

비핵 폐기물 지하 처분
非核廢棄物の地下処分

ITA『地下構造物の設計』

지하구조물 설계

On the underground storage of None-Nucleus wastes

清水保明*

邦訳にあたって

1. 目 的

今回、国際トンネル協会から、標記報告書が公表された。この報告書は、ITA「地下構造物の設計」作業部会(部会長 H.Duddeck教授(独))が、廃棄物の地下処分にあたっての技術的な課題について数年間に亘って実施した検討の結果をまとめたものである。なお、本作業部会では検討の対象を放射性廃棄物を除く廃棄物に限定している。これは、放射性廃棄物の地下処分についてはすでに世界的規模で検討が進められていることを考慮したものである。

報告書の内容は、

- ① 廃棄物閉じ込めの概念
- ② 地下処分施設の概念
- ③ 廃棄物の特性
- ④ 設計および安全性評価手法

に関するものであり、廃棄物の地下処分にに関する最新の知見と施設設計上の留意点をまとめている。

廃棄物の地下処分については、わが国にとっても興味深い内容であり、JTA研究開発委員会では、活動の一貫として本報告書を邦訳して各会員に供することとした。

以下にその内容を報告する。

概 要

本報告書は、国際トンネル協会「地下構造物の設計」作業部会の3番目の報告として、種々の地盤に建設される地下式廃棄物処分場に関する最新の知見と設計上の留意点をまとめたものである。

安全性評価や設計の一般的な手順とともに、種々の地下処分方式について考察を行った。環境問題の解決を目的とした地下のより広範な利用に本報告が寄与することを希望する。

本報告書は、地下式廃棄物処分場の設計上の留意点、すなわち、施設の計画、環境・構造上の安全性に関する要件とその評価、構造設計上の特徴、および種々の地盤における施工方法についてまとめたものである。施設に処分される廃棄物の分類として、無害な廃棄物と有害な廃棄物、特別な容器に納められた廃棄物とそのまま廃棄される廃棄物、処理された廃棄物と無処理の廃棄物が考えられる。

放射性廃棄物以外の廃棄物の範疇には以下のものが含まれる。

- 産業廃棄物
- 焼却された廃棄物の残滓
- 危険性の低い物質、例えば石炭煤の硫酸洗浄によって生成された石膏
- 再利用できない有害廃棄物

人口の増加や工業化の進展、さらには埋め立て式廃棄物処分場の不足に伴い、生態圏の保護を目的とした環境面の配慮が強く求められるようになり、廃棄物を地下に処分する施設の必要性が今後増すものと想定されている。工業製品を処理したり、再利用や焼却をはかることにより、廃棄物を減らす努力も行われているが、合理的に可能な限り、長期に亘る安全な処分が必要な有害廃棄物の排出は今後も続くものと考えられる。

廃棄物地下処分には明らかな点がある。すなわち、地質バリアの存在により生態圏から完全に隔離されることによる高い安全性、立地可能地点(廃坑の再利用を含む)の豊富さ、そして長期閉じ込め性である。

廃棄物地下処分の不利な点としては、例えば、コスト高、管理の複雑さ(とくに水質汚染に対して)、再取出しの困難さがあげられる。

* 機械製作技術士、國立工業技術院 工業研究官

環境問題への関心の高まりと、地下式処分場に対して今日すでに指摘されている諸問題のゆえに、発展途上国も含め、地下式廃棄物処分施設に対する関心が高くなっている。すでに廃棄物の処分方法に関する法規制が制定されている国も多い。また、放射性廃棄物の処分に関する研究から多くの知見も得られている。

地下処分および地下貯蔵に関連するテーマはこれまでも多くの勧告や会議で取り上げられてきている。しかし、国際トンネル協会では、その国際的な立場も考慮して、廃棄物の地下処分に関する作業部会を組織することとした。その目的の一つは、世界各国の情報を収集し、わかりやすいガイドラインにまとめるとともに、それを公表することによりITTA加盟国に情報を提供することにある。もう一つの目的は、廃棄物処分のために地下の利用を促進するにあたり、技術者がどのように貢献できるかを行政当局に示すことである。

