

放射性廃棄物処分における可逆性と回収可能性

パート 2

決定を覆したり廃棄物を回収したりできることは、いくつかの国で開発中またはすでに実施中の処分場計画の意思決定過程に直接関係するので、可逆性と回収可能性の問題は最近注目を集めている。

回収可能性のための実際的な要件

廃棄物を回収可能であると主張するには、その実行可能性を保証するために、下記のような実際的な要件を満たす必要がある。

●廃棄物定置後の処分場開発の各段階における技術的理解と能力

●回収に関する現在の技術能力に関する何らかの欠点を是正するための、研究開発による機器と手法の設計

本記事は、経済協力開発機構（OECD）の原子力機関（NEA）が発表した「放射性廃棄物の地層処分における可逆性と回収可能性：国際レベルの考察」を改作したものであり、NEAの厚意による許可を得て再掲するものである。本誌の2002年11／12月号に掲載されたパート1では、概念と用語法を中心に記し、処分計画において可逆性と回収可能性が考慮されるかもしれない理由を述べた。パート2では、実際的な問題と影響について述べる。

OECD/NEAの完全な文書は、インターネット・サイト「www.nea.fr」から入手できる。また、同サイトからNEAの小冊子を注文することもできる。

●技術と意思決定能力を常に確保するための、適切な制度の整備と立案

●さまざまな回収方法のために必要な条件が満たされていることを確認するための、サイトと処分場の監視

処分場開発の各段階における廃棄物回収の技術的な実行可能性

欧州委員会の「共同行動」報告書は、13の期間について廃棄物回収の技術的な実行可能性を論じた。本記事では、処分場開発を、主として回収を達成するうえでの物理的容易性に基づいて大きく4段階に分け、各段階の回収について論じる。

使用済み燃料および高レベル放射性廃棄物の処分場のあらゆる段階における一般的な難しさは、廃棄物から発生する熱と放射線への対処である。換気によって、長期貯蔵と回収可能性のために受容できるレベルに温度を下げるか、または高温条件下で廃棄物を遠隔回収できる方法を設計する必要がある。高放射線場によっても、同様に廃棄物を遠隔回収する方法が要求されるかもしれない。処分概念によっては、廃棄物を安全に回収するには温度と放射線場が

高すぎる期間があるため、回収が望まれる場合に、その遅れを余儀なくされるかもしれない。

廃棄物定置期間中

ほとんどの処分場設計において、完全な廃棄物容器は、トンネル、坑道、またはボーリング孔に定置される。(本記事で述べる「ボーリング孔」は、1～数個の廃棄物容器を収容するための、アクセス道または保管室から掘削される数～数十メートル程度の比較的短いボーリング孔を指す。一部の国では、「ピット」という用語も使われる。) 定置には、遠隔操作機器を使用する。定置区域は監視され、地下水浸入防止や換気などの環境管理が行われる。ほとんどのシステムでは、遠隔定置用機器は逆モードで使用できるように設計されており、例えば、欠陥容器や落下した容器の回収や、必要であれば廃棄物の大規模回収に使用できる。各容器がすぐに埋め戻される場合、例えば不完全な定置を是正できるようにするために、通常設計の一環として、埋め戻し材を除去する手段も必要になることが多い。したがって、処分場に廃棄物を定置する期間中は、定置用システムを逆モードで使用するによって廃棄物を回収できると期待される。

廃棄物定置後、通路と保管室の埋め戻し前

処分場概念によっては、埋め戻しを予定しない場合や、埋め戻しを一定期間延期できる場合がある。これは、すべてのサイトおよび設計について実際的なわけではない。しかし、一部のボーリング孔定置型設計では、ボーリング孔自体は埋め戻しても、定置室やボーリング孔へのアクセス通路はそのままにすることにより、定置用機器の逆モード使用による廃棄物の回収が可能かもしれない。特に、膨張する物質を使用する場合や、岩石クリープがある場合に、埋め戻されたボーリング孔からの容器の取り出しについて特別の考慮が必要かもしれない。地下開口部の安定性と良好な環境条件が長期的に保たれることを保証するために、追加の設計策が必要かもしれない。

