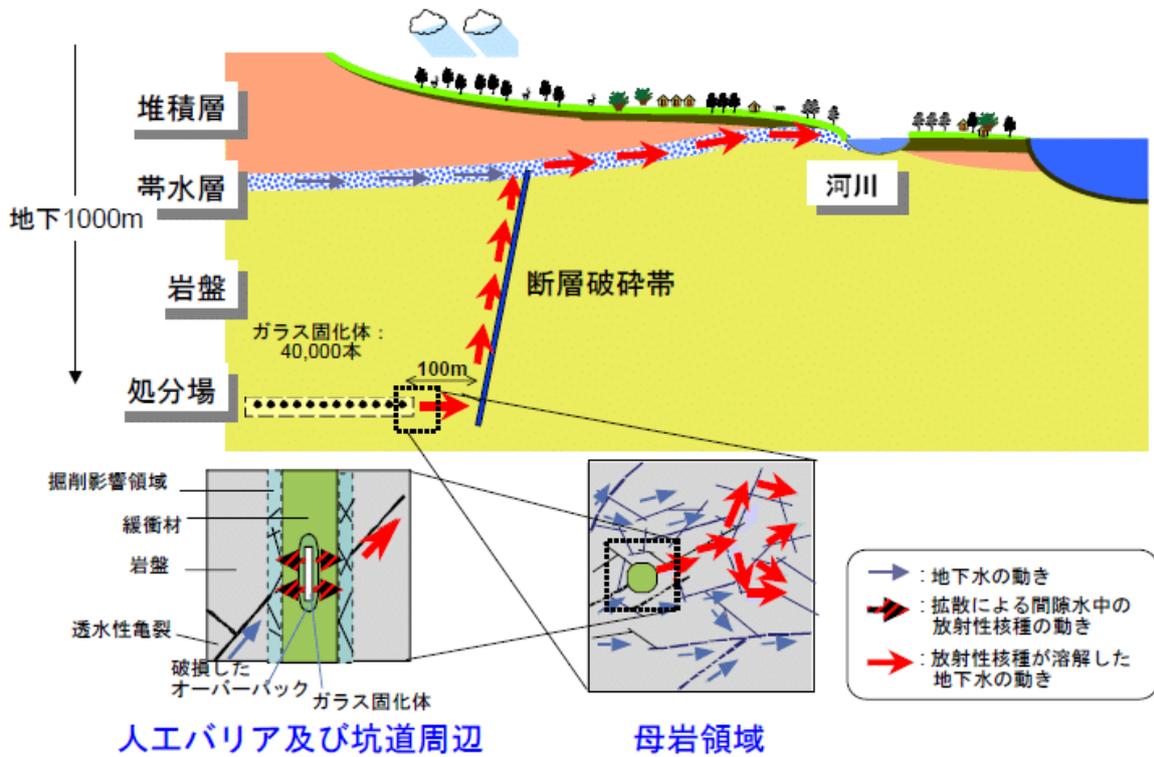


図3 H12 レポートにおける基本ケースの概念 (サイクル機構, 1999)