廃棄物地下処分に関するより詳細な情報は巻末に示した参考文献を参照されたい。

2. 環境要件としゃ蔽バリア

多くの国では、放射性廃棄物以外の廃棄物を、短期あるいは長期に亘って要求される環境条件を規定した法規制に基づいて、定義・分類している。一般に、処分場の規制に関する条項には、廃棄物が生態圏や人間の生活、健康にいかなる危険性も及ぼすべきではないという条件が規定されている。生態圏に移行する地下水の汚染は避ける必要がある。

これらの要件を満たすために、特定の有害物や各種の廃棄物に対応したバリア構成を技術者が設定することになる。地下処分の場合には、いろいろな種類のバリアを想定することが可能である。

- ① 有害物質の漏洩を低減あるいは最小化するように、また、廃棄物が他の物質と化学的に反応しないように、廃棄物自体を処理できる可能性がある。
- ② 有害性の強い廃棄物に対しては、廃棄物や地盤に対して不活性な金属容器のような工学バリアの採用が可能である。
- ③ 長期に亘って安定な処分空洞を建設し、搬入坑やボアホールを効果的に閉鎖することにより土質工学的な天然バリアを付加することが可能である。
- ④ 汚染された物質の外部への移行や内部への侵入を阻止する地層で保護されている場合には、地質学的な天然バリアが提供される。

どのバリアをどの程度採用するかは、処分される廃棄物の種類や、地盤の状況、要求される環境保護の程度に

依存する。また、将来の再取り出しを前提とするか否かによっても異なってくる。

バリア構成の検討には、物理学、化学、プロセス工学、地質学、および土質工学のような異なる分野の知識を密接に連携させる必要がある。地下式廃棄物処分場の計画にあたっては、施設設計のできるだけ早い段階で各技術分野における評価結果を総合的に検討する必要がある。

3. 処分施設としての地下構造物

地下式廃棄物処分場として採用可能な地下構造物の例を図-1～4に示した。地下処分を実施する場合、立地点は以下の観点から選定される。

- ・地質
- ・地盤の透水性
- ・廃棄物の特性
- ・長期の安全性と、監視の容易性、廃棄物再取り出しの可能性
- ・政治的な判断

3-1 開削型処分場、オープンピット

この形式の処分場は、立坑あるいは深い掘削空間をコンクリートの壁で補強し、廃棄物を処分した後、覆土するものである。掘削にあたっては、標準的な立坑掘削技術の採用が可能である。操業期間中は、天候の影響を受けないように対策を講じる必要がある。短期および長期に亘る監視は、例えば底部に坑道を設けることにより、比較的容易に行うことができる。内部仕切り設備により、種類の異なる廃棄物を分離することが可能である。一般に、コンクリートの表面は特殊な保護層が必要となる。廃棄物は、たいていの場合、そのままの状態でも棄するものや毒性の低いものが対象となる。廃棄物の再取り出しは容易である(図-2,3)。

3-2 岩盤空洞

低透水性の岩盤中に掘削された空洞である。容器に入れられた状態あるいはそのままの状態でも搬入されるあらゆる種類の廃棄物の処分が可能である。操業終了後、すべての搬入坑や立坑は止水壁により閉鎖される。長期の環境保全は、一般に、岩盤および岩盤補強工のような対策工によって確保される。

3-3 岩塩空洞

岩塩層は深いボアホールを利用した注水により、溶解作用を利用して掘削可能である。この方法により、ある程度適当な形状の空洞が掘削される。空洞の建設にあたっては、例えば音波を利用した方法により、掘削形状の管理が行われる。岩塩空洞を利用した処分施設の場合は岩塩層自体がしゃ蔽バリアとなる。

