

高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術 —その7 廃棄体の埋設と処分施設の埋戻し—[†]

塩崎 功¹ 緒方信英¹ 金川 忠¹ 出口 朗² 高橋美昭²
高尾 肇³ 阿波野俊彦⁴ 河村秀紀⁵

放射線防護の考え方に基づき、地下施設における廃棄体（ガラス固化体を収納したオーバーバック）、緩衝材のハンドリング方法について検討し、縦置き定置方式、横置き定置方式について、廃棄体および緩衝材のハンドリング工程、ハンドリング設備の概念を示した。さらに、廃棄体および緩衝材の定置・埋設の方法と設備について検討し、それぞれの設備寸法を明記した概念図を示した。また、埋戻しおよびプラグの方法・材料について検討し、現状技術のうち最適な技術・材料を提案した。支保工に関しては、主に撤去の可能性に着目した検討を行った。最後に、処分場の閉鎖前後における現時点でのモニタリングの考え方を整理した。

Keywords: ハンドリング、定置、埋戻し、支保工、プラグ

Based on the principle of radiation protection, we studied the handling and emplacement procedure of waste and buffer material. We showed the handling flow diagram, conceptual drawings of handling and emplacement facility in two cases of emplacement; vertical emplacement in pit and horizontal emplacement in tunnel. The procedure and material for backfilling and plugging have been studied and the optimum method of current technologies is selected. Regarding the tunnel supporting, the removal of concrete supporting mainly was studied. Finally, we showed our view of monitoring before and after the close of disposal facility.

Keywords: handling, emplacement, backfilling, tunnel supporting, plugging

1 はじめに

本特集では、「高レベル放射性廃棄物処分の事業化技術」として、処分の実施主体が行う処分サイト選定、地質・地下水特性調査、施設設計、安全評価、施設建設、廃棄体埋設、施設閉鎖など、一連の処分事業を模擬的に机上で検討した。本報告(その7)では、一連の処分事業のうちその4)人工バリア施設、(その7)地下施設、(その6)地上施設との調整を図りつつ、廃棄体および緩衝材を地上施設から地下施設に搬送し、処分孔あるいは処分坑道に定置・埋設した後、処分場を埋戻して閉鎖するまでの作業フローを検討し、それらの作業に必要な方法・設備の概念を示し、現時点での最適な技術・材料を提示したものである。

なお、本報告では「廃棄体」を以下のように定義する。

- ① 処分孔あるいは処分坑道内に定置するまでの「ガラス固化体、キャニスターを収納したオーバーバック」
- ② 処分孔あるいは処分坑道内に定置された後の「オーバーバックと緩衝材」

2 廃棄体埋設の基本的考え方

2.1 放射線防護の考え方

地上施設においてガラス固化体を収納したオーバーバックは溶接により密閉された後、表面検査が実施されるので、通常は放射能汚染の可能性はない。また、中性子照射による空気放射化に基づく汚染については、中性子遮蔽機能を有する輸送容器や装置に収納した状態で廃棄体を取り扱うこと、および廃棄体の中性子強度が低いことを考慮すれば、その濃度は極めて低いものと考えられる。

廃棄体輸送中は、作業従事者の被ばく低減を図るために、廃棄体からの放射線に対する遮蔽装置を輸送装置に装備し、表面線量当量率を2 mSv/h以下に抑える必要がある。また、廃棄体の定置・埋設作業中は、遠隔操作による廃棄体定置作業により従事者の被ばくの低減を図ることも必要である。

縦置き定置方式の場合、処分坑道の閉鎖作業を効率的に実施するため、坑道内の線量のある程度以下に抑える必要がある。そのため、オーバーバックと緩衝材に加えて緩衝材上部の埋戻し材により廃棄体からの線量を抑えるために、廃棄体を所定の深度に埋設する必要がある。

処分坑道を非管理区域とするためには、処分坑道内は1週間で300 μSv以下の線量でなければならない[1]。1週間で6日間、1日当たり8時間対象区域内に滞在するとした場合には、時間当たり線量は6.25 μSv/h、これに対して1週間で7日間、24時間を対象とした場合には、時間当たり線量は1.78 μSv/hとなる。線量当量率と埋戻し厚さの解析結果をFig.1に示す。なお、本解析では原子炉取り出し後の冷却期間54年、オーバーバックの厚さ18 cm

[†] Execution techniques for high level radioactive waste disposal : VII Handling and emplacement procedure of waste, and backfilling procedure of disposal facility, by Isao Shiozaki (shiozaki@criei.denken.or.jp), Nobuhide Ogata, Tadashi Kanagawa, Akira Deguchi, Yoshiaki Takahashi, Hajime Takao, Toshihiko Awano and Hideki Kawamura

1 (財)電力中央研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) 〒270-1194 我孫子市我孫子 1646
2 東京電力(株) Tokyo Electric Power Company 〒100-0011 千代田区内幸町 1-1-3
3 日揮(株) JGC Corporation 〒220-6001 横浜西区みなとみらい 2-3-1
4 石川島播磨重工業(株) Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd 〒235-8501 横浜磯子区新中原町 1
5 (株)大林組 Obayashi Corporation 〒108-8502 港区港南 2-15-2

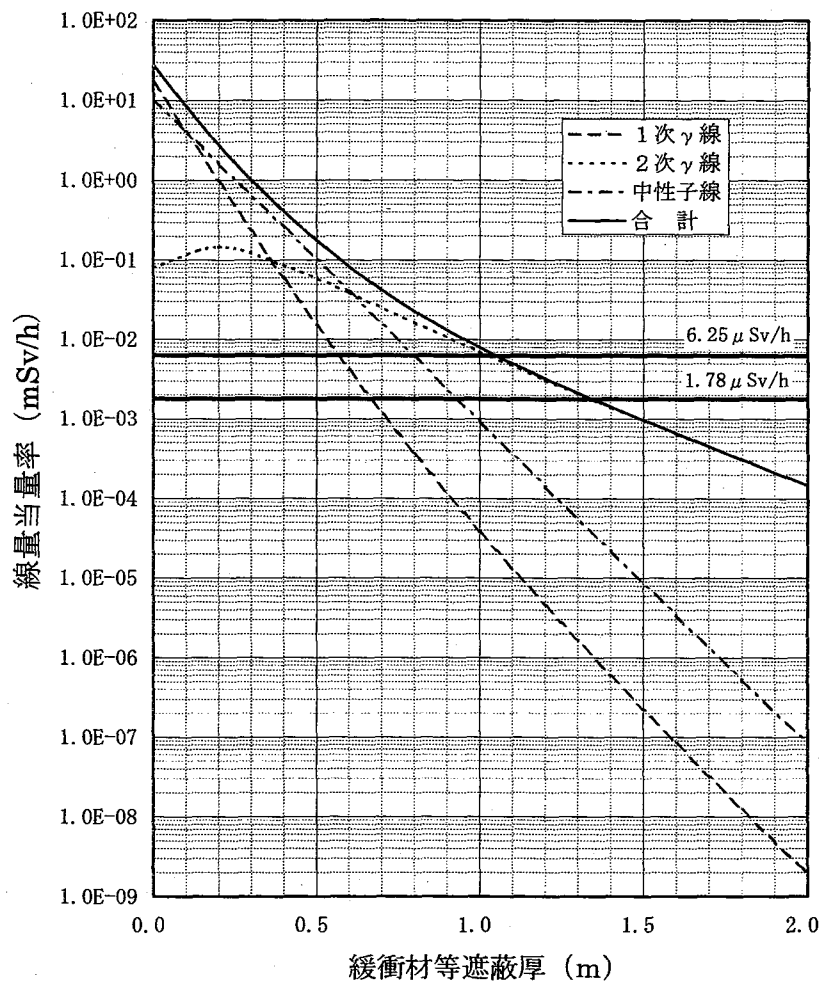


Fig.1 Radiation shield capacity of buffer material (Overpack : 18 cm, 54 years after unload of fuel from the reactors)

を前提条件とした。埋戻し材と緩衝材に遮蔽を持たせる場合には、基準線量 $6.25 \mu\text{Sv/h}$ では、緩衝材等の厚さは約 1.1m 以上、基準線量 $1.78 \mu\text{Sv/h}$ では約 1.4m 以上が必要となる。したがって、施工精度なども考慮して、処分坑道底面からオーバーパックの上面までの距離として 1.5m を確保することとした。

2.2 ハンドリングの基本的考え方

ハンドリングの基本的考え方は、全作業工程での被ばく低減を図ること、およびそのために極力遠隔操作技術の導入を図ることである。

廃棄体の地上施設から埋設までのフローは次のようになる。

廃棄体の輸送容器への積み込み→地下施設への搬送→定置装置への積み替え→処分坑道内の搬送→廃棄体の定置→埋戻し

廃棄体の定置方式には、大別して縦置き定置方式と横置き定置方式の 2 種類が考えられる。縦置き定置方式で

は、廃棄体を埋設する処分坑は処分坑道の底面に縦方向に掘削され、廃棄体はその中に鉛直方向に一体あるいは複数体設置される。横置き定置方式では、廃棄体を埋設する処分坑道は主要坑道から水平に掘削され、廃棄体はその処分坑道の中に長手方向に水平に複数体設置される。

