



JAEA-Data/Code

2015-018

DOI:10.11484/jaea-data-code-2015-018

地層処分の工学技術の適用に関連した
シナリオ設定手法の整備
—事故及び人的要因に対する工学的対策の整理—
(受託研究)

Scenario Development on Application of Engineering Technology
for Geological Disposal
— Study on Engineering Measures for Accidents and Human Factors —
(Contract Research)

高井 静霞 高山 秀樹 武田 聖司

Shizuka TAKAI, Hideki TAKAYAMA and Seiji TAKEDA

安全研究・防災支援部門
安全研究センター
環境安全研究ディビジョン

Environmental Safety Research Division
Nuclear Safety Research Center
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

November 2015

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2015

地層処分の工学技術の適用に関連したシナリオ設定手法の整備
—事故及び人的要因に対する工学的対策の整理—
(受託研究)

日本原子力研究開発機構

安全研究・防災支援部門 安全研究センター 環境安全研究ディビジョン

高井 静霞・高山 秀樹^{*1}・武田 聖司

(2015年8月28日受理)

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価では、処分場のサイト調査・建設・操業・閉鎖段階で用いられる工学技術が地層処分システムに及ぼす影響を考慮したシナリオを構築する必要がある。そのため、これまでの研究において、地層処分事業の各段階で採用される可能性のある工学技術をリスト化し、それらの情報から工学技術を適用することによって起こりえる事故及び人的要因を特定した。さらに、事故及び人的要因に起因して生じえる人工バリア・天然バリアの設計上想定される状態から逸脱した状態（以下、逸脱事象）を特定するとともに、逸脱事象が顕在化した場合のバリア特性の変化、並びに、安全機能の喪失・低下につながる可能性のある一連の影響の連鎖をシナリオとして整理した。

本研究では、特定した事故及び人的要因に対する発生防止対策を整理した。また、逸脱事象に至らないようにする対策及び検知の手段について調査するとともに、逸脱事象が発生した場合に適用可能な影響低減対策を整理した。さらに、これらの工学的対策の現状の有効性について検討し、工学的対策によって影響の低減が十分期待できない場合を、安全性の観点から着目すべき逸脱事象として分類した。これら一連の整理の結果は、「地層処分の工学技術の適用に関連したシナリオ構築のためのデータベース」に追加した。

本研究は、原子力規制委員会原子力規制庁「平成25年度地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備」として実施したものである。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4

※1 特定課題推進員（現在：中央開発株式会社）

Scenario Development on Application of Engineering Technology for Geological Disposal
– Study on Engineering Measures for Accidents and Human Factors -
(Contract Research)

Shizuka TAKAI, Hideki TAKAYAMA^{※1} and Seiji TAKEDA

Environmental Safety Research Division
Nuclear Safety Research Center
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 28, 2015)

In the safety assessment for geological disposal of the high-level radioactive waste, scenarios need to be developed in consideration of influence on disposal systems by applying engineering technologies at each stage of site characterization, construction, operation and closure of disposal facility. To develop the scenarios, the engineering technologies which are applicable for each stage of geological disposal are listed in previous study. From this information, deviation events caused by the accidents and human factors lurking in the engineering technologies, which are deviated states of engineered and natural barriers from expected states occurred by applying engineering technologies were identified. Assuming the occurrence of the deviation events, possible evolution of features of barriers or loss/reduction of safety functions of barriers was discussed. Finally, the sequence of influence of the deviation events caused by application of engineering technologies on long-term safety after closure of the disposal facility was shown as scenarios.

In this study, we compiled information of prevention measures for the accidents and human factors. Furthermore, we surveyed prevention measures and detecting means for the deviation events and compiled applicable influence reduction means for the deviation events. In addition, we identified remarkable deviation events from the point of view of safety, whose influence is not expected to be reduced sufficiently by these engineering measures. These results were integrated to the database that could support development of scenarios caused by application of engineering technologies to geological disposal.

Keywords: Geological Disposal, Engineering Technology, Accidents and Human Factors, Deviation Events, Scenario, Engineering Measures

This research is funded by the Secretariat of Nuclear Regulation Authority, Nuclear Regulation Authority, Japan.
※1 Special Topic Engineer (Present affiliation, Chuo Kaihatsu Corporation)

目 次

1. はじめに.....	1
2. 工学的対策の検討方法.....	2
3. 工学的対策の検討結果.....	5
4. 規制側が着目すべき逸脱事象の検討.....	16
5. まとめ.....	36
謝辞.....	37
参考文献.....	37
付録	
Appendix- I 事故・人的要因と逸脱事象.....	39
Appendix- II 工学技術適用上の事故・人的要因.....	41

Contents

1. Introduction.....	1
2. Research method for engineering measures.....	2
3. Results of research for engineering measures.....	5
4. Remarkable deviation events from the point of view of safety regulation.....	16
5. Conclusion.....	36
Acknowledgement.....	37
References.....	37
Appendix	
Appendix- I Accidents and human factors and deviation events.....	39
Appendix- II Accidents and human factors by applying engineering technologies.....	41

This is a blank page.