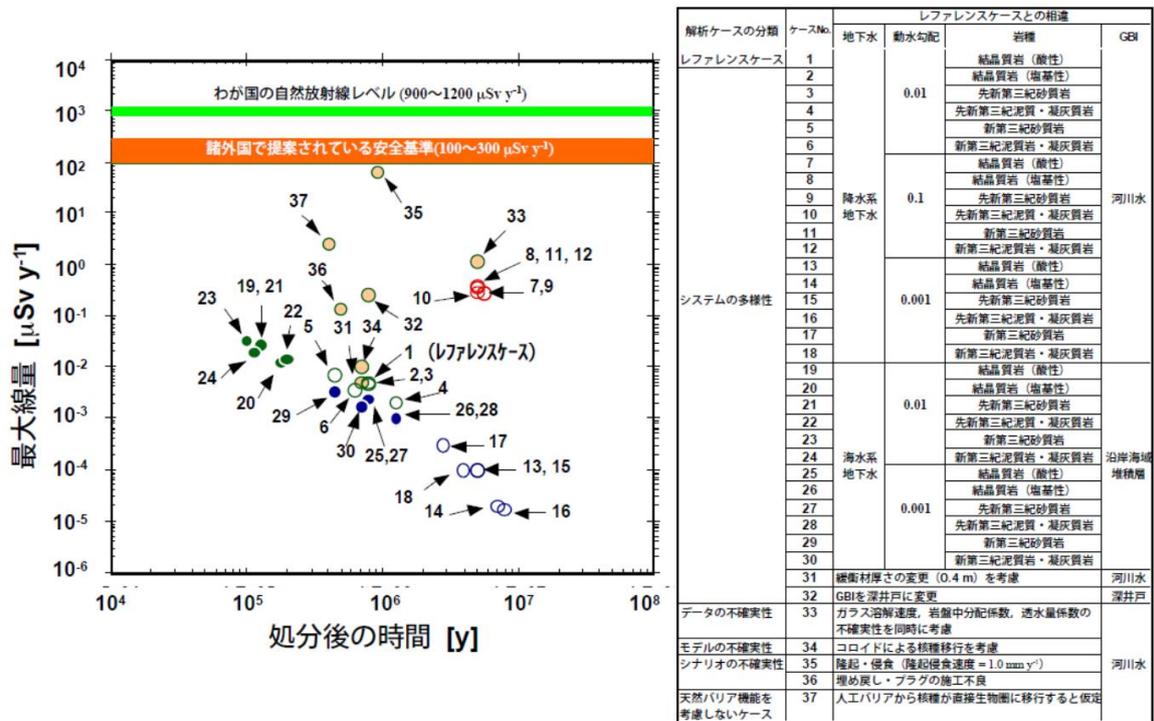


図4 H12 レポートの評価結果 (サイクル機構, 1999)

#### 4. 地層処分の技術的受容性を阻害する要因

上述のように、地層処分は1950年代からの放射性廃棄物管理の歴史の中で、地層処分以外のオプションとの比較や国際条約等との関係から、国際的な議論の場を通して選択されたものであることを紹介した。地層処分のそもそもの考え方や地層処分にとって安定な地質環境や安全評価の考え方など、歴史的な経緯を耳にする機会は少ない印象がある。このような状況下で地層処分の技術的受容性を阻害する要因として考えられるものをいくつか

列挙し、大学生を対象としてアンケートを実施した。対象とした学生は地球科学を専攻しており、授業の中で地層処分の基本的な知識は有している学生が多い。アンケートは、地層処分の技術的受容性を阻害していると考えられる要因について、著者の20年以上におよぶ地層処分関連の研究開発に携わった経験や関連する資料などを基に抽出した。約70名の学生を対象に、各項目に対してYesあるいはNoでの回答を集計した（複数回答可）。項目は以下の5項目である

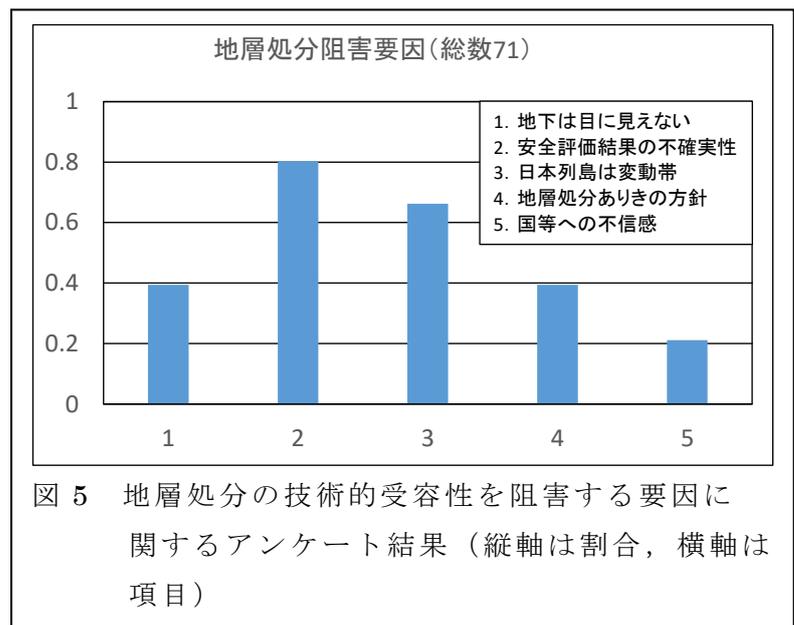


図5 地層処分の技術的受容性を阻害する要因に関するアンケート結果（縦軸は割合、横軸は項目）

1. 地下は目に見えない
2. 数十万年先までの安全評価結果は不確実性が大きい
3. 日本列島は変動帯に位置するため適地が存在しない
4. 地層処分ありきの方針
5. 国や実施主体に対する不信感