3 廃棄体のハンドリング

3.1 廃棄体の概要

廃棄体（ガラス固化体とオーバーパック）および一体型緩衝材の仕様を Table 1 に示す。なお、緩衝材の重量は、乾燥重量を示したもので、湿潤重量は 9.9 ton（含水比 10%）である。

3.2 廃棄体のハンドリング

3.2.1 ハンドリング工程の概要と安全対策

地上から地下施設への廃棄体のハンドリング方法について、現状で想定されるハンドリング候補技術について

整理するとともに、ハンドリングにおいて考慮すべき安全対策について検討した。

ハンドリングに係わる安全対策については、機器の故障などの内部要因による事象、および地震などの外部要因による事象に対して、廃棄体の落下防止、転倒防止、エレベーター・台車などのアクセス設備の落下防止等の基本的な対策を検討した。その1例として、外部事象に起因する事故事象に対する廃棄体の落下防止対策をTable 2に示すが、種々の想定事故事象に対して、廃棄体のハンドリング設備として必要な安全対策をあらかじめ施しておく必要がある。

3.2.2 ハンドリング設備

地下施設における廃棄体の搬送・定置設備について、縦置き定置、横置き定置の2ケースの定置方式に分けてハンドリング設備の基本仕様等を設定した。なお、地上施設と地下施設との間の搬送経路であるアクセス坑道的方式には、立坑、斜坑の二方式があり、廃棄体の搬送に

はそれぞれエレベータ、斜坑用台車を使用することとした。1例として、斜坑による廃棄体のハンドリング工程の概念図を、Fig.2に示す。

(1) 縦置き定置方式

花崗岩の場合も堆積岩の場合も、主要坑道と処分坑道の形状は同一（花崗岩：幌型、堆積岩：円型）であり、運用面からも同一設備で搬送する方が効率的であると考えられる。Table 3に縦置き定置方式における廃棄体のハンドリング設備の仕様を整理する。

(2) 横置き定置方式

横置き定置方式における廃棄体のハンドリング設備としては、以下の設備が想定される。

① 廃棄体定置装置（横置き定置）

② 地下搬送装置

横置き定置方式の場合、主要坑道と処分坑道の坑道寸法が大きく異なるため、縦置き定置のように同じ搬送装置で両坑道を走行することは困難であると考えられる。そこで、横置き定置の場合には、定置装置は処分坑道内を走行可能とし、主要坑道については専用の搬送台車を用いて定置装置を搬送する親子台車式の地下搬送装置を準備する必要がある。

Table 1 Size of waste form and monolithic buffer type

形 状	外 径 (mm)	高 さ (mm)	重 量 (kg)
ガラス固化体	φ 430	1,340	550
オーバーバック (炭素鋼)	φ 800 (厚さ 180mm)	1,710	5,250
一体型緩衝材	φ 1,620 (厚さ 400mm, 乾燥密度 2.0 g/cm ³)	2,660	9,000
基本ケース	蓋 部	400	1,649
	底 部	2,260	7,352
基本ケース (横置き定置)	蓋 部	400	422
	底 部	2,660	8,579
二分割型	蓋 部	1,330	4,500
	底 部	1,330	4,500
四分割型	蓋 部	400	1,649
	中間部(2ヶ)	1,860	2,852
	底 部	400	1,649

3.3 緩衝材(一体型・ブロック型)のハンドリング

緩衝材の分割構造は一体型とブロック型に分類されるため、ハンドリングについても一体型とブロック型に分けて検討した。

3.3.1 一体型緩衝材のハンドリング方法

縦置き定置では、処分孔に廃棄体を一体のみ定置する場合と、複数体定置する場合の二ケースを設定した。ただし、ハンドリング方法の検討としては単体/複数体による相違がほとんど発生しないため、主に単体定置方式の検討を行う。また、横置き定置では、処分坑道内に複数体の定置のみを設定した。すなわち、以下の3ケースについて検討した。

Table 2 The countermeasures against the drop accident of waste package caused by external events

起回事象	地震／落盤	
事故事象	搬送設備の落下	・ガラス固化体の破損→核種の閉じ込め性の低下 ・オーバーバック破損→本体破損、密封性低下 ・建屋倒壊→ガラス固化体／オーバーバックの破損
安全対策	・搬送設備および建屋の耐震設計 ・支保工の品質管理／施工管理 ・避難坑道 ・落下時の回収が可能な設備の設置(マニプレータ、起上げ用具等) →なお、設備の転倒時の復旧は破損物撤去後、直接保守等により対応 ・破損物を一時保管可能な場所(貯蔵ピット)の確保(保守対策)	

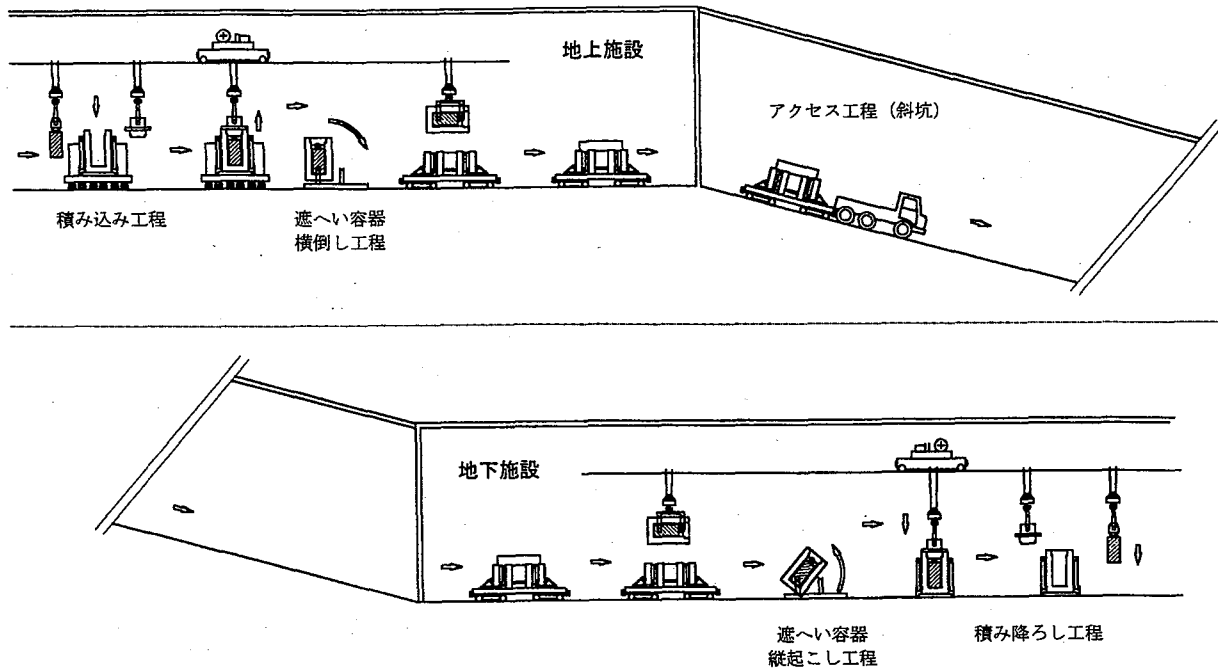


Fig.2 Transport process of waste form at access ramp

Table 3 Specifications for transport facilities of waste form (Vertical emplacement type)

ハンドリング 方式	①把持方式：オーバーパックを確実に把持・定置できる。 ②動力供給方式：定置装置に対して安定した動力を供給することができる。 ③走行方式：処分坑道内の処分孔を考慮して走行することができる。 ④位置検出方式：必要な停止，位置決め精度を測定する機能を有する。必要に応じて，位置基準マーカ―や位置管理記号を設ける。 ⑤位置決め方式：必要な停止，位置決め精度で定置する機能を有する。 ⑥運転方式：人間の直接操作ができない場合には，遠隔運転監視を行う。処分坑道および処分孔における廃棄体の定置は，自動運転／遠隔監視運転によるものとして，作業員の被ばく低減を図る。 ⑦監視方式：運転状況が監視できる。
安全性	①転倒防止：十分な転倒防止対策を講じることによって，ガラス固化体やオーバーパックに損傷を及ぼすような衝撃がない。 ②停電対策：電源喪失に対する十分な落下防止対策を講じることによって，ガラス固化体やオーバーパックに損傷を及ぼすような衝撃がない。
保守性	①遮蔽方式：搬送／定置作業時の遮蔽性がある程度確保できる。万が一に備えて，現場での作業員による直接保守，補修が可能である（＝遮蔽性の確保）。 ②救援方式：装置故障時の救援が確実にできる。 誤動作等による重大事故につながらないような安全対策の多重化を講じる。

- ・ ケース 1A (縦置き定置)：処分孔内に廃棄体を縦置きに 1 本ずつ定置する。
- ・ ケース 1B (縦置き定置)：処分孔内に廃棄体を縦置きに複数ずつ定置する。
- ・ ケース 2 (横置き定置)：処分坑道内に廃棄体を横置きに定置する。

