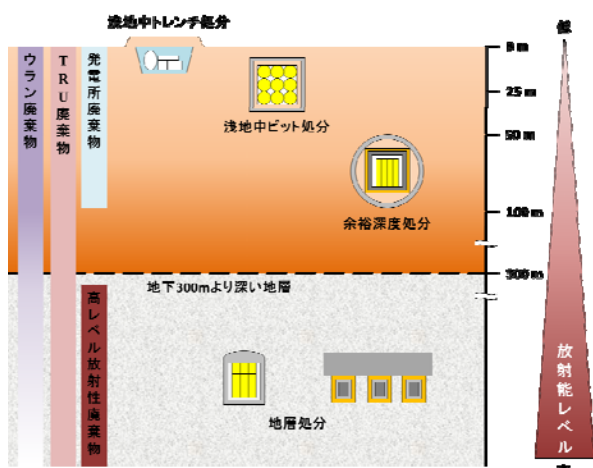


## 7-4 放射性廃棄物の処分

### 1. はじめに

原子力の平和利用によって発生する放射性廃棄物は多種多様である。このため、それらは、廃棄物に含まれる放射性物質の種類やその放射能レベルを考慮した上で、安全かつ合理的な方法で適切に処分されなくてはならない。現在までに、海洋投棄、南極の氷床への処分、宇宙空間への投棄、地上での長期保管などが検討あるいは一部実施されたが、国際条約による制約、経済性、技術的不確実性、将来世代への高負担などを考慮した結果、地中に適切な方法で処分することが最も合理的であるとされている。第1図に我が国の放射性廃棄物の処分方法の概念を示す。比較的高い放射能濃度であり、また半減期の長い放射性核種を多く含む廃棄物は、地下300m以深の安定な地層に人工的なバリアを設けて処分される。これを地層処分と呼ぶ。一方、地層処分対象外の放射性廃棄物は比較的浅い地中に埋設される。これは管理が可能な期間内に放射能の減衰が期待できることから管理(型)処分と呼ばれ、放射性物質の種類やその放射能レベルに応じてトレンチ処分、ピット処分、余裕深度処分に分類される。ここでは、それら処分方法の概要を紹介するとともに、それぞれの処分における安全評価や現状などについて述べる。



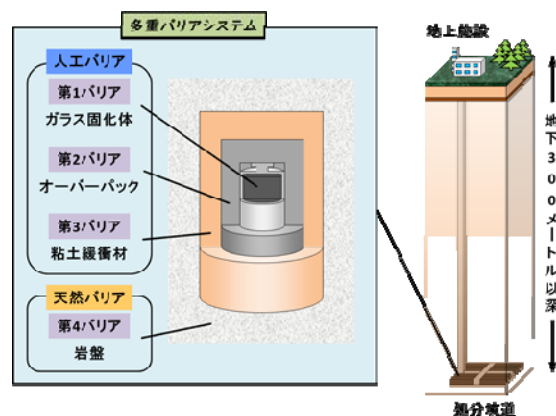
第1図 我が国の放射性廃棄物の処分方法の概念図

### 2. 地層処分

高レベル放射性廃棄物である使用済燃料やガラス固化体(ただし、現在の我が国の法律では後者のみを高レベル放射性廃棄物と定義している)、およびTRU廃棄物である再処理後に残った燃料被覆管材料(ハル)や廃銀吸着材などは、放射能濃度が高く、半減期の長い放射性核種を多く含むことから、長期間にわたって我々の安全を確保できる方法で処分されなくてはならない。これが地層