廃棄物の処分は空洞の排水後に可能となる。廃棄物の処分過程は慎重に管理する必要がある。処分に適した廃棄物は粒状あるいはスラリー状のものである。

処分終了後、ボアホールと空洞は止水される。監視や廃棄物の再取り出しは不可能である。

3-4 残柱式掘削法による空洞

岩塩あるいは非帯水の硬岩からなる岩盤で、粘土層で覆われていることが望ましい。空洞は立坑から残柱式掘削法により掘削される。掘削された空洞に埋設される廃

棄物は、最初のバリアとなる容器に入れられた廃棄物を含め、いかなる状態のものでも受け入れることが可能である。長期に亘って隔離するために、すべての坑道やボアホールを完全に止水する必要がある。操業期間中の安全性の監視や廃棄物の再取り出しは可能である。

岩塩層の場合、長期に亘ってクリープ変形が生じるため、締め固め充填を行うことが安全性の確保に寄与する(図-4)。

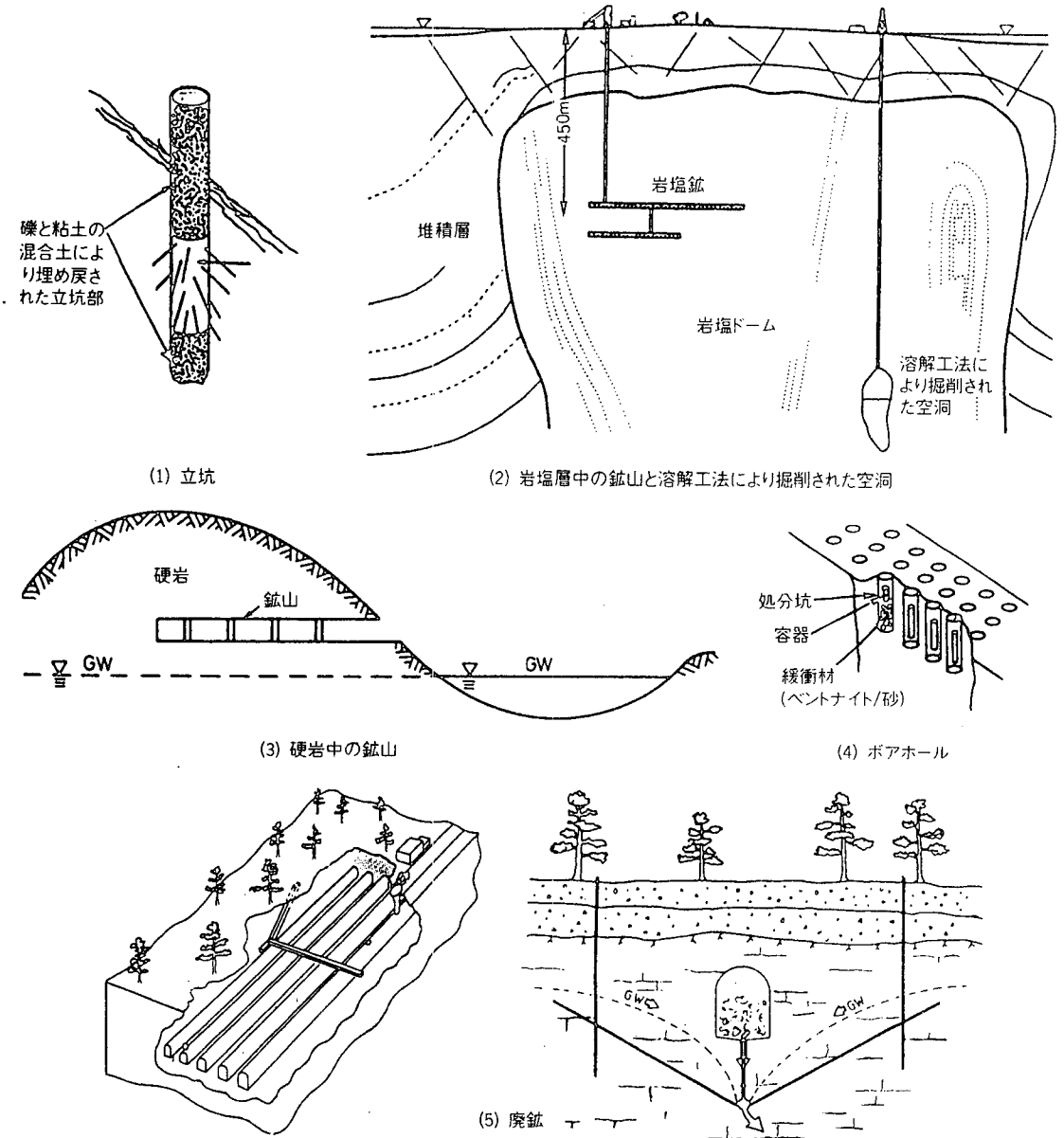


図-1 地下式廃棄物処分場として利用可能な構造物

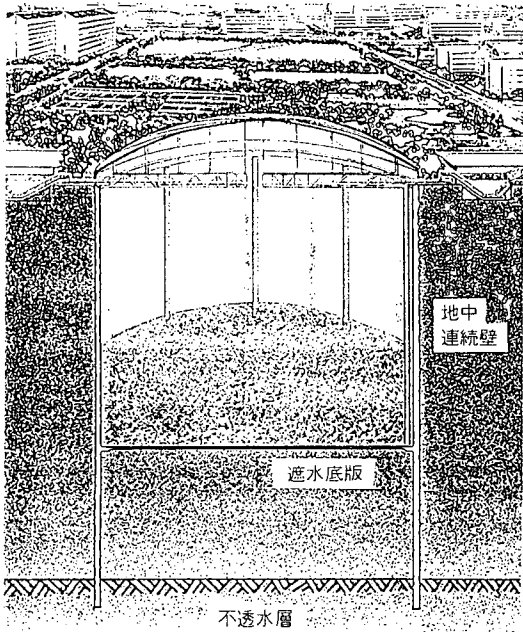


図-2 都市型一般廃棄物処分場（鹿島建設(株)提供）

3-5 ボアホール、立坑

毒性の高い廃棄物を少量処分する場合には、処分に適した地層中の坑道や作業空洞から垂直に掘削した直径1m程度のボアホールが適している。処分される廃棄物は粒状の流動可能な状態に処理されたものでよい。容器入りの廃棄物ならば、ボアホール内に定置後、残された空間が充填される。

もし、ボアホールの代わりにより径の大きい立坑を掘削すれば、廃棄物をそのままの状態でも処分することも可能である。

長期に安全性を確保するための止水は個々のボアホールや立坑について行えば良い。

3-6 廃坑

一般に、廃坑を利用すれば廃棄物処分場の事業化にあたって経済的に有利となる。既存の坑道を利用して処分場の計画地点に容易に接近することが可能である。また、採鉱にあたって蓄積された知識から、地盤の挙動や水理学的な特性に関する貴重な情報を入手することができる。

不利な点は、採鉱に伴って処分場の要件に適さない程度にまで岩盤を傷めている可能性があることである。有害性の高い廃棄物に対しては、新たに掘削した空洞の方が望ましい。この場合、廃坑そのものは作業坑や操業設備として利用される。