1. はじめに

我が国の高レベル放射性廃棄物（以下、HLW）処分の実施主体である原子力環境整備機構（以下、NUMO）では、地層処分場の閉鎖後長期の安全確保を実現するために、①適切なサイト選定と確認、②処分場の設計・施工などの適切な工学技術、③地層処分システムの長期安全性の評価の三つの安全確保策を確実に実施することとしている⁽¹⁾。このうち②の工学技術に関しては、閉鎖後長期の安全性を確保するために工学技術を適用した場合に、坑道の掘削、人工バリアの製造、原位置での定置などの工程において施工誤差や品質のばらつきなどが生じることが想定され、それらが閉鎖後の安全性に対する長期的な不確実性につながるということが考えられている。さらに③の安全評価に関しては、工学的対策を実施する中で、どの程度の不確実性が含まれているかについて明らかにし、閉鎖後長期の安全性に及ぼす影響について検討する必要があるとしている。このことから、地層処分の安全規制の観点からは、地層処分採用される工学技術に対し要求品質が満足されていることを確認すること、および、工学技術に関連した事故・人的要因により要求品質を満たさない場合は、それを要因とした長期安全性への影響を把握することが重要になると考えられる。

そこで、「地層処分の工学技術の適用に関連したシナリオ設定手法の整備－サイト調査・建設・操業・閉鎖段階で発生する事故・人的要因とそれらの閉鎖後の安全機能への影響についての整理－（受託研究）」⁽²⁾（以下、JAEA-Data/Code 2014-026）では、サイト調査・建設・操業・閉鎖段階において採用が検討されている工学技術を対象に、それらの現状の技術情報から事故・人的要因とそれに起因して生じえる人工バリア・天然バリアの設計上想定される状態から逸脱した状態（以下、逸脱事象）を把握した。さらに、逸脱事象が顕在化した場合の人工バリアおよび天然バリアの特性（熱・水理・力学・化学：以下、THMC）への影響、さらに、安全機能の喪失・低下につながる可能性のある一連の影響の連鎖を、シナリオとして逸脱事象ごとに整理した。

しかし、このような事故・人的要因を起因とした安全機能の喪失・低下につながる影響の連鎖は、事故・人的要因や逸脱事象の発生を防止するような工学的対策を施すことで、打ち切ることや緩和することが可能であると考えられる。このことから、工学的対策に関する情報を収集・整理し、その適用性についての分析を行うことは、JAEA-Data/Code 2014-026において逸脱事象ごとに整理したシナリオの妥当性を判断するために有効であると考えられる。また、原子力環境整備推進・資金管理センター⁽³⁾では、現在までに、工学的対策として用いられる多様な工学技術の整備、及びその妥当性等を評価するシステムの整備が実施されている。

本稿では、まずこれらの工学的対策として用いられる工学技術の開発状況をもとに、事故・人的要因および逸脱事象に対する工学的対策の現時点での有無、適用実績および開発状況の情報を整理した。さらに、現状の工学的対策の有効性についての検討を踏まえ、工学的対策に関して課題が残っていると考えられる逸脱事象を、規制側が着目すべき逸脱事象として分類した。あわせて、それら一連の整理の結果を、「地層処分の工学技術の適用に関連したシナリオ構築のためのデータベース」に追加した。

2. 工学的対策の検討方法

HLW 地層処分場のサイト調査・建設・操業・閉鎖段階において、特定の工学技術を適用した際に何らかの事故・人的要因が発生した場合（例えば、オーバーパックの地下施設への搬送時の衝突事故）、設計上想定される状態から逸脱した状態（逸脱事象：例えば、ガラス固化体の表面積の増加）が発生し、人工バリアまたは天然バリアの THMC を変化させ（例えば、ガラス固化体の変質・溶解への影響）、安全機能（例えば、放射性核種の浸出抑制）の喪失・低下につながるといった影響の連鎖が進展することが考えられる（図 2-1）。しかし、図 2-1 のように事故・人的要因や逸脱事象に対して発生防止対策を行うことや発生した逸脱事象を検知することで、逸脱事象の発生を抑制することが可能となる。さらに、仮に逸脱事象が発生した場合でも、検知した事故・人的要因または逸脱事象に対して影響低減対策を行うことで、安全機能の喪失・低下につながる一連の影響の連鎖を断ち切るあるいは緩和することができると考えられる。これらを以下では「工学的対策」という。