通路と保管室の埋め戻し後、処分場の閉鎖前

定置用トンネル、坑道、通路などを埋め戻した後も、中央の廃棄物取り扱い区域、付帯設備区域、およびアクセス道はそのまま残しておくことができる。これらの区域では、必要な検査と保守を容易に実施できる。定置用トンネルへのアクセス点に最終的な密閉を施すか、または一時的密封を施すだけでよいかもしれない。ほとんどの概念では、定置区域の埋め戻し材が、廃棄物容器周辺の安定な物理・化学的環境を形成する。したがって、定置の幾何学形

状が保全され、廃棄物容器が劣化してもその進行は非常に遅いので、長期にわたって健全な容器を位置決め・回収できる見込みが十分にある。

回収においては、地下密閉部があればそれを破壊し、必要であれば岩盤安定性の再構築に留意しながら埋め戻し材を漸次除去し、廃棄物容器の周囲を注意深く掘削する。廃棄物容器周辺の埋め戻し材を遠隔除去し、容器を取り出し・昇降するために、特別の機器が必要かもしれない。そのような機器は、基本的に、採鉱と原子力デコミッションングにおいて今日使用されているものによく似ているであろう。

処分場の閉鎖後

閉鎖では、ほとんどまたはすべての地下区域を埋め戻し、さらにアクセス立坑および／または坑道を埋め戻して密封する。大半の地上施設も撤去されるが、サイトの保安と情報に関連する構造物は残されるかもしれない。

閉鎖は、技術、管理、および社会的な観点から、処分場の開発における重要な節目である。まだ回収が考慮される地下施設から、最終処分施設への移行を意味する。そのような移行は、サイトにおける処分の長期安全性について非常に高い技術的信頼性が得られ、廃棄物を回収するほかの理由が見当たらず、社会的受容がしっかり確立した場合にのみ実施される。したがって、この段階を経た後に廃棄物が回収される可能性は非常に低い。しかし、少なくともサイトと廃棄物に関する情報が保全される間は、採鉱技術によって廃棄物を回収することは可能であろう。

廃棄物回収手順は、処分場閉鎖後の経過時間によって変わると思われる。閉鎖後数年から数十年程度の短期間は、処分場のアクセス道と通路を再び開通させることが可能かもしれない。それより長期間になると、特にクリープ性の岩盤やあまり頑強でない岩盤の場合、地下開口部はもはや安定ではないので、新たな立坑やアクセス道の掘削が必要になるであろう。

廃棄物回収のための研究開発要件

廃棄物定置期間中と本格的な埋め戻しを行う前は、通常、定置用システムを逆モードで使用するによって廃棄物を回収できる。埋め戻し後、特別の手法が必要になるかもしれないが、原則として、採鉱と原子力デコミッションング・プロジェクトで今日使用されているものと同様の機器を使えるであろう。使用済み燃料と高レベル廃棄物の容器周辺に存続する高温・高放射線場で掘削および回収作業を行うために、特別の手段が必要になるであろう。地

質環境によっては、温度と放射線レベルが低下するまで回収を延期することが望ましいかもしれない。

廃棄物回収のために必要な手法と機器は、廃棄物の地上貯蔵、採鉱、地下構造物の建設、および原子力デコミッショニングにおいて今日使われているものと同様であり、新しい技術や異質の技術は要求されない。特定の処分場設計における回収のために必要な技術の一部は、実証中または実証済みである。例えば、英国のNIREX社によるセメント埋め戻し材からの廃棄物容器の切り出しと、スウェーデン核燃料廃棄物管理会社（SKB）のKBS-3概念に従って定置された使用済み燃料容器の回収が挙げられる。このような実証は、さまざまな国内および国際研究計画において奨励される。実証により、廃棄物回収の実行可能性に関する技術的信頼性が高まるとともに、回収に関する廃棄物管理組織の実行可能性と真剣さについて技術以外の信頼性も高まる。回収は、今日の技術で達成できるが、関連しうる技術の開発を常に注視する必要がある。地下環境を長期的に管理・監視する方法や、廃棄物を回収する方法の改良につながるかもしれないからである。