処分である<sup>1)2)</sup>。

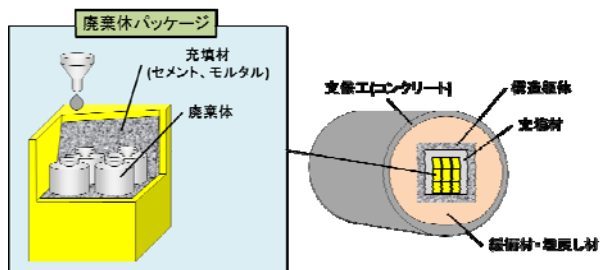
第2図に、高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリアの概念を示す。高レベルの放射性物質は、ガラスの中に分散して固められ、オーバーパックと呼ばれる金属製容器の中に封入され、さらにその金属製容器は低透水性の圧縮した粘土(ベントナイト)からなる緩衝材で包み込まれる。このとき、ガラス固化体は、自身の極めて遅い溶解速度によって内部に取り込んでいた放射性核種の地下水への放出を遅延させるバリア機能を有する。また、オーバーパックは周辺岩盤によってもたらされる応力からガラス固化体を物理的に保護するとともに、ガラス固化体が地下水と接触することを所定の期間防止する人工的なバリアとしての役割を担う。一方、緩衝材は、高い止水性を有するベントナイトが地下水を吸収し膨潤することでオーバーパックと周りの岩盤の隙間を埋めるとともに、周りの岩盤の亀裂を充填する。これは地下水の移行を抑制する他、周辺岩盤からの応力を緩衝してオーバーパックならびにその中のガラス固化体を物理的に保護することとなる。また、ベントナイトが有する高い化学的緩衝性はオーバーパックの腐食や放射性核種の地下水への溶解を抑制する他、放射性核種に対する高い収着性が放射性核種の移行を抑制するバリアとして機能することとなる。これら人工バリアの機能に対して、地下処分場から地表までの岩盤もまた、放射性核種を収着するとともに、人工バリアを保護するなど、天然のバリアとして機能することが期待されている。



第2図 高レベル放射性廃棄物地層処分における人工バリアの概念

地層処分の処分形態は、廃棄体の発熱量によって異なる。すなわち、発熱量が高い高レベル放射性廃棄物は廃棄体間の距離をある程度確保して埋設する必要がある。一方、高レベル放射性廃棄物に比べて廃棄体の発熱量が低いTRU廃棄物では、廃棄体を集積して埋設できる<sup>2)</sup>。

第3図にTRU廃棄物の地層処分の一例を示す。例示したケースでは、廃棄物が封入された金属製容器（廃棄体）を複数本まとめて大型の金属製容器（廃棄体パッケージ）に詰め、さらにこれを処分坑道内に設けた構造躯体に積み上げ処分する。その際、廃棄体パッケージ内の廃棄体間の隙間をセメント材などで充填する。また、処分坑道内壁と構造躯体間の隙間を緩衝材で埋めることが考えられている。この場合、セメントなどの充填材や緩衝材が人工バリアとして、また岩盤が天然バリアとして機能するとされる。



第3図 TRU廃棄物の地層処分概念

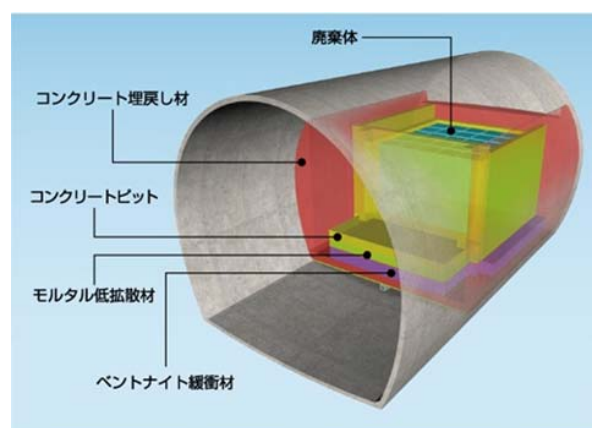
地層処分の安全を長期にわたって確保するために、処分した放射性廃棄物が超長期間にわたって我々に害を及ぼす可能性について評価しておく必要がある。その一例として、地殻変動等によって廃棄体と人間との間に十分な距離を確保できなくなるシナリオ（「接近シナリオ」）や、廃棄体から地下水に放射性核種が溶け出して地上に至るシナリオ（「地下水シナリオ」）が想定された<sup>1)</sup>。こうしたシナリオに含まれる諸現象をモデル化し、さらに関連のパラメータを具体的に考慮することで、安全性を定量的に予測するのが安全評価である。これにより、安定な地層に適切なバリアシステムを構築した処分システムが、接近シナリオと地下水シナリオのいずれにおいても安全基準を満たすことが確認される。