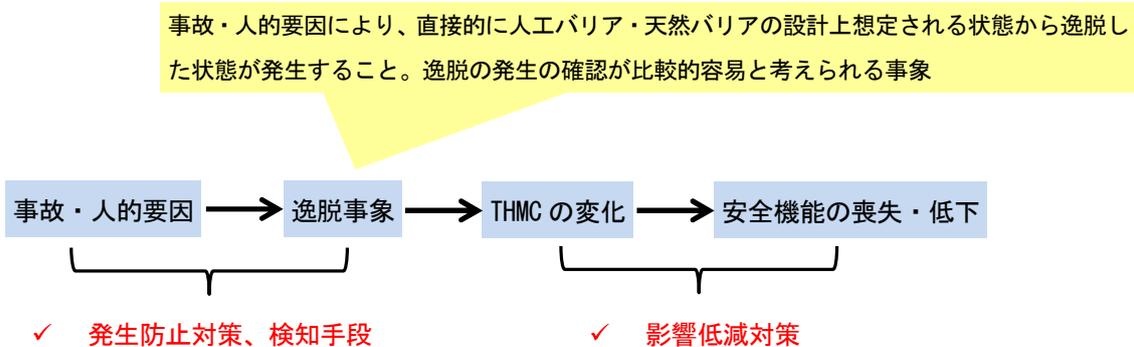


図 2-1 事故・人的要因に起因した影響の連鎖およびそれに対する工学的対策

このようなことから、工学的対策に関する情報を収集・整理し、その適用性についての分析を行うことは、シナリオの妥当性を検討するために有効であると考えた。

JAEA-Data/Code 2014-026 において、NUMO-TR-11-01⁽¹⁾、NUMO-TR-04-01⁽⁴⁾などで地層処分事業で採用される可能性のある工学技術、および、トンネル標準示方書⁽⁶⁾に示されているトンネル建設技術を基に作成した工学技術のリストを、表 2-1 に示す。表 2-1 では、サイト調査・建設・操業・閉鎖段階で用いられる工学技術を工程ごとに大分類・中分類・小分類に細分化した。例えば、建設段階の坑道建設（大分類）は、坑道掘削、支保工、覆工など（中分類）の工程に区分することができる。さらに、坑道掘削（中分類）は掘削やズリ運搬（小分類）の工程に区分でき、掘削には発破掘削、自由断面掘削および全断面掘削などの掘削方式がある。このように小分類には、中分類の工程をさらに細分化した分類の場合と、中分類の工程を各工学技術の具体的な手法により分類した場合を表記している。

表 2-1 工学技術のリスト

事業段階	大分類	中分類	小分類	
A	サイト調査	ボーリング	機械ボーリング	
			機械ボーリング(ロータリー掘削方式)	
B	建設段階	坑道建設	坑道掘削	発破掘削、自由断面掘削、全断面掘削(TBM※1)、ズリ処理(タイヤ方式)
			支保工	吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工
			覆工	覆工コンクリート
			インバート	インバートコンクリート
			防水工	防水シート
			排水工	排水管の敷設、水抜きボーリング
			止水工法	グラウト方式
			切羽安定対策	天端部の安定対策(先受け工)、鏡面の安定対策(鏡吹付け)
			通気工	通気工(風管・扇風機を用いる方式)
			処分孔建設	処分孔掘削
		処分孔安定性確保	吹付けコンクリート、補強リング	
		処分孔湧水対策	鋼製ライナー	
C	操業段階	ガラス固化体の製造から輸送	ガラス固化体の製造	ガラス固化体の製造(LFCM法※2)
			ガラス固化体の貯蔵管理	ガラス固化体の貯蔵管理(間接空冷方式)
			ガラス固化体の輸送	輸送(海上輸送・陸上輸送による方式)
		炭素鋼の製造からガラス固化体のオーバーバックへの封入	製鉄	製鉄(製銹、製鋼による方式)
			オーバーバックの製作	鍛造によるオーバーバックの製作
			廃棄体封入	ガラス固化体の受け入れ(輸送容器による方式)、廃棄体封入(溶接によるオーバーバックへの封入の方式)
		ベントナイト原鉱の採取・加工	ベントナイト原鉱の採取	ベントナイト原鉱の採取(露天掘り・坑内掘り方式)
			ベントナイト原鉱の加工	ベントナイト原鉱の加工(乾燥や粉碎による方式)
		ベントナイト材料の製作	緩衝材の製作	ケイ砂混合材料の製作(練り混ぜ方式)、緩衝材ブロックの製作(加圧方式)、PEM※3の製作(鋼製セルの方式)
			埋め戻し材の製作	埋め戻し材の製作(練り混ぜ方式)
			粘土プラグ材料の製作	ケイ砂混合材料の製作(練り混ぜ方式)、粘土ブロックの製作(加圧方式)
		地下施設への搬送	オーバーバックの地下施設への搬送	オーバーバックの地下施設への搬送(輸送装置を用いた方式)
			緩衝材ブロックの地下施設への搬送	緩衝材ブロックの地下施設への搬送(輸送装置を用いた方式)
		定置	オーバーバックと緩衝材の定置	緩衝材ブロック方式、原位置施工方式、ベレット方式、吹付け方式、PEM※3方式
			処分孔上部キャップの設置	処分孔上部キャップ※4の設置(コンクリートキャップを用いた方式)
		坑道埋め戻し	埋め戻し材の締固め	締固め・横締固め方式
粘土プラグの設置	粘土プラグの設置(粘土ブロック方式)			
カ学プラグの設置	カ学プラグ※5の設置(コンクリートプラグ方式)			
D	閉鎖段階	坑道埋め戻し	水平坑道埋め戻し	締固め・横締固め方式
			斜坑埋め戻し	締固め・横締固め方式
			立坑埋め戻し	締固め・横締固め方式
			ボーリング孔埋め戻し	ボーリング孔埋め戻し(粘土材を用いた方式)
			粘土プラグ設置	粘土プラグ設置(粘土ブロック方式)
			カ学プラグ設置	カ学プラグ設置(コンクリートプラグ方式)