回収のための制度整備と立案

廃棄物回収が実行可能であるためには、下記事項を保証するように制度を整備する必要がある。

●廃棄物定置後の各段階で、回収のための適切な技術能力が保たれる。

●予想しうる機器故障および事故の条件下を含めて、回収方法を定義する。

●操業安全性、潜在的な長期安全性、および下記措置の妥当性と必要性に焦点を当てて、処分場の状況を定期的に評価する。

- －処分場閉鎖に向け、次の段階に進む。
- －修理または保守要件を指定し、現段階を維持する。
- －段階を逆に戻し、必要であれば廃棄物を回収する。

サイトと処分場の監視

建設開始前から閉鎖までの期間を通じて、サイトと処分場のさまざまなパラメータを監視することによって、安全性評価のための情報が得られる。これには、サイトの自然条件の確認、処分場に対する天然システムの応答の理解、および工学的要素の初期変化が含まれるかもしれない。多くの設計において、開放期間の延長のような回収可能性を高める手段は、サイト条件を変化させ、長期安全性のための条件を遅らせたり阻害したりする。性能に関する監視

計画は、慎重に検討し、筋の通った議論を適用することにより、測定パラメータと最終的な長期安全性の関連を明らかにすべきである。

操業期間中とその後の延長開放期間中には、岩盤安定性、地下環境、および廃棄物容器の状態の監視が必要になる。そのような監視は、操業安全性を保証し、岩盤支持システムなどにおける初期不具合のリスクを検出し、所与の方法に従った廃棄物回収の条件が満たされていることを確認するうえで必要である。監視の結果は、さまざまなシステムと地下構成要素の保守・改修を計画するために利用される。監視結果を利用して、保守と改修のために顕著な追加支出をせずに所与の段階を維持できる期間をより正確に推定できるので、処分場閉鎖に向けた次の段階への移行時期の決定にも役立つかもしれない。開放期間の延長が、長期安全性や操業安全性を損なう恐れがあることが明らかになった場合は、一部の地下開口部の埋め戻しが促されるかもしれない。

埋め戻し状態などのその後の監視は、人工バリアの初期変化を追跡し、期待される安定な物理・化学条件への移行が起きていることを確認するために行われる。また、廃棄物回収の決定がなされた場合に、利用可能な方法に従って廃棄物を回収するための条件が満たされていることを確認するうえでも、監視結果を活用できる。使用済み燃料と、核分裂性物質に富む他の廃棄物については、安全のための監視とともに、違法に回収されていないことを検証する原子力保障措置のための監視が要求される。これは、処分場の操業期間中と延長開放期間中に、一般の原子力発電所で行われているようなオンサイト管理と監視によってなされる。閉鎖後期間中も、オンサイト技術と遠隔技術を用いて監視を続けることができるであろう。例えば、音響技術、航空写真術、および衛星画像を用いて、回収を意図したボーリングや掘削作業を発見できるかもしれない。公衆の懸念を緩和するための政府による監視は、安全や保障措置の必要性を理由に、規制当局が提案した期間を超えて続けられるかもしれない。

国の政策への影響

深地層処分場の開発は、何十年もかかる大規模な国家プロジェクトである。この期間中に、国内および国際的に経験が蓄積され、実施中のプロジェクトに反映されていく。安定で包括的な国内政策は、決定のための枠組みと、組織と資金の準備のための期待される開発の指針を提供する。各決定段階で幅広い見直しと投入を可能にする段階的な意思決定の慣行は、十分に確立されている。この方式では、決定を逆に戻すことができる。

放射性廃棄物が、安全に、環境と調和的に、かつ経済的に管理されるような原則を規定する政策は、潜在的な資源価値や他の要因を考慮しつつ、種々の廃棄物について考慮すべき回収可能性の程度を含めて、可逆性をどのように導入すべきかを述べるべきである。また後述するように、政府は、政策を遂行するために財政、組織、および規制面の整備を行う必要がある。