高レベル放射性廃棄物の地層処分は、フィンランドですでに処分地が決定し、地下特性調査施設の建設が始まっている。同国では、地下400mの結晶質岩の地層に使用済み燃料が処分される計画で、操業開始は2020年頃とされる。同じく、スウェーデンでも使用済み燃料の処分地がすでに決定し、操業開始は2025年頃とされる。その他の国々でも地層処分の実施に向けた着実な動きがある。一方、我が国では、日本原子力研究開発機構が岐阜県瑞浪市および北海道幌延町にそれぞれ地下研究施設を設け、前者では地層科学研究を、後者では地層科学研究に加えて地層処分技術の研究開発を実施している。また、原子力発電環境整備機構(NUMO)<sup>3)</sup>は実施主体として地層処分事業を行うことになっており、処分施設の設置可能性を調査する区域を2002年から全国の市町村を対象に公募しているが、2013年4月現在応募はない。

### 3. 低レベル放射性廃棄物の管理型処分

#### 3.1 余裕深度処分

軽水炉の炉内構造物や制御棒、使用済樹脂など、低レベル放射性廃棄物の中でも放射能レベルの比較的高いものは、「処分された廃棄物に人間が接触することを避けるために、一般的であると考えられる地下利用に対して十分余裕を持った深度」へ処分することになっている。これが「余裕深度処分」である。余裕深度処分の概念図を第4図に示す<sup>4)</sup>。処分空洞は、地表から50～100m程度の深度の放射性物質が移行しにくい地中に設けられる。この空洞にコンクリート製ピットを作り、放射性廃棄物をその内部に納めるとともに、ピット内部の廃棄体間の隙間をセメント系材料で充填する。一方、コンクリート製ピットの外側には低拡散層としてモルタルが、またさらにその外側に低透水層としてベントナイトが設置され、この低透水層と坑道内面間の隙間は埋め戻される。ここで、廃棄体、セメント系充填材、コンクリート製ピット、低拡散層ならびに低透水層が人工バリアとして、また地質そのものが天然バリアとして機能することが期待されている。

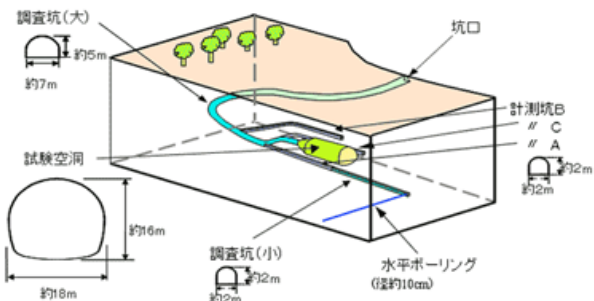


第4図 余裕深度処分の処分空洞断面の概略図<sup>4)</sup>

管理型処分では、埋設した場所の管理を、埋設した廃棄体の放射能が減衰してそれが不要となるまで行われなくてはならない。余裕深度処分の場合、その期間は数百年と想定されている。一方、その管理期間の終了後に対しては、4つの区分のシナリオを想定した安全評価を行い、それぞれのシナリオに対する「めやす（被曝線量）」を満足することが求められている。このうち、発生の可能性が高く、通常考えられる「基本シナリオ」では、例えば放射性核種が地下水を介して移行することを想定（「基本地下水シナリオ」）しても、それによる被曝線量が可能な限り低く抑えられていなければならない。このめやすは10 $\mu$ Sv/年とされている。また、気候変動や地質環境の変化など、発生の可能性は低い安全評価上重要な変動要因を考慮した「変動シナリオ」では、300 $\mu$ Sv/

年のめやすを満足しなくてはならない。さらに、火山活動や地震など発生の可能性が著しく低い自然現象を想定した「稀頻度事象シナリオ」では10~100 mSv/年が、またトンネルの掘削などの偶発的な人為事象シナリオでは周辺住民で1~10 mSv/年、作業者などの特定の接近者個人で10~100 mSvと設定されている。

このような処分としては、フィンランドおよびスウェーデンにおいて、地表から50~60 mの花崗岩層中に構築したコンクリートピットを有するサイロへの処分が実際に操業を開始している。一方我が国では、日本原燃(株)<sup>5)</sup>が青森県六ヶ所村に調査坑を地表から約100 m程度下まで掘削して試験空洞を設け、地質、地盤、地下水の調査・試験を行っている。第5図に調査イメージ図を、また第6図に試験空洞の写真を示す。