※1) TBM：トンネルボーリングマシン。カッターヘッドを回転させながら岩盤に押しつけて掘削を行う円形的全断面トンネル掘削機で、これを用いた工法をTBM工法という。

※2) LFCM法：ガラス固化体の製造プロセスはJNFLとJAEAのLFCM法とフランスAREVA NG社のAVM法がある。LFCM法は高レベル放射性廃液とガラス材料を同時にセラミック製溶融炉に投入し、溶融炉で溶融して高レベルガラス固化体とする方式である。一方AVM法は、高レベル放射性廃液をか焼した後、か焼物とガラス材料を金属製溶融炉に投入し、溶融炉で溶解して高レベルガラス固化体とする方式である。

※3) PEM：地上施設であらかじめ緩衝材と廃棄体を鋼製セル内に格納し、地下施設へ鋼製セルを搬送・定置する方式。

※4) 処分孔上部キャップ：処分孔の上部に設置するコンクリート製のキャップ。処分場の閉鎖前に地下水が緩衝材や埋め戻し材に浸潤し、閉鎖の完了していない空間側へ膨潤することが考えられる。この対策として強度を持たせたコンクリート製のキャップを設置し、アンカーで固定する。

※5) カ学プラグ：坑道等に設置するコンクリート製の構造物。処分場の閉鎖前に地下水が緩衝材や埋め戻し材に浸潤し、閉鎖の完了していない空間側へ膨潤することが考えられる。この対策として強度を持たせたコンクリート製のプラグを設置する。

JAEA-Data/Code 2014-026 では、表 2-1 に示したそれぞれの工学技術に対して、工学技術を適用した場合に起こりうる事故・人的要因および逸脱事象を特定した。さらに、人工バリアの変遷に関するシーケンスの情報⁽⁶⁾をもとに、逸脱事象が発生した場合の THMC の変化、さらに安全機能の喪失・低下につながる影響の連鎖を作成した。事故・人的要因および逸脱事象の整理の結果を、Appendix- I に示す。これらの詳細、および、本文中に示す事故・人的要因の整理番号については、Appendix- II を参照されたい。

本稿では、事故・人的要因および逸脱事象に対する発生防止対策、検知手段、および、逸脱事象が発生した後の影響低減対策となる工学技術について文献調査を行い、工学的対策としての適用性等の検討を行った。ここで、表 2-1 に示した地層処分事業で採用される可能性のある工学技術が工学的対策としても役立つと考えられる場合には、それも工学的対策として示すこととした。調査対象とした文献は、NUMO-TR-11-01⁽¹⁾、NUMO-TR-04-01⁽⁴⁾、JNC-TN1400 99-022⁽⁷⁾、原子力環境整備促進・資金管理センターの「処分システム工学要素技術高度化開発報告書」^{(8) (9)}、土木学会の「トンネル標準示方書」⁽⁶⁾、および、それらの引用文献である。

3. 工学的対策の検討結果

JAEA-Data/Code 2014-026 で整理した事故・人的要因および逸脱事象に対する工学的対策として、発生防止対策、検知の手段、影響防止対策について文献調査を行った結果を、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材および母岩（掘削影響領域を含む）に区分して以下に示す。

(1) ガラス固化体

ガラス固化体に対する逸脱事象は、以下の5種類である。

- (a) イエローフェーズガラス固化体の発生
- (b) 核種の混合が不均質なガラス固化体の発生
- (c) ガラス固化体のひび割れ・破壊
- (d) 火災発生に伴うガラス固化体の亀裂の発生
- (e) 火災発生に伴うガラス固化体の変質

これら5種類の逸脱事象に対して、発生防止対策について整理した結果を表3-1の第3欄に、検知の手段について整理した結果を表3-1の第4欄に示す。

なお、ガラス固化体の5つの逸脱事象発生後のTHMCとそれに続く安全機能の喪失・低下に対する影響低減対策については、現状では特に報告されていない。

表 3-1 工学的対策などの技術情報の調査結果（ガラス固化体）(1/2)