古いボアホールは、往々にして記録にも残っていないが、処分空洞から上部岩盤や生態圏に連絡しており、問題となる可能性がある。

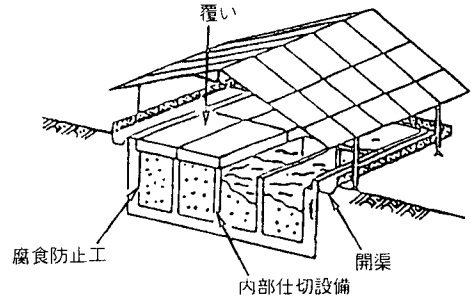


図-3 シャ断型最終処分場（厚生省提供）

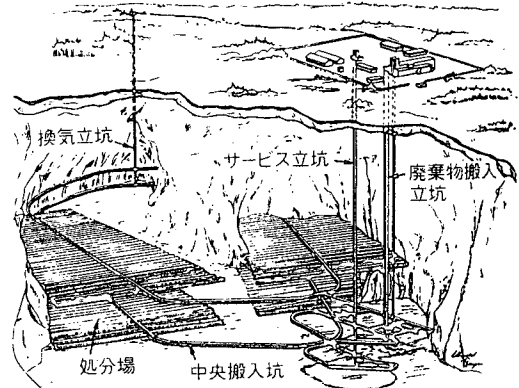


図-4 地下式廃棄物処分場と関連施設

4. 廃棄物の特性と挙動

放射性廃棄物を除く廃棄物のうち地下処分に適したものの例を以下に示す。

- 廃棄物焼却施設の残留物
- ばい煙除去により発生するフライアッシュ
- 有毒な化学廃棄物
- ガス洗浄工程の反応生成物
- 重金属を含む産業廃棄物
- 下水スラッジ
- 無機一般廃棄物

廃棄物が有害か否かの判定には、一般に、有毒物質あるいは化学反応物質の濃度が用いられる。水銀、カドミウム、鉛、クロニウム、砒素とそれらの化合物のような重金属や、リン酸塩の化合物、および塩素が主な有毒物質である。

以下の廃棄物は地下処分に適さない。

- 未処理の一般廃棄物。有機物を含むため。
- 貯蔵状態において自然発火あるいは燃焼を起こす発熱物質。
- 周辺地盤や、岩塩、処分場の構成材料と化学的に反応し、ガスや溶解性の有害反応生成物を生成したり、腐食を進展させる廃棄物。

・液体。

セメント打設時に発生する程度の温度上昇はその影響が短期間に限られておりかつ制御されている限り問題とはならない。

廃棄物は液体状、スラリー状、あるいは締め固められた状態であることが多く、そのままでは地下処分に適さない。したがって、ほとんどの場合、運搬・処分を可能とするために、乾燥あるいは湿潤状態、締め固めた状態、粒状化した状態、あるいは現位置での固化を想定した一時的な液体の状態に廃棄物を処理する必要がある。この処理は有害物質の漏洩防止や閉じ込めにも有効である。

通常の場合、処理された廃棄物が一般的な埋め戻し材料と同様の特性を持つのが望ましい。また、廃棄物には、長期に亘って作用する地圧に耐えることができる物理特性が要求される。これらの特性は以下のとおりである。

- ・材料剛性
- ・圧縮強度
- ・安定なコンシステンシー特性
- ・小さい空隙率と十分な締め固め特性
- ・低透水性および非溶解性

廃棄物の特性は通常室内試験によって検討される。しかし、運搬、処分後の廃棄物の実挙動を処分場においても注意深く確認することが望ましい。運搬作業や実際の周辺環境により廃棄物の基本物性が劣化する可能性があるからである。したがって、室内での試験結果を確認するための試験操業が一般には必要となる。

5. 設計およびリスク評価の一般的な方法

地下式処分場の設計、施工、操業、閉鎖には多くの課題が存在する。問題の複雑さのゆえに、関連する分野を担当する専門家は、個別に対応するのではなく、組織的に共同して作業に取り組む必要がある。このような組織は、全体方針と必要な個別課題を明確にするとともに、プロジェクトに対して総合的な責任を負う必要がある。

図-5に、廃棄物処分施設の計画と設計において考慮すべき主な項目を示す。まず、廃棄物、法規制、および環境要件に関する情報を収集したのち、地質的な条件を満たす適切な立地点を選定する。地質調査、弾性波探査、ボーリング、および水理地質学的調査などからなる初期の現地調査に基づいて、施設全体の予備設計に必要なバリア構成の選定に十分な情報を得ることが可能である。廃坑のように地盤に対する情報がすでに存在する場合には、初期調査の段階でそれらを十分に活用すべきである。