財政の準備

可逆性と回収可能性を組み込むことは、財政に影響する。これには、可逆性と回収可能性を高めるための設計変更コストが含まれるが、より重大なのは、開放期間の延長が必要な場合、処分場と組織の枠組みを何百年、さもなくば何十年にわたって監視、防護、管理するためのコストである。

廃棄物管理コストには、経済的外部効果を最小化または除去することを目的とする「汚染者支払いの原則」を適用できる。原子力産業界は、核廃棄物の発生者として、廃棄物の回収可能性をある程度の期間維持することのコストと、回収オプションをさまざまな程度で実施することに関連するコストを見積もり、これらを生産物（電力）の価格構造に組み込むべきである。しかし、政治と世論の潮流に応じて回収可能性の維持が無期限の責任になった場合、原子力産業界はコストを合理的に予想することができず、生産物の価格を合理的に決めることもできなくなる。この場合、適切なエネルギー供給に関連する大きな社会的便益があるので、一定期間を超えた可逆性と回収可能性の維持について政府が責任を負うことが考えられる。高水準の回収可能性の持続や処分場閉鎖への移行に関する政府の決定（または何年かにわたる一連の決定）は、国の全体的な資源割り当てを勘案したうえで下すことができる。

組織の準備

組織を整備することは、前述のような監視の調整を含む制度的な計画の準備である。放射線の問題に対処する能力を含めた、回収可能性のために必要な専門技術を国内で確保するためにも、組織を準備する必要がある。そのような専門技術は、現在、原子力産業界および関連する規制・研究機関に集中している。しかし、多くの国で原子力産業の存続が危ぶまれており、適切な水準の専門技術を保つために政府の介入が必要かもしれない。

規制の準備

現行の国際指針と国内規制は、主として、操業安全性と長期（閉鎖後）安全性のための設計目標を取り扱っている。回収可能性と可逆性、およびそれらの影響については、あまり考慮されてこなかった。影響として考えられるのは、より長期にわたる管理と監視、より緩やかな管理廃止プロセス、および関連する意思決定制度などである。少数の国では、法律または規則において回収の可能性が言及されている。例えば、米国の放射性廃棄物政策法には、回収が必要になりうる3つの状況が挙げられている。フィンランドの法律には、「廃棄物キャニスターの回収可能性が望ましいオプションとなるような技術の開発に備えて、回収能力が保たれるように処分を計画すること」、と記されている。しかし一般に、回収可能性の要件をどのように満たすべきかについて、指針は与えられていない。回収可能性が言及されている場合、通常、回収能力を高める手段によって長期安全性が損なわれてはならないという、重要な要件がある。

国家の廃棄物管理政策が回収可能性を要求する場合、予想される延長開放期間とその後の長期間にわたって、放射線防護と原子力保障措置を含めた保安と安全が維持されることを確認するために、規制要件を見直す必要がある。ほとんどの国において、建設、廃棄物定置、埋め戻し、閉鎖などのさまざまな開発段階について、個別に許認可を申請する必要がある。この状況において、処分場運転者は、原子炉の閉鎖手順と同様に、万一に備えた手段として回収を提案するかもしれない（または規制当局が要求するかもしれない）。

今後の展望

長寿命放射性廃棄物の工学的地層処分に必要な幅広い社会の信頼を得るうえで、見直しの機会を持ち、技術的問題と公共利益を考慮しつつ、柔軟性のある慎重な段階的方式によって処分に向けて前進することを示すのが重要である。意思決定プロセスの柔軟性は、それ自体目的ではないが、良好な慣行である。柔軟性は、廃棄物を安全に管理する能力について技術的信頼性を与えると同時に、撤回できない決定がなされていないということで大衆に信頼感を与える。一般的に、または特定のサイトについて、工学的地層処分が不十分な解決策であることが最終的にわかった場合、処分への段階を逆に戻せる必要がある。廃棄物管理関係者は、この可能性について準備