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
イエローフェーズガラス固化体の発生	ガラス固化体製造時の廃液調整作業の事故・人的要因 (C1)	適切なガラス固化体の製造 (注入状況管理) ⁽¹⁰⁾	【逸脱事象検知】注入状況の管理記録 ⁽¹⁰⁾
核種の混合が不均質なガラス固化体の発生	ガラス固化体製造時の廃液混合作業の事故・人的要因 (C3)	適切なガラス固化体の製造 (溶融ガラス温度・保持時間、注入状況、冷却、貯蔵中の管理) ⁽¹⁰⁾	【逸脱事象検知】溶融ガラス温度・保持時間、注入状況、ガラス固化体冷却・貯蔵中の管理記録 ⁽¹⁰⁾
ガラス固化体のひび割れ・破壊	ガラス固化体の地上での転倒・落下を生じる事故・人的要因 (製造時 (C2)、貯蔵時 (C4)、海上・陸上輸送時 (C5-1)、処分施設への受け入れ時 (C8)、オーバーパックへの収納時 (C9)、PEM 容器への収納時 (C19))	インターロック設置、転倒防止機能、脱輪防止機能、多重化措置 (吊りワイヤの二重化など) ⁽¹⁾	【逸脱事象検知】外観検査によってキャニスタ表面に破損・欠損がないことを、閉じ込め検査によってキャニスタ溶接部の健全性を評価することができる ⁽¹⁰⁾ 、しかし、ひび割れ増加を直接的に測定できない。
	ガラス固化体の地下施設での転倒・落下を生じる事故・人的要因： ・オーバーパック定置時 (緩衝材ブロック方式 (C25-1)、原位置施工方式 (C29-1)、ペレット方式 (C35-1)、吹き付け方式 (C39-1)) ・地下施設への搬送時 (C22-1)		
	オーバーパックの地下施設への搬送時の事故・人的要因 (C22-6)	車両の自動速度制御装置、水平区間・衝突時衝撃緩和区間の設置 ⁽¹⁾	

表 3-1 工学的対策などの技術情報の調査結果（ガラス固化体）（2/2）

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
火災発生に伴うガラス固化体の亀裂の発生	火災を生じる事故・人的要因： ・海上・陸上輸送時（C5-2） ・オーバーパック定置時（緩衝材ブロック方式（C25-2）、原位置施工方式（C29-2）、ペレット方式（C35-2）、吹き付け方式（C39-2）） ・地下施設への搬送時（C22-2）	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	【逸脱事象検知】外観検査によってキャニスタ表面に破損・欠損がないことを、閉じ込め検査によってキャニスタ溶接部の健全性を評価することができる ⁽¹⁰⁾ 、しかし、ひび割れ増加を直接的に測定できない。
火災発生に伴うガラス固化体の変質	火災を生じる事故・人的要因： ・海上・陸上輸送時（C5-3） ・オーバーパック定置時（緩衝材ブロック方式（C25-3）、原位置施工方式（C29-3）、ペレット方式（C35-3）、吹き付け方式（C39-3）） ・地下施設への搬送時（C22-3）	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	特になし

（2）オーバーパック

オーバーパックに対する逸脱事象は、以下の6種類である。

- （a）炭素鋼の延性不足
- （b）オーバーパック溶接部への過大な残留応力の発生
- （c）オーバーパック溶接部へのキズ形成
- （d）オーバーパック表面へのキズ形成
- （e）火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成
- （f）火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解

これら6種類の逸脱事象に対して、発生防止対策について整理した結果を表3-2の第3欄に、検知の手段について整理した結果を表3-2の第4欄に示す。

なお、オーバーパックの6つの逸脱事象発生後のTHMCとそれに続く安全機能の喪失・低下に対する影響低減対策については、現状では特に報告されていない。

表 3-2 工学的対策などの技術情報の調査結果（オーバーパック）（1/2）

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
炭素鋼の延性不足	炭素鋼製造時の品質管理作業の事故・人的要因（C6）	特になし	【要因検知】化学成分分析、引張試験 ⁽¹¹⁾ 、 ⁽¹²⁾
オーバーパック溶接部への過大な残留応力の発生	オーバーパック蓋の溶接作業の事故・人的要因（C10-1）	オーバーパック残留応力除去を目的とした外面誘導加熱応力改善法、表面応力改善法 ⁽⁸⁾	【逸脱事象検知】残留応力計測 ⁽¹³⁾
オーバーパック溶接部へのキズ形成	オーバーパック蓋の溶接作業の事故・人的要因（C10-2）	適切な溶接条件の適用 ⁽⁸⁾	【逸脱事象検知】外観検査、超音波探傷試験 ⁽⁸⁾
オーバーパック表面へのキズ形成	オーバーパックの旋盤加工作業の事故・人的要因（C7）	適切な旋盤加工 ⁽⁸⁾	【逸脱事象検知】外観検査、超音波探傷試験 ⁽⁸⁾
	PEM容器への廃棄体収納時の事故・人的要因（C18）	インターロック設定、転倒防止機能、脱輪防止機能、多重化措置（吊りワイヤーの二重化など） ⁽¹⁾	