緩衝材のハンドリングにおいては，成形体を破損せず，確実に搬送，定置が行えることが要求されることから，以下の点に注意する必要がある。

- ① 緩衝材に大きな荷重，特に曲げモーメント（引張応力）がかからない方法とする。
- ② 緩衝材の一部を把持するような，応力集中が発生する方法は避ける。

以上の観点から、一体型緩衝材のハンドリング方法として、真空吸引方式が、① 成形体の広い面を利用した把持であり緩衝材にハンドリング用の突起物等が不要、② 上下方向の動きで移動できる、③ 真空が容易に得られる、④ 遠隔着脱が容易に行える点で優れていると考えられる。

しかしながら、真空吸引方式においても、① 必要な真空度の確保（安全率の考え方）、② 真空吸引の吊り上げによる応力の発生と影響の確認、③ 電源喪失時の落下防止対策、について検討しておく必要がある。

3.3.2 ブロック型緩衝材のハンドリング方法

ブロック型緩衝材のハンドリングの大筋は一体型と同じである。ブロック型緩衝材の形状として、廃棄体側面部の緩衝材を輪切りにした「ドーナツ型」とドーナツ型のブロックを分割した「イチョウ型」の2ケースを検討した。イチョウ型については種々の分割方法が想定されるが、90°、60°の角度で分割するものとする。

「ドーナツ型」と「イチョウ型」は、重量、数量、定置精度および緩衝材間の隙間の観点からそれぞれ特徴を有する。重量等の仕様をTable 4に示す。

3.3.3 ハンドリングに係わる緩衝材の強度特性の検討

緩衝材のハンドリング性の成立性を検討するためには、ハンドリング時に緩衝材に発生する応力を推定し、その応力に対して緩衝材の強度が十分に耐え得るかどうかを評価する必要がある。ここでは、重量の重い一体型緩衝材についての検討結果を記載する。

一体型緩衝材のハンドリング方法は、縦置き定置方式では緩衝材の表面を真空吸引により持ち上げる方法を、横置き定置方式ではフォークリフトにより緩衝材の内側を持ち上げる方法を想定した。ハンドリングにより緩衝材に発生する応力が破壊を引き起こすか否かについて、FEM解析より得られた結果と、推定した緩衝材の引張強度を比較した。その結果、提案したハンドリング方法の成立性が示された。

なお、緩衝材の引張強度は、現在のところベントナイトが100%（クニゲル V1）の場合しか得られていないので、本解析では便宜的にこの値を用いた。今後、ベントナイトの配合率が80%の緩衝材について、密度および含水比を考慮しながらデータを取り、確認する必要がある。

縦置き定置方式におけるブロック型緩衝材のハンドリング設備の全体図をFig.3に示す。

4 廃棄体の定置・埋設

4.1 廃棄体および緩衝材の定置

4.1.1 廃棄体および緩衝材の定置方法と設備

廃棄体と緩衝材の定置作業のプロセスを、一体型緩衝

材の場合について、縦置きの場合をFig.4に示す。また、Fig.5に廃棄体の定置装置概念図を、Fig.6に緩衝材の定置装置概念図を示す。

処分坑道掘削時に湧水箇所はグラウチングにより止水されるため、定置時に大量の湧水が発生する可能性は小さい。しかし、緩衝材は水と接触すると膨潤を開始し、その所要の形状が保たれなくなるので、定置に支障のない程度の湧水であっても、定置作業に先立って排水した後に定置する必要がある。そのため、定置設備には、湧水量測定用の装置と処分孔を排水するための水中ポンプを装備する。

4.1.2 一体型緩衝材の定置方法と設備

(1) 縦置き定置方式

縦置き定置における一体型緩衝材の定置には以下の装置が必要である（Fig.4、Fig.6参照）。

① 緩衝材 A（胴体部）定置装置

② 緩衝材 B（蓋部）定置装置

定置作業装置に必要な基本的な性能は、廃棄体の場合とほとんど同じであるが、緩衝材 B（蓋部）の定置作業は放射線下で実施されるため、自動運転・遠隔操作により被ばくの低減を図る必要がある。

(2) 横置き定置方式

横置き定置における一体型緩衝材の定置には以下の装置が必要である（Fig.6参照）。

① 緩衝材 A（胴体部）定置装置

② 緩衝材 B（蓋部）定置装置

③ 地下搬送装置

定置装置に必要なとされる性能は、縦置き定置の場合とほとんど同じであるが、作業内容は縦置き定置とは相当に異なっており、成立性については十分な事前検討が必要である。

Table 4 Form of block buffer type

ブロック形状			分割数	高さ (mm)	重量 (kg)
ドーナツ型	緩衝材 B	蓋 部	2	200	824
		中間部①	8	190	582
	緩衝材 A	中間部②	2	170	521
		底 部	2	200	824
90° イチョウ型	緩衝材 B	蓋 部	8	200	206
		中間部①	32	190	146
	緩衝材 A	中間部②	8	170	130
		底 部	8	200	206
60° イチョウ型	緩衝材 B	蓋 部	12	200	137
		中間部①	48	190	97
	緩衝材 A	中間部②	12	170	87
		底 部	12	200	137
ドーナツ型	緩衝材 B	隙 間 部	1	130	122

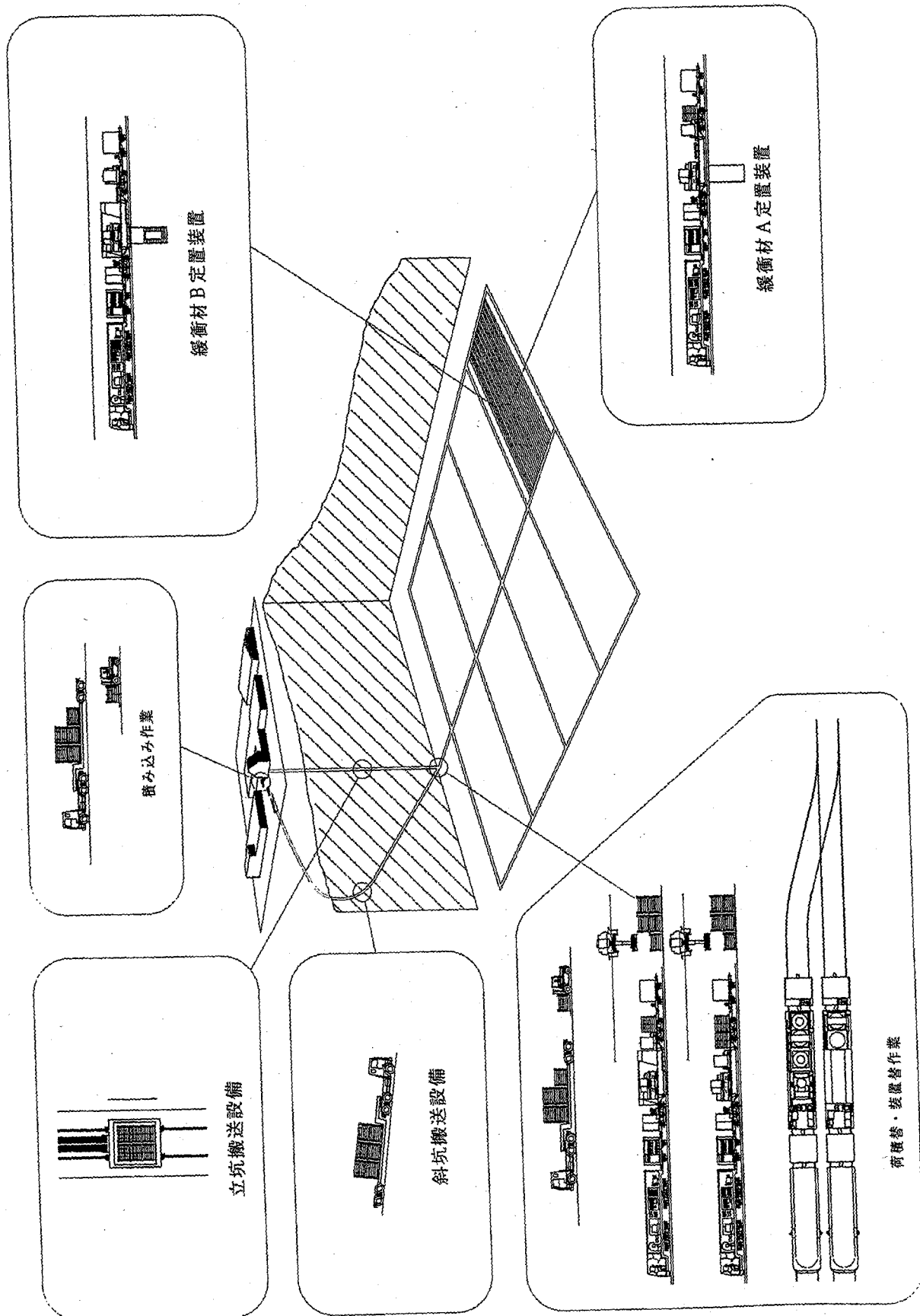


Fig.3 Transport facilities of buffer perspective (Vertical emplacement type)