専門家からなる組織により、原因と予想される不具合を明らかにして、発生しうる破壊シナリオを定義するカタログを作成する。引き続き、個々のバリアや、個々の

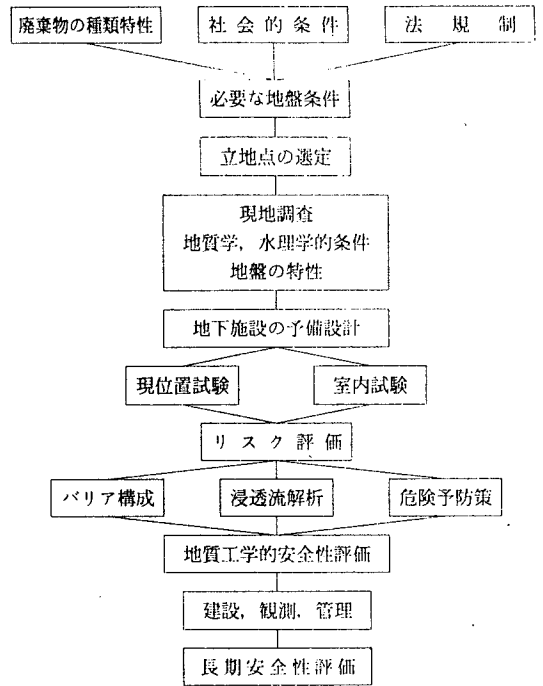


図-5 地下処分場の設計手順

破壊あるいは不具合シナリオに対して、リスクおよび安全性を詳細に評価する。これらのシナリオは、その性質上、仮説によって構成されているため、実際の挙動は数値解析あるいは論理的な考察（工学的判断）によるのみ想定されるものである。したがって、評価にあたっては入力データの信頼性や正確さがもっとも重要となる。

施設の安全性評価には少なくとも2つの目的がある。

- ① 生態圏の汚染に対するバリアシステムの総合的な性能評価。
- ② 構造的安定性や地下水の浸入、流出を抑制する止水性に関する地下施設の地質工学的安全性評価。

閉鎖後の長期安全性に対するリスク評価にあたっては、入力データに起こり得る変化を考慮する必要がある。設計および安全性の検討は実際の条件に合わせて行わねばならない。初期に実施した設計が、立坑や作業坑の掘削時に得られる情報に基づいて大きく変更されることも有り得ることである。

場合によっては、とくに建設の操業の段階において、現地での実測が可能である。その場合には、地質工学モデル上の仮定条件は少なくとも実際の状況に基づいて確認可能である。

図-6に、地質工学的な安全性評価手順を示した。ここでは、トンネル工学や岩盤工学の分野で得られている知見が地下式廃棄物処分場に適用されている。

詳細を以下の章で述べる。

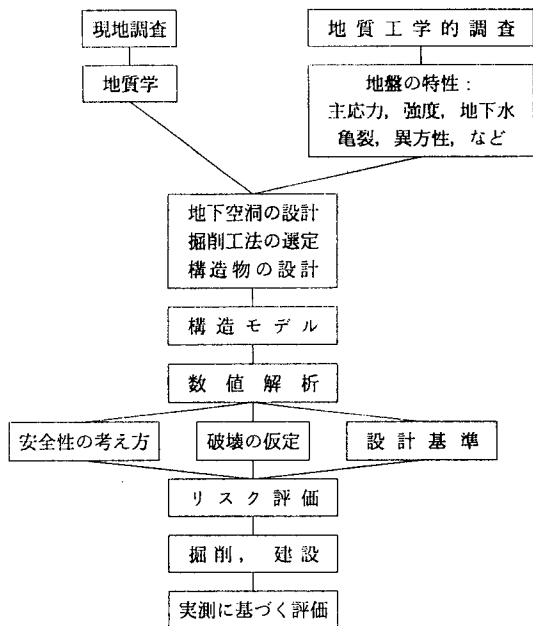


図-6 地下処分場の地質工学的設計手順

6. 地質調査

国際地質工学会 (IAEG) 委員会14は、1989年の現状報告書で廃棄物の地下処分問題を扱っている。同報告書において、安全性評価、地盤のモデル化、および自然バリアのリスク評価の一般的な手順が詳細に紹介されている。