結果を図5に示す。これによると、2（数十万年先までの安全評価結果は不確実性が大きい）と3（日本列島は変動帯に位置するため適地が存在しない）が6割を超え、1（地下は目に見えない）、4（地層処分ありきの方針）も約4割が阻害要因として挙げた。2. を阻害要因と考える学生の割合が高いことについては、安全評価は結果の検証ができるものではないため、評価過程の透明性の確保や関係者間での議論による合意形成を得ていくものであるということを実感的に理解することが容易ではないあるいは、理解できても受け入れられないことが背景にあると考えられる。この安全評価の考え方については正確に理解されるよう、平易な言葉で説明することが必要不可欠と考えられる。3. からは、地球科学を専攻している学生でも、地層処分にとって安定な地質環境が日本列島全体に存在することが

必要と考える学生が多数存在していることから、地層処分に求められる安定性について理解できるような説明が十分に行われることが必要であることを示唆している。また1. については一般的には阻害要因として考える傾向が高いと思われるが、地球科学を専攻する学生は数百万年あるいはそれ以上の地質環境の頑健性を化石や鉱床の存在などから具体的にイメージできることから、比較的低い値を示したものと考えられる。4. については、地層処分が採択されるにいたった経緯を説明していない段階での設問であったが、半数弱の学生が是としていることから、地層処分のみの方針では十分な理解が得られにくいことを示唆していると考えられる。

## 5. 放射性廃棄物の能動的管理の技術的側面

既述のように、地層処分は本来受動的な安全性を基本とした概念であるが、フランスなどでは回収可能性のある地層処分が検討されてきている。また、我が国のように既に放射性廃棄物が貯蔵施設に満杯状態にありながら、処分サイトが決まらない状況下では結果的に地上における長期間の管理が必要となってくる。これらは上記の受動的安全性に対して、能動的安全性が求められる。放射性廃棄物の回収可能性の具体的な検討事例についてはフランスの事例がある（Andra, 2016）。フランスの概念は放射性廃棄物を完全には埋め戻さないで処分場に定置する概念であり、回収が必要となった場合は、基本的に定置と逆動線で回収するという考え方である。また、地上での放射性廃棄物の管理については、冒頭の地層処分の背景の中で示したように、短期間での有効性は提示されてきているが、これを長期にわたって継続できる保証はない。またこの間での施設の老朽化に伴う補修も必要となり維持管理の問題も発生する。このことは人間の管理を前提とした政策立案、実施、評価は放棄せざるを得ない（松本, 2012）ことを示唆している。しかしながら、将来、より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにするため、可逆性と回収可能性（再取出し）あるいは限定された期間での地上管理をオプションとして準備しておくことは有効と考えられる。再取り出しについては、全ての工程を遠隔操作で実施することは現状技術では容易ではなく、作業員の放射性廃棄物への接近に伴う被爆リスクなどを評価しておく必要がある。再取り出し時の具体的な安全性の評価事例は皆無であり、今後の検討が望まれる。この再取り出しに関しては、その判断がなされた時点での廃棄物の状態を把握することが被爆リスクの低減につながるものと考えられる。そのためのモニタリング項目やその方法については、必要性も含めて検討しておくことが重要である。

## 6. 結論

本論では、地層処分が採択されるに至った歴史的な背景、地層処分の概念（地層処分にとって安定な地質環境、安全評価の考え方）、研究開発の成果、地層処分の技術的受容性を阻害する要因、放射性廃棄物の能動的管理の技術的側面などについて述べた。