4.1.3 ブロック型緩衝材の定置方法と設備

ブロック型緩衝材の縦置き定置作業のフローを Fig.7 に示す。なお、横置き定置の場合は、ブロックを順次処分坑道の中で積み上げる方式とブロックを積んだ緩衝材と廃棄体とを一体にして横転させ、そのまま処分坑道に押し込む方式の2種類を検討した。

4.1.4 定置時の施工管理

緩衝材が設計どおりに設置されていることを保証するためには、各施工段階に応じて、以下の確認が必要である。

- ① 定置直前の緩衝材には、欠損などの外観に異常がないことを確認する。
 - ② ブロック型では、緩衝材ブロックを段差なく積み上げるため、常時定置時の位置を確認する。また、一体型の場合には、蓋ブロックの定置位置を確認し、蓋の定置後に実施する間隙の充填作業に支障がないようにしておく。
 - ③ 定置が完了した緩衝材が、所定の位置に適切に定置できていることを確認する。ブロック型緩衝材の場合には、個々のブロックの位置が正しく定置され、緩衝材定置後の廃棄体の挿入が容易な状態となっていることが必要である。特に、緩衝材の破片の残置、一体型緩衝材の変形など、緩衝材内側の良好な状態の確保が必要である。
- また、横置き定置押し込み方式では、押し込みが確実に行われたことを確認するため、押し込み後の位置を計測する必要がある。
- ④ 岩盤と緩衝材との間隙を確実に充填するため、あら

かじめ充填量を把握し、必要な充填がなされていることを確認する。

4.2 定置方式の比較

Table 5 は、横置き定置方式と縦置き定置方式の2方式について、技術的可能性（ハンドリング、定置）、経済性および想定される社会的要請（緊急時の避難路の確保、再取り出し性）の観点から、両方式の比較を行ったものである。この結果から、現段階では縦置き定置方式の方が技術的な課題が少ないと判断できる。

4.3 廃棄体の埋設

廃棄体埋設後、オーバーバック・緩衝材・岩盤間に施工上の隙間が生じることが予想される。この隙間は、緩衝材の膨潤変形により充填され、水みちにならないように緩衝材の仕様を設定した。しかし、実際の建設施工の時点では、何らかの方法により、この隙間部分を埋設・充填しておく必要があるものと思われる。また、本報告では、緩衝材を地上施設において製作し、処分孔まで搬入し定置する方法について述べたが、緩衝材を現地で締固めて充填する方法も十分考えられる。

オーバーバック・緩衝材・岩盤間の隙間充填方法にしても、緩衝材の現地締固め施工方法にしても、その施工機械の開発が非常に重要になるものと思われる。例えば、隙間充填方法を構築するためには、主に以下のような問題を解決する必要がある。

隙間にベントナイトや砂などを充填する方法として重力落方式と空気搬送方式などが考えられる。重力落下

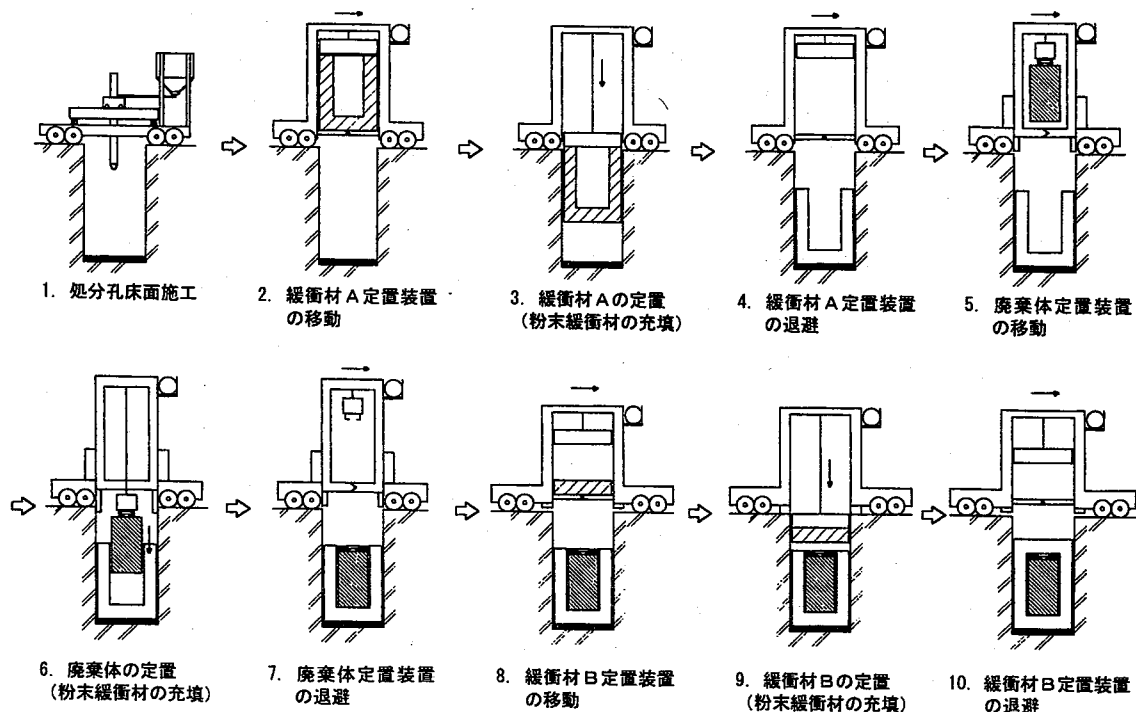
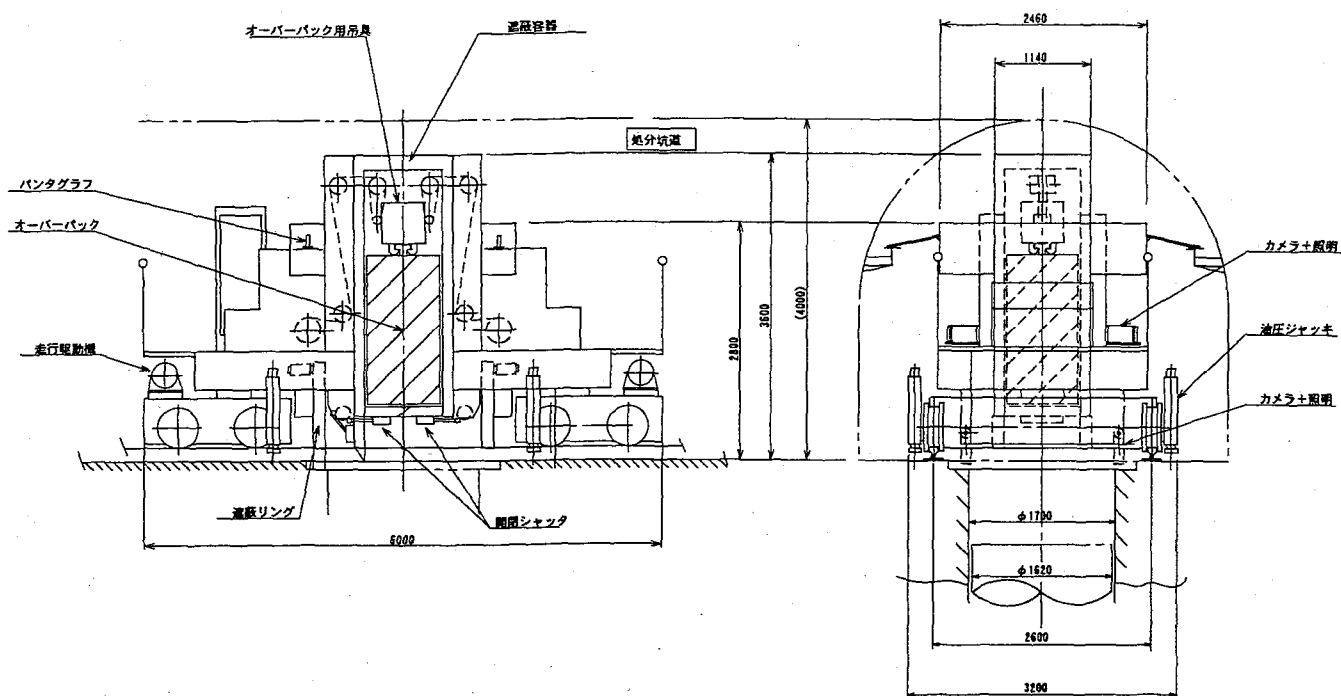
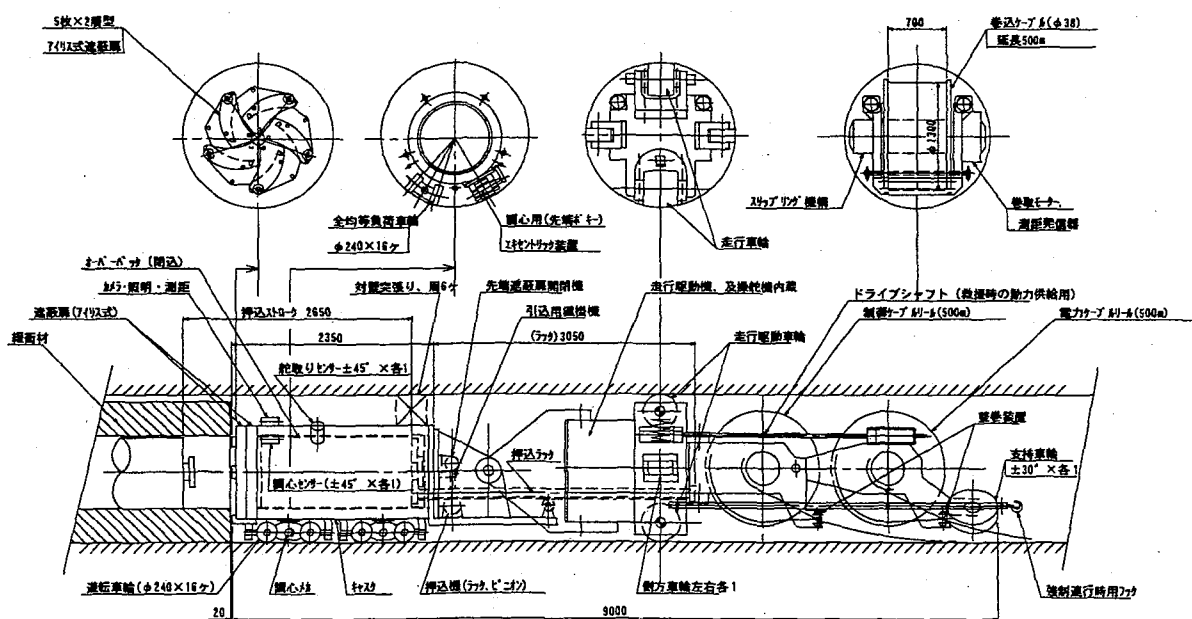