現地調査は、以下の4つのステップを繰り返すことによって実施される。

- ① 地点選定を目的とした立地可能性評価のための地質調査。
- ② 地盤構成、地質および水理地質学的条件設定のための地質工学的な現地調査。
- ③ 地盤特性、とくに地盤と廃棄物と水との相互作用を調査するための現位置および室内試験。
- ④ 掘削および廃棄物処分段階における応力、変形の観測結果に基づく地盤特性の確認。

地盤の特性やデータの自然な確率的ばらつきは、安全性評価に与える影響が大きいことから、記録に残す必要がある。とくに、地盤の長期的な挙動は、短期間の観測結果から外挿によってのみ想定される。したがって、長期の特性は精度上ある余裕をもって評価する必要がある。リスク評価のためには最悪の状態を想定したモデルが必要となる。報告にあたっては、実測値と現地の状況から判断した推定値とを慎重に区別する必要がある。

現地調査は、立地点に応じて異なったものとなる。調査の対象は表層全層である。調査計画は、岩塩、泥岩、

花崗岩、玄武岩など、廃棄物処分場が建設される地点の岩盤に応じて設定される。

数値解析には施設周辺の広い範囲を対象としたモデルが必要となる。このモデルの規模や精度は、対象とする構造物やシナリオに応じて変化する。安全性評価は、すべての条件を満たしてはいないが、明らかに保守的な、より単純なモデルで十分である場合が多い。

7. 考慮すべき事象と影響

解析すべき限界状態を設定するために、考慮する期間中に発生する可能性がある外的あるいは内的事象とそれらの影響を列挙する。これは、建設開始以前の状態も含んでいる。

この作業を行う前に、以下の情報が必要となる。

- 地質学的、地質工学的調査の結果
- 対象とする廃棄物処分場を構成する地下施設の構造
- 地下空間の掘削方法
- 廃棄物の種類と特性
- 廃棄物の処分方法
- 処分場の操業形態
- 処分場の閉鎖方法

集約にあたっては以下の項目を考慮する。

- 関連する岩盤の初期状態
 - ① 地層
 - ② 主応力
 - ③ 地下水の状態
 - ④ 温度
 - ⑤ 地盤の不均質性
 - ⑥ 岩塩のレオロジー的挙動
- 立坑、トンネル、作業坑などの地下空間掘削の影
 - ① 地盤内の応力再配分
 - ② 発破などによる地盤物性値の変化
 - ③ グラウトやロックボルトのような支保工の効果
 - ④ 水密性や気密性向上のための注入のような地盤改良の効果
 - ⑤ 廃坑の場合、採掘過程や採鉱の影響
 - ⑥ 岩塩層中の溶解掘削法による空洞の場合、水や水圧、温度変化の影響
- 廃棄物処分場の操業に伴う事象
 - ① 廃棄物の充填方法
 - ② 液相の影響
 - ③ 時間依存性
 - ④ 体積および温度変化
 - ⑤ 岩塩のクリープ変形時の締め固め特性
 - ⑥ 閉鎖のための止水工の影響
- 長期の影響

- ① 周囲の岩塩層のクリープ
- ② 時間に依存した地盤の変形
- ③ 地下水位の変化
- ④ 地下水の移行、浸透
- ⑤ 廃棄物と地盤との化学的相互作用および充填に伴う相互作用

・事故や自然現象に関する仮想的な事象

- ① 地震の影響
- ② 地下施設の水没
- ③ 長期の溶解現象
- ④ ガスの漏出

8. 起こり得る限界状態とリスクの想定

リスク評価のもっとも重要な部分は、解析的な評価にあたって基準シナリオを抽出し、定義することである。複数の専門家からなる組織に、起こり得る破壊形態に至るシナリオの抽出、設定を委ねるべきである。これらのシナリオはいかなる工学的な手法によっても直接設定することは不可能である。むしろ、事前調査結果や想定される事象とその影響の考察結果を基にして、ブレーストローミングを通して抽出することになる（第6章参照）。