していることを示す必要がある。

管理オプションが将来世代の選択に委ねられていても、放射性廃棄物の問題を解決する第一の責任が現世代にあることに変わりはない。現世代は、処分場内の条件を維持・監視する労力と、回収を容易にすることとの間で、バランスをとる必要がある。そのような判断は、将来世代のとりうる選択肢と負担に関わりがある。われわれは、将来世代の状況や、彼らが下すであろう倫理的および実地的な判断を予見することはできない。今日下される決定は、今日の価値観および倫理的問題や他の国内関心事の理解に基づくべきである。しかし、意思決定に柔軟性を与える方策は、将来世代の要求と希望を、独自の決定を行う自由を含めて尊重すべきという倫理的原則と調和的である。

廃棄物の回収可能性を高める手段などにより、段階的な処分場開発計画に可逆性を組み込むことによって、科学知識と技術進歩を活用する機会と、国内政策、規制、および世論の変化への対応能力が与えられる。しかし、決定の可逆性と廃棄物の回収可能性は、他のオプションと結びつける必要がある。なぜならば、可逆性は別の方策をとるための逆戻しを意味し、より受け入れられる廃棄物管理解決策を代案として利用できないかぎり廃棄物は回収すべきではないからである。特に、回収可能性は、処分場の長期の受動的安全を改善するために導入されるのではない。回収可能性は、廃棄物処分概念における一次的な目標ではなく、柔軟性を指向する選択肢である。回収可能性を容易にする手段を導入しても、綿密な安全性評価と、処分場の操業安全性、長期安全性、および保安の必要性が軽減されるわけではない。

廃棄物の回収は、放射性廃棄物処分のために今日検討されているすべての地層において可能であるが、廃棄物定置後の処分場アクセス道の埋め戻しをしばらく遅らせるなどの方法による、より簡便かつ経済的な回収に適した処分概念がある。処分場設計や操業計画を、そのように適応させることは、コストを伴う可能性が高い。このコストと、柔軟性が追加されることによる技術的機会または社会的受容性の価値との間で、バランスをとる必要がある。

回収可能性は、処分場開発の決定を無期限に遅らせる言い訳になったり、閉鎖のための正当な基盤を持つ良好に設計された処分場の代替になったりしてはならない。閉鎖は、技術、管理、および社会的な観点から、処分場の開発における重要な節目である。まだ回収が考慮される地下施設から、最終処分施設への移行を意味する。施設が意図通りに機能することを合理的に保証する適切な確認データが収集され、閉鎖に伴って地下監視が中断して回収の難易度が高まることを是認するだけの公衆の信頼が得ら

れたときに、最終閉鎖を行うべきである。したがって、この段階を経た後に廃棄物を回収する必要がある可能性は非常に低い。計画の実施について、将来の意思決定者に柔軟性が与えられている場合でも、閉鎖を含む処分場開発の明確な計画を作成する必要がある。

主として、工学的地層処分場に組み込まれた受動的な安全に大きな裕度があるため、廃棄物を緊急に回収する必要があるような状況は指摘されていない。したがって、仮に将来廃棄物を回収する決定がなされても、代替の処分法を検討する前に、廃棄物を回収する秩序立った計画を実施し、廃棄物貯蔵のための必要な施設を建設する時間が必ずある。廃棄物が回収可能であると主張するには、その実行可能性を保証するために、特定の実際の要件を満たす必要がある。閉鎖への段階が進むにつれ、技術的な複雑さと回収コストが高まる傾向がある。廃棄物定置期間中と本格的な埋め戻しを行う前は、通常、定置用システムを逆モードで使用することによって廃棄物を回収できる。埋め戻し後は、廃棄物を回収するために特別の手法が必要かもしれない。

使用済み燃料と高レベル廃棄物の容器周辺に存続する高温・高放射線場で掘削および回収作業を行うためにも、特別の手段が必要になるであろう。廃棄物回収に関連する技術の研究開発を続けるべきであり、特に、さまざまな国内および国際研究計画における回収技術の実証が奨励される。そのような実証により、廃棄物回収の実行可能性に関する技術的信頼性が高まるとともに、回収に関する廃棄物管理組織の実行可能性と真剣さについて技術以外の信頼性も高まる。