Fig.4 Emplacement process for vertical emplacement type



(a) Vertical emplacement type



(b) Horizontal emplacement type

Fig.5 Transport and emplacement facilities of waste form

方式は目的位置まで落下しないことが懸念され、空気搬送の場合は粉塵の処理の問題がある。また、充填時の品さらに、これらの機器は耐放射線性を保有しなければならないものと思われる。質管理方法としてオーバーパツ

ク・緩衝材・岩盤間の隙間が非常に狭いことを考慮すると、ITV カメラによる目視確認やセンサーによる確認が必要になると考えられる。

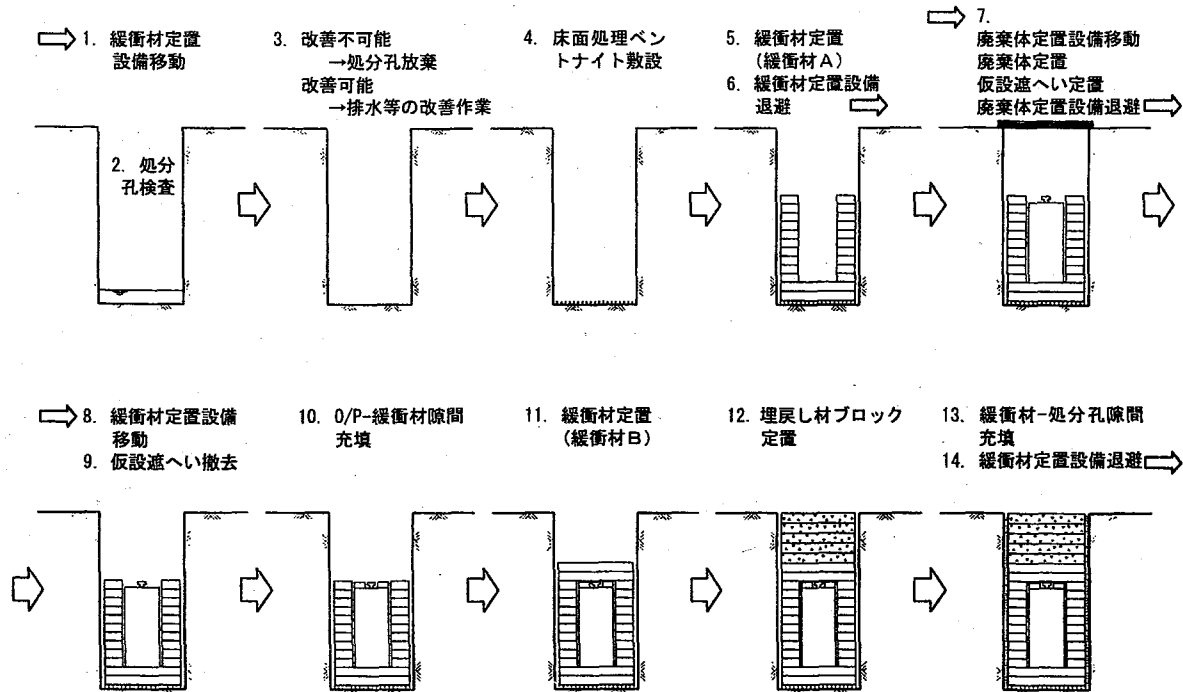


Fig.7 Emplacement process of buffer (Vertical emplacement Type)

Table 5 Comparison of vertical emplacement type and horizontal emplacement type

設置方式	技術的可能性	経済性	想定される社会的要請	
	ハンドリング及び設置		緊急時の避難路の確保	再取り出し性
処分孔縦置き設置	- 処分孔単位の作業となり不具合発生時の対処も容易 - 緩衝材の隙間充填が容易	サイクル機構（旧動燃）一次レポートの処分概念では縦置きの方が安い（SHP 中間取りまとめ [2]）	処分坑道埋戻しまで2方向に避難路が確保可能	問題の生じた廃棄体単独の再取り出し可能
処分坑道横置き設置	- 遠隔設置作業における姿勢制御が難しい - 緩衝材の上部隙間充填が難しい	横置きの処分坑道の径が、縦置きの処分孔の径と同程度になれば、縦置きより有利になる可能性あり	廃棄体の設置時から避難路は1方向のみ	問題の廃棄体に到達するまでの全ての廃棄体の取り出しが必要

潤性に対しては期待できないが、力学的安定性、調達性、経済性の観点からは有用な材料である。したがって、これらの材料を使用用途に合わせて混合して用いるのが有効と考えられる。そこで、既往の研究成果[3-10]に基づき、埋戻し材料として現地発生材（礫と砂）とベントナイトとの混合材料を取り上げ、その基本的性質について検討した。

5.1.1 締固め密度

締固め密度は埋戻し材に直接求める要件ではないが、密度が大きいほど良好な強度特性を示し、構造体として安定するので、砂や礫の割合が多いほど望ましいと考えられる。

5.1.2 透水特性

透水性は、一般に粘土分が多くなるほど（砂分が少なく

なるほど）低くなる。しかし、ベントナイト配合率が15%以上になると透水係数の低減率は緩やかになることから、ベントナイトの配合率の目安としては15~20%が適切であると考えられる。礫分の混合率については、約60%において透水係数が最も小さくなっている研究例[3]から、この値が礫の混合率の最適値の目安となる。ベントナイト配合率が15~20%、礫分が60%の場合の埋戻し材は、透水係数として 10^{-9} cm/sec程度と考えられる。

5.1.3 膨潤特性

ベントナイト配合率が20%の場合、発生する膨潤圧は50~100 kPa (0.5~1.0 kgf/cm²)である[4]が、埋戻し材に求められる定量的な膨潤圧（坑壁との間に隙間ができず、かつ母岩と同程度の低透水性を確保できる圧力）の合理的な設定は、現状では困難である。しかしながら、現在のところ、諸外国やサイクル機構（旧動燃）の配合例[5-10]を参考にす

ると、処分坑道下部の埋戻し材として、ベントナイト配合率 20 % の材料を用いることは、特に問題は生じないものと考えられる。一方、処分坑道上部の埋戻し材については、埋戻し材の沈下による空隙や高透水性部分が発生することを防ぐために、ベントナイト配合率をより高くする必要があるものと考えられる。この場合も必要な膨潤圧について明確になっていないが、処分坑道下部の 2 倍程度として 200 kPa (膨潤率は 30~80 %) を考えると、ベントナイト配合率は約 50 % に設定できるものと思われる。

5.1.4 強度変形特性

礫の混合率が約 60 % 付近において強度特性を表す粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ が大きくなることから、強度の面からは礫の混合率を 60 % 程度とすることが望ましい。一方、変形特性については、坑道閉鎖後の周辺岩盤の変形を抑制して緩み領域の増大を防ぐ観点から剛性の高いものが望ましい。砂とベントナイトの混合材料は、ベントナイト配合率が 15 % 以下では砂のような圧縮性を示し、20 % 近くでは粘土と砂の中間土の挙動を、30 % の配合率では、正規圧密粘土のような挙動を示す。したがって、ベントナイト配合率は、変形性の観点から 20 % 以下が望ましいと考えられる。