表 3-2 工学的対策などの技術情報の調査結果（オーバーパック）（2/2）

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
オーバーパック表面へのキズ形成	地下施設への搬送時の事故・人的要因（C21-1） 廃棄体定置作業時の事故・人的要因（緩衝材ブロック方式（C24-1）、原位置施工方式（C28-1）、ペレット方式（C34-1）、吹き付け方式（C38-1））	インターロック設定、転倒防止機能、脱輪防止機能、多重化措置（吊りワイヤーの二重化など） ⁽¹⁾	【逸脱事象検知】外観検査、超音波探傷試験 ⁽⁸⁾
火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成	火災を生じる事故・人的要因： ・地下施設への搬送時の事故・人的要因（C21-2） ・廃棄体定置作業時の事故・人的要因（緩衝材ブロック方式（C24-2）、原位置施工方式（C28-2）、ペレット方式（C34-2）、吹き付け方式（C38-2））	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	【逸脱事象検知】外観検査、超音波探傷試験 ⁽⁸⁾
火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解	火災を生じる事故・人的要因： ・地下施設への搬送時の事故・人的要因（C21-3） ・廃棄体定置作業時の事故・人的要因（緩衝材ブロック方式（C24-3）、原位置施工方式（C28-3）、ペレット方式（C34-3）、吹き付け方式（C38-3））	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	特になし

（3）緩衝材

緩衝材に対する逸脱事象は、以下の 13 種類である。

- (a) 緩衝材のスメクタイト含有量の不足
- (b) 緩衝材の粒度分布不良
- (c) 緩衝材ブロックのひび割れ・剥離
- (d) 緩衝材の初期含水比不良
- (e) 緩衝材の原位置締固め時の締固め不足
- (f) 緩衝材の不均質な施工
- (g) 掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出
- (h) 掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出
- (i) 水量低減不良に伴う緩衝材の流出
- (j) 処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出
- (k) 力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出
- (l) 火災発生に伴う緩衝材の亀裂の発生
- (m) 火災発生に伴う緩衝材の変質

ここで、(g) 掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出は、処分孔周辺を対象としたものである。

これら 13 種類の逸脱事象に対して、発生防止対策について整理した結果を表 3-3 の第 3 欄に、検知の手段について整理した結果を表 3-3 の第 4 欄に示す。

なお、緩衝材の 13 種類の逸脱事象発生後の THMC とそれに続く安全機能の喪失・低下に対する影響低減対策については、現状では特に報告されていない。

表 3-3 工学的対策などの技術情報の調査結果（緩衝材）（1/3）

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
緩衝材のスメクタイト含有量の不足	ベントナイト原鉱採取・加工時の材料仕分け作業の事故・人的要因 (C11-1,C12-1)	ベントナイト原鉱の品質管理 ⁽⁷⁾	【逸脱事象検知】陽イオン交換容量 (CEC)、メチレンブルー吸着量試験 ⁽⁷⁾
緩衝材の粒度分布不良	ベントナイト原鉱加工時の乾燥・粉碎・包装作業の事故・人的要因 (C13-1)	適切な材料品質管理 ⁽⁷⁾	【逸脱事象検知】粒度試験 ⁽⁷⁾
	ケイ砂混合材料製作時の粒度調整作業の事故・人的要因 (C15)	適切な混合量管理 ⁽⁷⁾	
緩衝材ブロックのひび割れ・剥離	緩衝材ブロックの落下・転倒を生じる事故・人的要因 ((搬送作業 (C23-1)、定置作業 (C26-1)) 底部緩衝材ブロック上への廃棄体定置作業の事故・人的要因 (C36,C40))	インターロック設定、転倒防止機能、脱輪防止機能、多重化措置 (吊りワイヤーの二重化など)、真空吸引把持技術 (緩衝材ブロックを真空吸引ポンプで把持する技術) ⁽¹⁾	【逸脱事象検知】外観検査 ⁽⁷⁾
	緩衝材ブロック製作時の圧縮力管理作業の事故・人的要因 (C16)	ミキサーの回転数、プレス機による圧縮保持時間の管理 ⁽⁷⁾	【逸脱事象検知】外観検査、寸法測定、重量測定 ⁽⁷⁾
	PEM 製作時の緩衝材ブロック設置作業の事故・人的要因 (C17)	ペレット、スラリーによる隙間の充填 ⁽⁸⁾	特になし
	防水シート設置作業の事故・人的要因 (緩衝材への適水) (B16)	適切な導水処理、防水シート破損防止策など ⁽⁵⁾ 無孔 PEM 容器による緩衝材保護、緩衝材製造時に密度と含水比を調整し緩衝材自体の機能を高度化 ⁽⁸⁾	【逸脱事象検知】外観検査、寸法測定、重量測定 ⁽⁷⁾
	通気工設置作業や運転管理作業の事故・人的要因 (坑道内の湿度上昇) (B28)	適切な運転管理、緩衝材を外気に触れないようにする ⁽¹⁾ 。しかし、基本的には建設技術により、湿度をコントロールすることは難しい。緩衝材の品質に影響を与えないように、施設内の湿度調整や製造時に含水比を調整する ⁽⁸⁾ 。	
	緩衝材の初期含水比不良	防水シート設置作業の事故・人的要因 (緩衝材の浸潤) (B17)	適切な導水処理、防水シート破損防止策など ⁽⁵⁾ 無孔 PEM 容器による緩衝材保護、緩衝材製造時に密度と含水比を調整し緩衝材自体の機能を高度化 ⁽⁸⁾
緩衝材の初期含水比不良	通気工設置作業や運転管理作業の事故・人的要因 (坑道内の湿度上昇) (B29)	適切な運転管理、緩衝材を外気に触れないようにする ⁽¹⁾ 。しかし、基本的には建設技術により、湿度をコントロールすることは難しい。緩衝材の品質に影響を与えないように、施設内の湿度調整や製造時に含水比を調整する ⁽⁸⁾ 。	【要因検知】湿度測定 ⁽⁷⁾
	水抜きボーリング作業の事故・人的要因 (排水不良による緩衝材の浸潤) (B19)	適切な排水工の設置 ⁽⁵⁾ 無孔 PEM 容器による緩衝材保護、緩衝材製造時に密度と含水比を調整し緩衝材自体の機能を高度化 ⁽⁸⁾	特になし