第5図 余裕深度処分の調査イメージ図<sup>5)</sup>

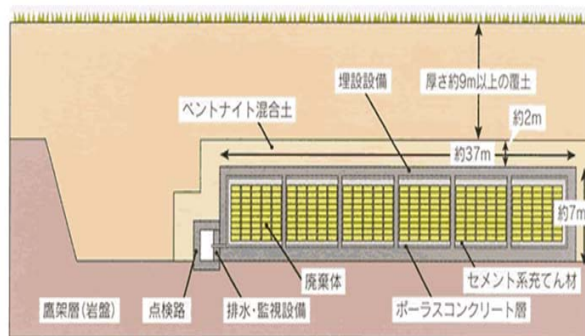


第6図 余裕深度処分の試験空洞写真<sup>5)</sup>

### 3.2 ピット処分

廃液やイオン交換樹脂、焼却灰などをセメント、アスファルト、プラスチックなどでドラム缶に固化したものや、金属類、プラスチック、保温材、フィルター類などの固体状廃棄物をセメント系充填材でドラム缶に固化した廃棄物で、放射能レベルの比較的低い廃棄物はピット処分される。

第7図にピット処分の概念図<sup>5)</sup>を示す。この処分では、浅い地中に鉄筋コンクリート製の構造物（ピット）を作り、そこに廃棄物を納めたドラム缶を埋設する。その際、構造物の上部および側部に水を通しにくいベントナイト混合土を入れる他、ドラム缶の隙間をセメント系材料で充填し、またピットの内側に水を通しやすい多孔質コンクリート層を設けることで、ピット内に水が入りにくく、また仮に水の浸入が発生しても、多孔質コンクリート層を介して容易に排水され、廃棄体との水の接触が極力避けられる構造としている。



第7図 ピット処分の概念図<sup>5)</sup>

ピット処分では、廃棄物中の放射能が安全上問題のないレベルに減衰するまでの約300年間にわたって段階的な管理を続けることとなっている。埋設開始後の最初の約30年間は第1段階であり、埋設設備によって放射性核種を確実に封じ込めることとしており、環境モニタリングならびに排水の監視、地下水中の放射性核種の監視を実施するとともに、覆土および埋設設備の修復等を行うこととなっている。また、第2段階である、第1段階終了後の約30年間は、埋設設備とその周辺の土壌等によって放射性核種の移行を抑制し、その漏出状況を監視する期間と位置づけ、埋設設備の修復は行わないものの、覆土の修復ならびに環境モニタリング等は引き続き行う。一方、第3段階である、第1段階終了後の300年間は、周辺の土壌等によって放射性核種の移行を抑制することとしており、覆土の修復と環境モニタリングを引き続き行うとともに、掘削等の制限を実施する。

ピット処分の安全評価は、第1段階では埋設設備の修復が行われることから、放射性核種の漏出を考えずに、埋設作業時のスカイシャイン（処分施設内の廃棄体からの放射線が上空で散乱して地上に降り注ぐ現象）による被曝線量を評価している。また、第2、3段階では、スカイシャインによる被曝の他、施設からの排気および排水（第2段階）、あるいは漏出（第3段階）を介した被曝を評価することとし、いずれも公衆の線量限度である1mSv/年に対して十分低い値であることを確認するとしている。一方、管理期間終了後の安全評価は、一般的なケースとして、沢水の利用や処分場敷地での居住、住宅施設の建設

工事も含めて $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ を超えないこと、また発生頻度が小さいケースとして、埋設施設を掘り返した場合も想定して、その被曝線量が $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ を著しく超えないことを確認するとされている。

我が国では日本原燃(株)によって青森県六ヶ所村でピット処分が1992年より実施されている(第8図)。現在、二つの埋設施設(1号および2号)があり、それぞれ200リットルドラム缶で約20万本の収容能力(処分場規模:約4万 $\text{m}^3$ )を有する。ここでは、すでに原子力発電所の運転に伴って発生した24.1万本(2012年5月現在)の廃棄物を受け入れている。また、将来的には、ドラム缶約300万本相当を埋設する計画(処分場規模:約60万 $\text{m}^3$ )もある。なお、それら廃棄物に含まれる放射性核種の大半はCo-60( $\beta$ 、 $\gamma$ 放出体、半減期5年)であり、これ以外に、Ni-63( $\beta$ 放出体、半減期100年)、H-3( $\beta$ 放出体、半減期12年)、Cs-137( $\beta$ 、 $\gamma$ 放出体、半減期30年)、C-14( $\beta$ 放出体、半減期5,730年)などが含まれている。



第8図 日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センター(ピット処分・青森県六ヶ所村)<sup>5)</sup>