5.1.5 仕様設定

以上の知見に基づいて、埋め戻し材の配合割合の例を示すと以下ようになる。

- ・ 処分坑道下部の埋戻し材：ベントナイト：20 %，砂：20 %，礫：60 %
- ・ 処分坑道上部の埋戻し材：ベントナイト：50 %，砂：20 %，礫：30 %

これらの埋戻し材の化学的安定性や長期健全性については、混合する材料の物理・化学的性質あるいはコンクリートを使用する場合は高 pH 環境等による影響を緩衝材の場合と同様に十分に検討しておくことが肝要である。

施工性については、坑道下部は従来技術での施工が可能であるが、坑道上部の埋戻しに関しては吹付け等に頼る必要性が考えられるため、粗粒材の最大粒径を設定するか、あるいはベントナイトと砂の混合材料での施工が考えられる。

また、現地発生材(掘削ズリ)を有効に使用することが重要であるが、使用可能な材料の選択、粒度調整、および配合調整等の品質管理によって所定の品質を確保する必要がある。

5.2 埋戻しの方法と設備

埋戻し材は、地上設備である原料製造プラント(細骨材、粗骨材の製造プラント)および埋戻し材製造プラントにおいて製造される。そして、処分坑道、主要坑道、立坑を

埋戻すことになるが、その施工方法としては水平坑道(処分坑道と主要坑道)と立坑の 2 つに分類できる。

5.2.1 水平坑道の埋戻し

水平坑道の場合は、施工の信頼性の観点から、実績のある一般の土木工事と同様の方法をできるだけ採用することが望ましい。したがって、Fig.8 のように施工機械が稼働できる坑道下部については、ブルドーザー等による埋戻し材の撒き出しと敷均しを行い、振動ローラーによって締め固めを行うことができる。その際、含水比、トラフィカビリティ、材料の分離、隅角部の締め固め、排水に留意するとともに、埋戻しの管理基準を整備しておく必要がある。

坑道の上部についてはブルドーザーによる敷均しが困難なため、吹き付け機で埋戻し材を吹き込む。坑道上端部は、圧縮(圧密)沈下により地山との間に隙間が生じる可能性が考えられるため、上部埋戻し材はそれを補うための膨潤性をもつ材料を選定し、締め固めを十分に行う必要がある。

これらの埋戻し材の搬送は、シャトルトレインなどによる方法が挙げられる。

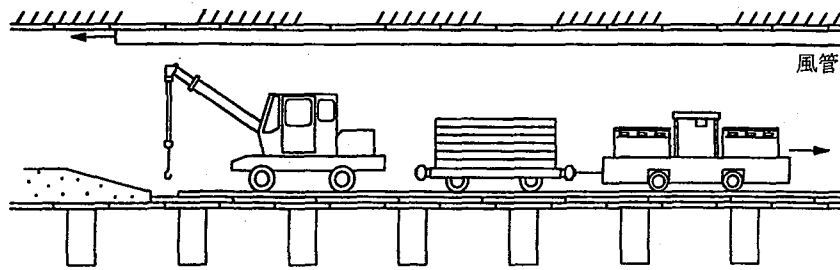
5.2.2 立坑の埋戻し

立坑の埋戻しは処分坑道、主要坑道が埋め戻された後に実施される。立坑の埋戻しも従来工法であるスカフォードを足場にし、キブルなどによる埋戻し材の搬入と振動ローラーによる締め固めで行うことができる。留意点として考えられるのは、埋戻し材の圧縮(圧密)沈下が生じ、上部プラグとの間に隙間が生じる可能性と湧水の処理である。沈下に対しては、材料の選定および十分な締め固めを、湧水に対しては集水リングによる排水あるいは湧水の低減を図るべくグラウチングによる止水が必要となることもある。

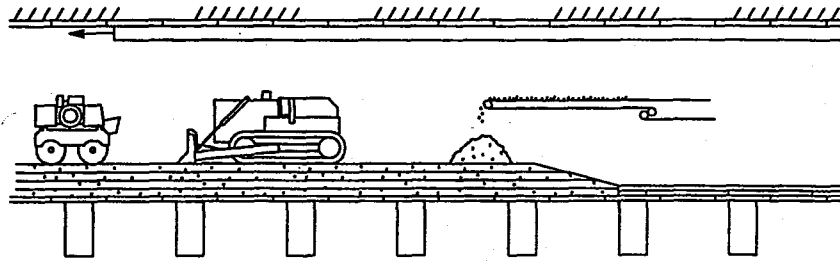
5.3 埋戻し材の搬送量の算定

埋戻し材の搬送量を算定する対象の坑道は、・処分坑道(縦置き定置方式)、・主要坑道、・立坑とした。縦置き定置方式における処分坑道は、坑道直径 5.35m、処分孔の離間距離 6.0m を仮設定し、1 日 5 本の廃棄体を処分するものとして埋戻し量を算定した。主要坑道断面は、やや余裕をみて 25 m²、坑道の延長としては 1 区画の大きさを 1.0×0.5 km とし、これを取り囲む長さ 3.0 km の主要坑道を 6 区画について考慮し 18 km とした。主要坑道の埋戻し期間は、マスタースケジュールにおいて主要坑道と立坑の埋戻し期間を 10 年間としていることから、主要坑道については半分の 5 年間で埋戻し期間とした。立坑については、1000 m の立坑 7 本を 5 年間で埋め戻すものとした。以上の設定条件によりそれぞれの埋戻し量を算出した結果、処分坑道が最も大きく、980 m³/日とな

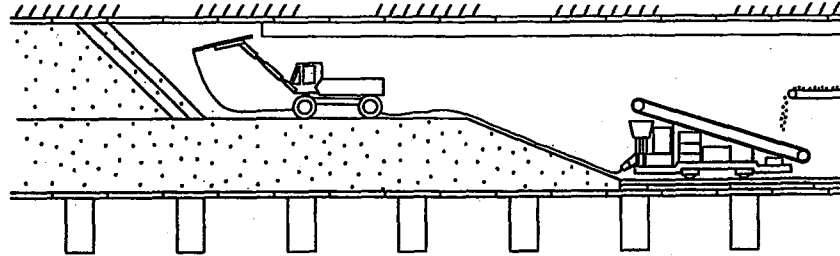
① 舗装、軌道等撤去法（移動式クレーン、運搬台車、バッテリー機関車）



② 下部敷均し、締固め（振動ローラ、ブルドーザー、ストレッチコンベア）



③ 上部吹付け（吹付け機）



④ 上部締固め（振動締固め機）

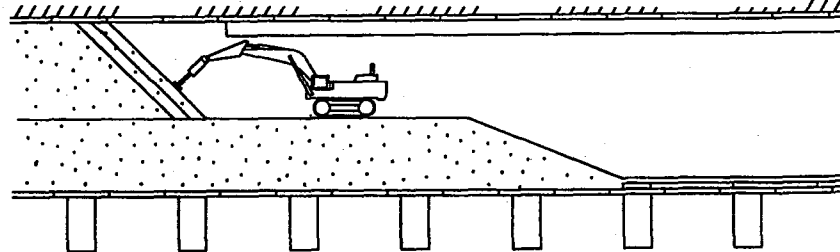


Fig.8 Backfilling method of horizontal tunnel

った。この量はダム現場などの実績から現状技術で十分に搬送可能である。

5.4 埋戻し材の施工管理

転圧締固め後の埋戻し材の要求性能に対応する品質特性としては、透水係数、水分拡散係数、膨潤圧、膨潤率、分配係数、核種の溶解度、実効拡散係数、pH、せん断強度（粘着力、せん断抵抗角）、変形特性（変形係数、圧縮指数、圧密降伏応力、体積圧縮係数、圧密係数）、クリープ特性が挙げられるが、これらを現地で逐一管理することは実質的に困難である。そこで、代表する重要な品質特性を他

の特性（代用特性）で評価抽出し、この代用特性を現地で管理する方法が考えられる。代用特性については、本施工前に室内試験あるいは現地での施工前試験（モデル施工による試験・管理）を実施し、本来管理すべき品質特性をこれらの代用特性で的確に管理可能かどうかを把握しておく必要がある。

埋戻し材の管理項目として、材料管理は製造工場の試験成績表など、製造管理は材料の配合・含水比・保管状態（温度・湿度）など、締固め管理は撒出し量・含水比の変化・粉塵発生量など、出来型管理は施工密度（転圧回数など）・施工含水比などが挙げられる。

5.5 プラグ材の選定と施工

5.5.1 プラグの要求機能と仕様検討

(1) プラグの役割

プラグの役割は以下の2つである。

- ① 坑道およびその周辺の緩み域、断層破碎帯、各種調査・試験用ボアホール等が将来主要な地下水移行経路（水みち）とならないようにその連続性を絶つこと。
- ② 坑道内の緩衝材や埋戻し材の移動・流出を防止すること。

(2) プラグの要求機能

プラグの要求機能としては、周辺岩盤と同程度以下の透水係数を有する止水性、緩衝材や埋戻し材を極力その場に留めるための強度、およびこれらの止水性や強度を長期にわたり確保するための長期安定性が挙げられる。