表 3-3 工学的対策などの技術情報の調査結果（緩衝材）（2/3）

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
緩衝材の初期含水比不良	グラウト作業の事故・人的要因（緩衝材の浸潤）（B22）	グラウト材料の微粒子化、動的注入工法の適用 ⁽¹⁴⁾ 無孔 PEM 容器による緩衝材保護、緩衝材製造時に密度と含水比を調整し緩衝材自体の機能を高度化 ⁽⁸⁾	特になし
	処分孔鋼製ライナー設置作業の事故・人的要因（ライナーの水密性喪失）（B37）	無孔 PEM 容器による緩衝材保護、緩衝材製造時に密度と含水比を調整し緩衝材自体の機能を高度化 ⁽⁸⁾	特になし
	処分孔／坑道内のポンプ排水作業の事故・人的要因（湧水量低減不良）（C33）	フィルターにより異物のポンプへの流入を防止 無孔 PEM 容器による緩衝材保護、緩衝材製造時に密度と含水比を調整し緩衝材自体の機能を高度化 ⁽⁸⁾	【要因検知】外観検査 ⁽⁷⁾
	ケイ砂混合材料製作時の含水比調整作業の事故・人的要因（C14）	適切な品質管理、適切な養生時間の確保 ⁽⁷⁾	【逸脱事象検知】含水比測定 ⁽⁷⁾
緩衝材の原位置締固め時の締固め不足	緩衝材の締固め作業時の事故・人的要因（C32）	適切な材料品質管理（締固めエネルギー、巻きだし厚さなど） ⁽⁷⁾	特になし
緩衝材の不均質な施工	緩衝材吹付け作業の事故・人的要因（C41-1）	特になし	特になし
掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出	処分孔掘削作業の事故・人的要因（過剰な衝撃力）（B30-2,B32-2）	特になし	【要因検知】弾性波探査 ⁽⁵⁾
	処分孔安定確保のための吹付けコンクリート作業の事故・人的要因（支保効果不良）（B34-2）	適切な現場配合、吹き付け作業 ⁽⁵⁾	
	処分孔安定確保のための補強リング施工作業の事故・人的要因（支保効果不良）（B36-2）	特になし	
掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出	処分孔掘削作業の事故・人的要因（B31,B33） 処分孔安定確保のための吹付けコンクリート作業の事故・人的要因（B35）	ペレットを用いた隙間充填 ⁽¹⁾	【要因検知】処分孔のレーダー計測 ⁽¹⁾
	緩衝材定置作業時の孔底／坑底の清掃および不陸の処理作業の事故・人的要因（ブロック方式（C27）、原位置施工方式（C30））		
	ペレット状緩衝材の隙間充填作業の事故・人的要因（C37-1）	ペレット注入時の適切な注入圧の設定 ⁽¹⁵⁾	特になし
	PEM の定置作業の事故・人的要因（C42）	処分坑道の拡幅 ⁽¹⁾	
水量低減不良に伴う緩衝材の流出	水抜きボーリング作業の事故・人的要因（排水不良）（B20）	適切な排水工の設置 ⁽⁵⁾	特になし
	グラウト作業の事故・人的要因（湧水量低減効果不良）（B23）	グラウト材料の微粒子化、動的注入工法の適用 ⁽⁸⁾	
	処分孔鋼製ライナーの設置作業の事故・人的要因（ライナーの水密性喪失）（B38）	特になし	

表 3-3 工学的対策などの技術情報の調査結果（緩衝材）（3/3）

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出	処分孔上部キャップ施工作業の事故・人的要因（C43）	強度・耐久性に対しては、適切なコンクリートの配合、打ち込み、締固め、養生など。定着力に対しては、適切な穿孔、くり粉の排出など ⁽⁵⁾	特になし
力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出	力学プラグ施工作業の事故・人的要因（C52-1）	強度・耐久性に対しては、適切なコンクリートの配合、打ち込み、締固め、養生など ⁽⁵⁾	特になし
火災発生に伴う緩衝材の亀裂の発生	火災を生じる事故・人的要因： ・緩衝材ブロックの輸送作業（C23-2） ・緩衝材定置作業（ブロック方式（C26-2）、原位置施工方式（C31-2）、ペレット方式（C37-2）、吹付け方式（C41-2））	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	特になし
火災発生に伴う緩衝材の変質	火災を生じる事故・人的要因： ・緩衝材ブロックの輸送作業（C23-3） ・緩衝材定置作業（ブロック方式（C26-3）、原位置施工方式（C31-3）、ペレット方式（C37-3）、吹付け方式（C41-3））	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	特になし