評価の方法としてSIAスイス勧告260号に示された一般的な概念が参考となる。

まず、立地点特有の発生しうる破壊シナリオを想定するリスクとして定義する。リスクを想定することにより以下の項目を明らかにする。

- ① リスクを回避あるいは最小化する手段。

例えば、施設が乾燥した地盤あるいは密な岩盤中に立地する場合、水を含まない廃棄物のみの受け入れや、処分場へ向かう恒常的な透気勾配を確保することによるガス移行の制御など。

- ② 各シナリオの評価方法（例えば、数値解析、あるいは実験的方法）。
- ③ 現位置における調査や観測に基づいて取り得る施設補強対策あるいは変更方法。
- ④ 受け入れ可能なリスクの限界。

シナリオは、まず、原因と起こり得る結果を記述することによって作成される。それぞれのシナリオは、一般に1つの主要因によって特徴付けられる（第7章に示した事象とその影響参照）。この主要因に対して、最悪あるいは極端な値や状態が仮定される。一方、その他のパラメータについてはサイトにおけるもっともありそうな状態を想定して中間的な値が採用される。

場合によっては、複数のパラメータの組み合わせが限界状態を引き起こすことを想定することが妥当であることもある。これらのシナリオは、構造工学において安全

率1.0を満足すればよいと考えられる「限界状態」に相当する。このような「最悪の状態」を検討することにより、問題の非線形性も的確に考慮することが可能となる。

決定シナリオは対象とする地点の状況に大きく依存する。したがって、一般的な定義はできない。これらのシナリオは短期あるいは長期に亘る環境へのリスクと、構造的、地質工学的破壊現象から構成されている。多くの場合、起こり得るリスクを、基本シナリオからなるいくつかの代表的なシナリオに絞り込むことが可能である。

決定シナリオの例を以下に示す。

- ・廃坑における、空洞切り掘げによる残柱の破壊
- ・処分場の掘削時変形に伴う上部粘土層の水密性の低下
- ・溶解掘削空洞における水圧破碎による岩塩層の水密性の低下
- ・平均的な状態として想定された地盤の基本的特性（せん断特性など）の不適切さ
- ・岩塩層における残柱式空洞の充填材として廃棄物に期待される機能の長期的な劣化
- ・処分場の水没に至る坑道止水工の止水性喪失
- ・残柱式空洞を危険な状態にする地震時動的荷重
- ・残柱の有効断面を減少させるカーナル石（カリ塩層を形成する鉱物、容易に潮解する（訳者注））からなるシームの溶解
- ・未知の断層による処分場周辺岩盤の不安定化

9. 地質工学および構造工学的安全性評価

掘削時以外の状態はすべて発生する可能性のある状態あるいは仮説にすぎない。したがって、一般にシナリオの安全性評価は解析的に実施されることになる。理論的なモデルを処分施設が立地する岩盤や、構成部材の材料挙動、システムに想定される事象とその影響、建設前後の立地点の時間的变化に対して構築する必要がある。時間的变化を表わすモデルは、岩塩のようにレオロジー的挙動がある場合にとくに必要となる。

解析は以下の段階からなる。

1. 解析すべき状態の記述（定式化）
 2. 地盤および空洞の解析モデルの設定（多くの場合、有限要素法や境界要素法、あるいは両者の組み合わせ）
 3. 対象とするシナリオの事象とその影響の想定
 4. 地盤、支保部材および廃棄物の材料特性の設定
 5. 安全性評価の入力条件となる、限界に達するまでの数値解析（結果の解釈を含む）
 6. もし解析対象であるシナリオの検討に利用可能であれば、実測との比較検討
- 構造安全性は以下の指標で表現される。
- ・コンバージェンスと変形