プラグの要求機能はその設置位置により異なり、処分坑道両端部では隣接する緩衝材や埋戻し材を支持する強度、主要・連絡・アクセス坑道の交差部では長期止水性、アクセス坑道中間部では長期にわたる大きな止水性とこれを担保するための強度、アクセス坑道坑口部では強度が必要である。また、破碎帯プラグには長期にわたる大きな止水性（アクセス坑道の破碎帯プラグでは止水性を担保するための強度）、ボアホールプラグには長期止水性が必要である。

(3) プラグの仕様検討

プラグの主たる要求機能（止水性と強度）に対しては、それぞれ止水部材と強度部材の組合せで対応する。止水部材としては長期止水性に優れた高圧縮ベントナイト、強度部材としてはコンクリートと岩石ブロックが考えられる。ただし、コンクリートは材料劣化と化学的変質の問題があり、岩石ブロックは施工方法と構造的な工夫が必要である。

止水部材の設計目標透水係数を 10^{-8} cm/s と設定し、この要求機能を満たす高圧縮ベントナイトブロックプラグの材料仕様を検討した。その結果、緩衝材と同様のクニゲル V1 相当ベントナイト 80 % + ケイ砂 20 % で、初期乾燥密度 1.8 g/cm^3 程度であれば、プラグの止水性は十分満足できることが分かった。

次に、既往のダムや岩盤タンクの設計方法を適用して、強度部材としてのプラグ設計を試みた。この結果、例えばアクセス坑道（立坑）中間部の強度部材としてコンクリートを用いる場合には、コンクリートが材料劣化して強度を失うと埋戻し材の自重により止水部材であるベントナイトが大きくせん断変形するため、かなり長い止水部材が必要となる。一方、岩石ブロックを用いる場合には、くさび型プラグの長さは短くなるが、埋戻し材の流出を防ぐために隙間部の充填が必要となる。

以上のような仕様検討より、プラグパターンとして

Table 6 の A～D のパターンを設定した。パターン C とパターン D のプラグ概念図を Fig.9 に例示する。

なお、アクセス坑道に設置するプラグの強度部材の設計では、埋戻し材と岩盤壁面との摩擦抵抗を無視して保守的な検討を行ったが、より合理的な設計を行うためには、プラグに作用する自重と抵抗力を明らかにする必要がある。そのためには、坑道内埋戻し材の長期力学データの取得および長期的挙動の評価が不可欠である。また、止水用プラグや破碎帯プラグの拡幅部形状や長さ等を詳細設計するためには、サイトの初期応力状態を考慮した岩盤の力学的安定解析、およびサイトの地質・水理条件を考慮した性能評価計算が必要である。

5.5.2 プラグの施工

地層処分場に設置するプラグの搬送・取付け方法と設備に関して、現状技術をベースにその実現性を検討した結果をまとめると、以下のとおりである。

- ① 拡幅キー部の掘削方法としては、岩盤損傷を考慮して機械掘削を選定する。堆積岩では、トンネル工事で現在用いられている小型の自由断面掘削機（ロードヘッダー）により岩盤を一度に掘削する方法で対応可能である。
- ② 結晶質岩の場合には岩盤を段階に分けて拡幅掘削する必要がある。第1段階（すりつけ部の縁切り）でのスロットドリリング工法、第2段階（すりつけ部の掘削）での静的破碎剤／油圧クサビによる割岩と油圧ブレーカ破碎は全て現状技術ではほぼ対応可能である。第3段階（拡幅部の掘削）でのワイヤーソー／ウォータージェット工法に関しては、施工実績から技術的には可能であるが、現状では掘削能率が低い今後さらなる検討が必要である。
- ③ プラグの設置方法に関して、止水用のベントナイトプラグの場合は圧縮成形ブロックの積上げ方式が適切である。岩盤壁面とプラグとの隙間部（10 cm 程度）はベントナイト粉末を吹込充填する。ただし、吹付機による粉末ベントナイトの充填性やプラグ全体としての長期止水性などについては、今後、室内および原位置試験により確認する必要がある。
- ④ 強度用のコンクリートプラグの場合、特に横坑でのコンクリート打設の際はエア抜き管等をプラグ上端部に設置する必要がある。なお、コンクリート打設に関しては、現状技術で対応可能である。

5.5.3 プラグ材の施工管理

プラグの材料としては、コンクリート、高圧縮ベントナイトあるいは岩石ブロックが考えられている。

コンクリートプラグはダムや石油地下備蓄等で実績があることから、現状の管理技術で基本的に対応可能であると考えられる。すなわち、材料管理は製造工場の試験

Table 6 Pattern of plug

形式	パターン	プラグ設置位置
強度部材のみのプラグ	A	処分坑道両端部
	A'	アクセス坑道坑口部
止水部材のみのプラグ	B 1	処分区画と主要坑道の交差部
	B 2	主要坑道どうしの交差部
止水部材と強度部材を組合せたプラグ	C 1	アクセス坑道の基部
	C 2	アクセス坑道の中間部
ダブル配列の破碎帯プラグ	D	断層破碎帯/地層境界部と坑道の交差部
ボアホールプラグ		ボアホール全体

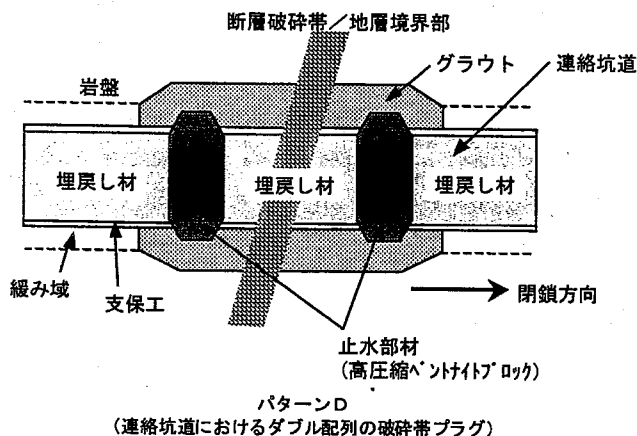
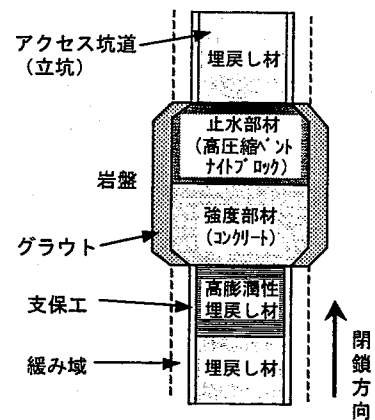
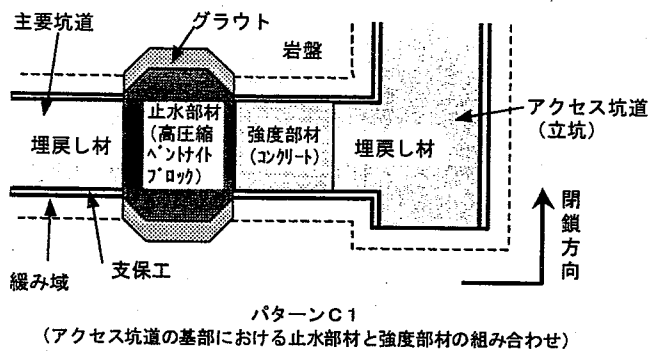


Fig.9 Conceptual Arrangement for Plug

成績表など、製造管理は材料の配合・水セメント比・スランプ・強度など、設置管理は型枠の形状・寸法・位置など、出来型管理はコンクリートの充填度・硬化後のひび割れ・材齢による圧縮強度などが挙げられる。

高圧縮ベントナイトプラグの場合、材料管理は製造工場の試験成績表など、製造管理は材料の配合・含水比・透水係数・保管状態など、設置管理はクラックや破損の有無・含水比の変化・位置など、出来型管理は出来型寸法・健全性・隙間充填の確実性などが挙げられる。

岩石ブロックプラグについては、材料管理は岩種・圧縮強度・比重などの試験成績表など、製造管理は寸法精度・き裂や割れの有無など、設置管理は設置位置・欠け

の有無など、出来型管理は沈下の有無・隙間充填の確実性などが挙げられる。

なお、止水プラグ設置箇所の拡幅キー部の掘削時においては、所定の寸法・平滑度について測定管理する技術を開発する必要がある。

5.6 支保工の撤去可能性の検討

建設時のトンネル形状を確保するためには、通常、コンクリート材料を基本とした支保工が用いられる。その支保設計においては、安全性が確保できる範囲でできるだけ軽くすべきであり、また、膨大な量を必要とする支保材についてもコンクリートを主体とした材料を用いな

ければ経済的に成り立たなくなる可能性がある。

しかし、一方では、コンクリートと緩衝材の接触による緩衝材の劣化と、コンクリート自体の長期劣化による高透水性ゾーンの形成が懸念されている。そこで、コンクリートの支保工が坑道の埋戻し時に撤去できるかが問題となる。