地層処分は長い国際的な議論の中で選択された方法であり、長期にわたって放射性廃棄物を生活圏から隔離するための、現段階では最も有効な方法と考えられる。しかしながら技術的な内容は極めて専門性が高いことから、国民を含む多くの利害関係者が必ずしも理解できるものばかりではない。また専門家間でも多様な意見があり、一様のコンセンサスが得られていない事項も存在すると考えられる。地層処分は、数万年～数十万年先の安全性を評価することから、予測結果の信頼性が技術的受容性を左右することとなる。そのためには、地層処分が採択された背景、地層処分にとって安定な地質環境、安全評価の考え方など、専門的な内容を分かりやすく説明すること、そのような場を設けること、すなわち利害関係者が自由闊達にコミュニケーションをする場を提供することが重要である。このとき、これまで実施されてきたような国や実施主体、研究開発の専門家等による一方的な説明ではなく、双方向で意見のやり取りができるよう、関係者がフラットな立場で冷静な議論が展開されることが重要である。この際、組織に対する不信感も少なからずあることから、直接関連組織に属していない大学などの中立的な立場の人間が主催する議論の場（吉田，2012）を提供することが有効と考えられる。さらに、説明の中では地層処分あるいは処分場として選定されたサイトの優位性のみを強調するのではなく、デメリットについても全て提供した上で議論をすることが重要と考えられる。さらに関連する全ての資料をだれもが閲覧できる公文書館（松本，2012）などの設置も有効と考えられる。また学校教育における地層処分に関する教育も重要である。

一方で地層処分のサイト選定の現状を考慮すれば、今後の放射性廃棄物の処分対策については地層処分を基軸におきつつも、地上での長期管理や回収可能性を担保した地層処分、あるいは現行の地層処分システムに対するオプションとしての直接処分や深孔処分、あるいは放射性廃棄物の減容化・有害度低減技術などについても併せて検討・評価し、将来世代の意思決定や今後期待される技術開発などにも柔軟に対応できるよう体制を整えておくことも重要である。このような地層処分の代替オプションの検討は、結果として地層処分が受容される近道かもしれない。また放射性廃棄物処分は長期にわたる事業になることから、継続的な人材育成や技術継承が重要となる。例えば、地層処分に関する研究開発を実施している岐阜県瑞浪市、北海道幌延町の二つの地下研究施設はこのための重要な施設であり、処分場にならないことを前提として継続的に活用すべきである。

## 引用文献

池内 了 (2012) : 科学の限界, ちくま新書, p.204.

核燃料サイクル開発機構 (1999) : 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- 総論レポート, JNC TN1400 99-020.

原子力委員会 (1980) : 高レベル放射性廃棄物処理に関する研究開発の推進について, 原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会, 昭和55年12月19日.

原子力委員会 (1976) : 放射性廃棄物対策に関する研究開発計画, 原子力委員会放射性廃棄物対策技術専門部会, 昭和51年6月.

動力炉・核燃料開発事業団 (1992) : 高レベル放射性廃棄物処分研究開発の技術報告書-平成3年度-, PNC TN 141092-081.

増田純男 (2016) : 高レベル放射性廃棄物を地下深くに終う地層処分, 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター, p.123.

松本三和夫 (2012) : 構造災 科学技術社会に潜む危機, 岩波新書, p. 203.

吉田英一 (2012) : 地層処分 脱原発後に残される科学課題, 近未来社, p. 168.

資源エネルギー庁 HP (科学的特性マップに関するサイト) :

[http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/rw/kagakutekitoku/seimap/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitoku/seimap/) (2018年7月13日閲覧) .

Andra(2016): DOSSIER D'OPTIONS DE SÛRETÉ PARTIE EXPLOITATION (DOS-EXPL), CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060/A

Nagra(1985): Project Gewähr 1985: Nuclear waste management in Swizerland: Feasibility studies and safety analysis, NGB 85-09. Ngara, Baden, Swizerland.

National Academy of Science (1983): A study of the isolation system for geological disposal of radioactive wastes, Isolation system panel, Board on Radioactive Waste Management Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Resources, National Research Council.

National Academy of Science (1957): The disposal of radioactive waste on land.

OECD/NEA(1977) : Objectives, concepts and strategies for the management of radioactive waste arising from nuclear power programmes.

OECD/NEA(1982) : Disposal of radioactive waste: Overview of principles involved.

SKBF/KBS(1983): Final storage of spent nuclear fuel: LNS-3, Swedish Nuclear Fuel Supply Co., Division KBS, Stockholm.