海外の同様の施設としては、フランスのオーブ処分場(処分場規模:約100万 $\text{m}^3$ )が1991年より、またスペインのエルカブルル処分場(処分場規模:約4.5万 $\text{m}^3$ )が1992年より操業を開始している。

### 3.3 トレンチ処分

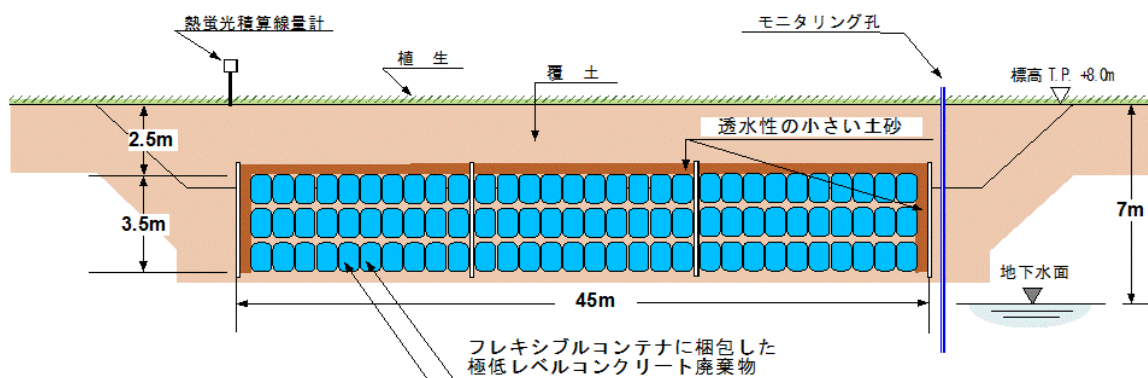
トレンチ処分は、低レベル放射性廃棄物のうち放射能レベルの極めて低いコンクリートや金属などの安定なものを対象としており、コンクリートピットなどの人工構造物を設置しないで廃棄物を浅い地中に直接埋設する処分方法である。管理が必要な期間は50年程度とされている。この間、天然バリアの機能によって安全性を確保する。

トレンチ処分の安全評価では、ピット処分と同様に、操業中のスカイシャインによる被曝が、公衆の線量限度である $1\text{mSv}/\text{年}$ に対して十分低い値であることを確認する。また管理期間終了後は、処分場敷地の再利用に伴う被曝、処分施設から地下水へ放射性核種が漏出した際に河川水を利用することによる被曝などが $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ を超えないことを確認することとなっている。

我が国では、日本原子力研究所東海研究所(現在日本原子力研究開発機構原子力科学研究所:茨城県東海村)の動力試験炉JPDRの解体によって発生した非常にレベルの低いコンクリート等廃棄物(1,670トン)が、同所の敷地内に処分されている。第9図および第10図に、処分施設の断面図<sup>6)</sup>とその写真<sup>7)</sup>をそれぞれ示す。同処分場は、



第10図 トレンチ処分実地試験施設(日本原子力研究開発機構・茨城県東海村)<sup>7)</sup>



第9図 トレンチ処分実地試験施設断面図(日本原子力研究開発機構・茨城県東海村)<sup>6)</sup>

地表から7mの深さに位置する地下水面に対して、地表から深さ6mまでトレンチを掘り、その内部に3.5mの高さまで廃棄物を埋設している。また、その上部に透水性の低い覆土を設け、埋め戻している。施設には、地下水観測孔、雨量計、浸透水量計、積算線量計を設置し、管理を行っている。

海外では、トレンチ処分を行っている施設として、米国のバーンウェル処分場（処分場規模：約88万m<sup>3</sup>）、フランスのモルヴィリエ処分場（処分場規模：約65万m<sup>3</sup>）などがある。

#### 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構、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、TN1400 99-020 (1999).
- 2) 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構、TRU廃棄物処分技術検討書—第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ—、(JNC)TY1400 2005-002 (FEPC) TRU-TR2 -2005-01(2005)
- 3) 原子力発電環境整備機構HP (<http://www.numo.or.jp/>)
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターHP (<http://www.rwmc.or.jp/>)
- 5) 日本原燃株HP (<http://www.jnfl.co.jp/>)
- 6) 阿部昌義ほか、デコミッショニング技報、15、50-58 (1996)
- 7) 日本原子力研究開発機構埋設事業推進センターHP (<http://www.jaea.go.jp/04/maisetsu/index.html>)

北海道大学大学院工学研究院 小崎 完  
(2013年4月30日)