支保工は、元来、坑道掘削時に坑道が壊れないように施工されるものである。支保工は掘削された箇所がすぐに施工され、その後の掘削で生じる岩盤からの荷重を受け持って岩盤の崩壊を防ぐ役目をする。そして、この状態が長期に及ぶと岩盤のクリープ変形などによりさらに大きな荷重が支保工に作用する。このような状況の中で、支保工を撤去すれば岩盤が崩壊する可能性が高い。したがって、支保工の撤去は基本的にはできないとすべきであろうし、もし撤去することを考えるとすればかなりの困難を伴うことが想定される。

力学的な解析結果によれば、仮想サイトとして設定した堆積岩地域の処分深度 520 m 位置（岩盤の一軸圧縮強度 11.3 MPa）では、坑道周囲の岩盤のゆるみ（塑性領域）は 20 ～ 50 cm となる。解析的に塑性領域が生じないことを岩盤が自立する条件とすれば、処分場の深度は 300 m 程度までとなり、深度 520 m 位置に処分場を建設する場合は、岩盤強度が 19 MPa 以上ないと坑道周囲に塑性領域が発生することになる。念のため、堆積岩地域（処分深度 520 m、岩盤強度 11.3 MPa）における処分坑道を例にし、石材ブロック（厚さ 50 cm）を衝立にして支保工（コンクリートセグメント）を撤去する三次元 FEM 解析を行ったが、衝立による岩盤の変位抑制効果は坑道長軸方向に衝立の前後 40 cm 程度しかないことがわかり、支保工撤去の困難さが示された。

しかし、いずれの場合も現実には部分的な岩盤のゆるみ荷重が支保に作用している状態であることから、その支保を撤去することはかなりの危険性と困難性を伴うものと考えられる。

6 操業中の放射線管理

6.1 管理区域の設定

地下施設において管理区域の設定が必要になるのは、廃棄体の積替え作業と定置作業時である。ここでは管理区域をできるだけ小規模な範囲に止める方法を考えるものとする。しかし、廃棄体の定置は一日 5 本を埋設する必要があることから、少なくとも処分坑道 5 本分は管理区域とする必要がある。処分坑道 5 本を管理区域として操業する場合の放射線管理の概念図（縦置き）を Fig.10 に示す。管理区域の変更頻度は、半年～2.5 年に 1 回程度である。

6.2 管理区域での管理項目

放射線の管理項目としては以下の項目が挙げられる。

- ・ 出入り管理（人や物品の管理、装置表面の汚染管理）
- ・ 放射線監視（空間線量当量、空気中および水中の放射能濃度測定）
- ・ 個人被ばく管理

7 閉鎖前後における管理（モニタリング）

これまで、モニタリングについては国内外で様々な議論がなされている。ここでは、これらの意見を整理し、現時点で考えられるモニタリングについて検討した。

その結果、技術的観点からのモニタリングとしては、環境モニタリング（処分場の調査、建設、操業、埋戻し、閉鎖までの行為に対する周辺環境の監視）、作業安全モニタリング（処分場の調査、建設、操業、埋戻し、閉鎖までの行為を通じての作業環境の監視）、および品質管理モニタリング（廃棄体の検査から定置までの品質管理、定置後の位置確認、代表的な廃棄体の短期的な挙動確認）などが考えられた。

なお、モニタリングに使用される各種センサーは、従

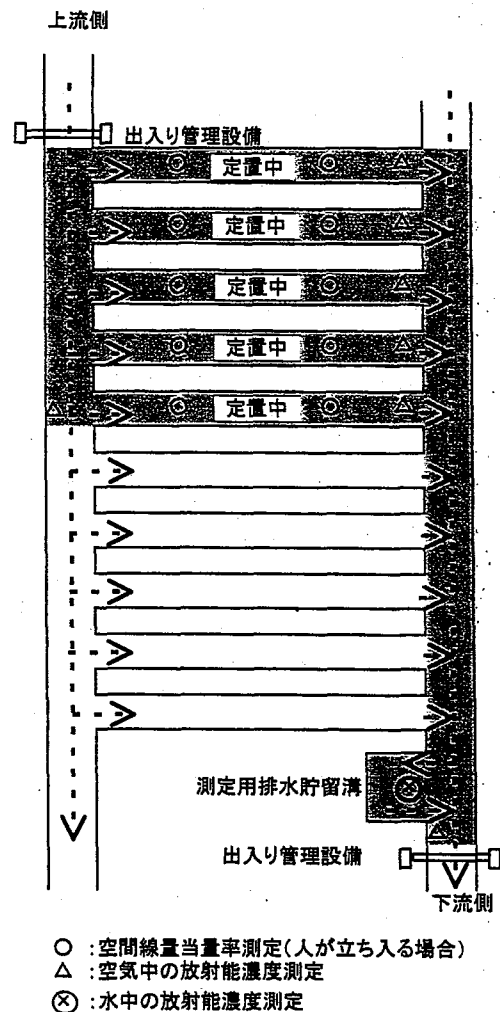


Fig.10 The concept of controlled area in the underground facility

来までその長期耐久性や地下の深い環境下での使用要求がなかったことから、現状の技術レベルにおいて多くの課題を有している。

8 まとめ

地下施設における廃棄体のハンドリング、定置・埋設の方法と設備、地下施設の埋戻しのための材料と施工法、閉鎖前後におけるモニタリングについて検討し、以下の結果を得た。

① 廃棄体埋設の基本的考え方

廃棄体埋設時の作業従事者の被ばくの低減を図るため、極力遠隔操作を導入し、縦置き定置の場合は、作業効率を上げるために、オーバーバック上部の埋戻し材に遮蔽性を持たせ、オーバーバック表面までの距離を 1.5m 確保することとした。

② 廃棄体のハンドリング

オーバーバックと緩衝材のハンドリング方法とその設備について検討した。オーバーバックについては、ハンドリング工程のフローを分析し、各事故事象に対する安全対策を検討した。緩衝材のハンドリング方式については、ハンドリングがより困難な一体型緩衝材の場合について、真空吸引方式（縦置き定置）とフォークリフト方式（横置き定置）を検討し、その成立性を示した。

③ 廃棄体の定置・埋設

オーバーバックおよび緩衝材の定置について、横置き定置および縦置き定置のそれぞれの作業のプロセス、機器の概念を構築した。緩衝材については、一体型緩衝材とブロック型緩衝材に分けて検討した。

④ 地下施設の埋戻し

埋戻し材については、種々の材料について基本的特性などを検討し、その配合案を提示した。

埋戻し方法は、水平坑道については、坑道下部を従来工法のブルドーザーによる撤出しと振動ローラーによる締固めとした。水平坑道上端部については埋戻し材の圧縮（圧密）沈下により地山との間に隙間が生じる可能性があるため、膨潤性をもつ材料を用いた吹付け等による工法が必要である。立坑については、従来工法であるスカフォードを足場に、キブルなどによる埋戻し材の搬入と振動ローラーによる締固めの方式とした。

⑤ プラグ材の選定と施工

プラグの止水部材としてはベントナイトブロック、強度部材としてはコンクリートまたは岩石ブロックが考えられる。プラグの種類としては、坑道端部や岩盤緩み域を分断するシステムプラグ、破碎帯への水みちを分断す

る破碎帯プラグ、ボーリング孔を閉塞するボアホールプラグなどがあり、設置場所の要求に応じて止水プラグまたは強度プラグを施す。また、必要により両者を併用する。

⑥ 支保工撤去の可能性

緩衝材に化学的悪影響を及ぼす可能性のあるコンクリート支保工について、坑道埋戻し時の撤去可能性を検討し、基本的に支保工を撤去することは難しいことを示した。

⑦ 閉鎖前後における管理（モニタリング）

モニタリングに関しては、国内外で多くの意見が出されている。それらの意見を参考に現時点で考えられるモニタリングとして、技術的観点からは「環境モニタリング」「作業安全確認モニタリング」「品質管理モニタリング」が考えられることを示した。

参考文献

- [1] 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量当量限度等を定める件、通商産業省告示第 131 号、平成元年 3 月 27 日。
- [2] 高レベル事業推進準備会：高レベル放射性廃棄物処分事業に関する検討 中間とりまとめ（平成 7 年度）〔基礎的検討〕参考資料（1996）。
- [3] 田中俊行 他：礫混入ベントナイト混合土の礫混入率が透水係数の及ぼす影響、第 30 回土質工学会研究発表会講演集、pp.1-29（1995）。
- [4] 小峯秀雄、緒方信英：放射性廃棄物処分のための砂・ベントナイト混合材料の膨潤特性とその評価法、電力中央研究所報告、U96029（1997）。
- [5] Johnson, L. H. et al: The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste Engineered Barriers Alternatives, AECL-10718, COG-93-8（1994）。
- [6] SKB: Final Storage of Spent Nuclear Fuel - KBS-3, III Barrier（1983）。
- [7] SKB: SKB 91 Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety（1992）。
- [8] DOE: Site Characterization Plan, Overview（1988）。
- [9] NAGRA: Kristallin-1 Safety Assessment Report, TR 93-22（1994）。
- [10] 動力炉・核燃料開発事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書、一平成 3 年度一、PNC TN 1410 92-081（1992）。