廃棄物回収が実行可能であるためには、下記事項を保証するように制度を整備する必要がある。(1) 廃棄物定置後の各段階で、回収のための適切な技術能力が保たれる。(2) 予想しうる機器故障および事故の条件下を含めて、回収方法を定義する。(3) 処分場閉鎖に向けた次の段階に進む妥当性と必要性を定期的に評価し、現段階を維持するか、または必要であれば廃棄物の回収を含めて段階を逆に戻す。回収を実行できる条件が存在することを確認するためにも、監視が必要になる。

放射性廃棄物が、安全に、環境と調和的に、かつ経済的に管理されるような原則を規定する政府の政策は、潜在的な資源価値や他の要因を考慮しつつ、種々の廃棄物について考慮すべき回収可能性の程度を示すべきである。また政府は、政策を遂行するために財政、組織、および規制面の整備を行う必要がある。

可逆性と回収可能性の財政的影響には、回収を容易にするための設計変更コストが含まれるが、より

重大なのは、開放期間の延長が必要な場合、処分場と組織の枠組みを何百年、さもなくば何十年にわたって監視、防護、管理するためのコストである。原子力産業界は、監視と管理の期間を含めて、処分場開発の確定計画のために基金を用意しているが、回収可能性の維持が無期限の責任になった場合、政府がこの責任を負わなければならないかもしれない。回収可能性を維持するために相当の支出をする判断は、国の全体的な資源割り当てを勘案したうえで下すべきである。

また政府は、放射線の問題に対処する能力を含めた、回収可能性のために必要な専門技術を確保するためにも、組織を整備する必要がある。そのような専門技術は、現在、原子力産業界および関連する規制・研究機関に集中している。しかし、多くの国で原子力産業の存続が危ぶまれており、適切な水準の専門技術を保つために政府の介入が必要かもしれない。

ほとんどの国において、回収可能性の要件をどのように満たすべきかについて規制指針は提供されていない。回収可能性が言及されている場合、通常、回収能力を高める手段によって処分場の長期の受動的な安全が損なわれてはならないという、最も重要な要件がある。国家の廃棄物管理政策が回収可能性を要求する場合、予想される延長開放期間とその後の長期間にわたって、放射線防護と原子力保障措置を含めた保安と安全が維持されることを確認するために、規制要件を見直す必要がある。

ほとんどの処分概念において、閉鎖に向かって段階が進むほど（処分保管室とアクセス道の漸進的な埋め戻しと密閉など）、廃棄物の回収が技術的に厳しくなる。閉鎖後を含めたあらゆる段階で廃棄物を回収することが可能かもしれないが、回収可能性は、主として閉鎖前の期間について考えることが提案される。例えば、研究開発では、この期間における回収可能性に焦点を当てるべきである。

同様に、制度整備と廃棄物回収計画は、閉鎖前期間に重点を置くべきである。処分場閉鎖後の回収は、技術的に可能ではあるが、地上・地下施設を再建して廃棄物へのアクセスを復活するのに相当の資源を要する。経過を逆に戻す必要性が、処分場開発の各段階で適切な利害関係者によって注意深く評価されれば、閉鎖が決定される時点では高い信頼性が得られ、廃棄物を回収する技術的・社会的な理由はなくなっているであろう。

決定の可逆性は、工学的地層処分のために予期される段階的な意思決定プロセスに取り入れられることが多くなってきた。処分戦略における廃棄物の回収可能性の意味と、回収能力を高めるために特定の対策を含めることの妥当性は、現在、いくつかの国

家計画において検討されている。可逆性と回収可能性の意味と価値に関する合意がやがて形成され、本記事がその展開に役立つことが期待される。いずれにせよ、技術、政策、および倫理的側面を持つ本問題のためにいずれかの国で採用される解決策は、何よりもまず、その国の特定の技術的処分システムに適合し、国内政策の枠組みの中で受容される必要があることを認識すべきである。