（4）粘土プラグ

粘土プラグに対する逸脱事象は、以下の 9 種類である。

- （a）粘土プラグのスメクタイト含有量の不足
- （b）粘土プラグの粒度分布不良
- （c）粘土プラグのひび割れ・剥離
- （d）粘土プラグの初期含水比不良
- （e）水量低減不良に伴う粘土プラグの流出
- （f）掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出
- （g）掘削ズリと空洞の残存による粘土プラグの流出
- （h）火災発生に伴う粘土プラグの亀裂の発生
- （i）火災発生に伴う粘土プラグの変質

ここで、（f）掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出は、粘土プラグ周辺における流出を対象としたものである。

これら 9 種類の逸脱事象に対して、発生防止対策について整理した結果を表 3-4 の第 3 欄に、検知の手段について整理した結果を表 3-4 の第 4 欄に示す。

なお、粘土プラグの 9 種類の逸脱事象発生後の THMC とそれに続く安全機能の喪失・低下に対する影響低減対策については、現状では特に報告されていない。

表 3-4 工学的対策などの技術情報の調査結果（粘土プラグ）

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
粘土プラグのスメクタイト含有量の不足	ベントナイト原鉱採取・加工時の材料仕分け作業の事故・人的要因 (C11-2,C12-2)	ベントナイト原鉱の品質管理 ⁽⁷⁾	【逸脱事象検知】陽イオン交換容量 (CEC)、メチレンブルー吸着量試験 ⁽⁷⁾
粘土プラグの粒度分布不良	ベントナイト原鉱加工時の乾燥・粉碎・包装作業の事故・人的要因 (C13-2)	適切な材料品質管理 ⁽⁷⁾	【逸脱事象検知】粒度試験 ⁽⁷⁾
	ケイ砂混合材料製作時の粒度調整作業の事故・人的要因 (C20-4)	適切な混合量管理 ⁽⁷⁾	
粘土プラグのひび割れ・剥離	粘土ブロック定置作業の事故・人的要因 (粘土ブロックの転倒・落下) (C47-1,D7-1)	インターロック設定、転倒防止機能、脱輪防止機能、多重化措置 (吊りワイヤーの二重化など) ⁽¹⁾	【逸脱事象検知】外観検査 ⁽⁷⁾
	粘土ブロック製作時の圧縮力管理作業の事故・人的要因 (C20-5)	特になし	
粘土プラグの初期含水比不良	切り欠き部湧水処理作業の事故・人的要因 (C48,D8)	ポンプ排水、止水グラウト ⁽⁵⁾	特になし
	ケイ砂混合材料製作時の含水比調整作業の事故・人的要因 (C20-3)	適切な品質管理、適切な養生時間の確保 ⁽⁷⁾	
水量低減不良に伴う粘土プラグの流出	粘土プラグ部での粘土グラウト施工作業の事故・人的要因 (湧水量低減不良) (C46,D6)	適切な注入材料の配合、注入圧力管理 ⁽⁵⁾	【要因検知】弾性波探査 ⁽⁵⁾
掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出	粘土プラグ設置時の切り欠き部掘削作業の事故・人的要因 (過剰な衝撃力) (C45-2,D5-2)	特になし	【要因検知】弾性波探査 ⁽⁵⁾
掘削ズリと空洞の残存による粘土プラグの流出	粘土プラグ設置面の清掃・不陸の処理作業の事故・人的要因 (C49,D9)	ペレットを用いた隙間充填 ⁽¹⁾	特になし
火災発生に伴う粘土プラグの亀裂の発生	火災を生じる事故・人的要因：粘土ブロック定置作業時の燃料漏れによる火災の発生 (C47-2, D7-2)	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	特になし
火災発生に伴う粘土プラグの変質	火災を生じる事故・人的要因：粘土ブロック定置作業時の燃料漏れによる火災の発生 (C47-3, D7-3)	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	特になし

(5) 埋め戻し材

埋め戻し材の逸脱事象は、以下の9種類である。

- (a) 埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足
- (b) 埋め戻し材の粒度分布不良
- (c) 埋め戻し材の初期含水比不良
- (d) 埋め戻し材の転圧不足
- (e) 掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出
- (f) 掘削ズリと空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出
- (g) 力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出
- (h) 火災発生に伴う埋め戻し材の亀裂の発生
- (i) 火災発生に伴う埋め戻し材の変質

ここで、(e) 掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出は、坑道周辺における流出を対象としたものである。

これら 9 種類の逸脱事象に対して、発生防止対策について整理した結果を表 3-5 の第 3 欄に、検知の手段について整理した結果を表 3-5 の第 4 欄に示す。

なお、埋め戻し材の 9 種類の逸脱事象発生後の THMC とそれに続く安全機能の喪失・低下に対する影響低減対策については、現状では特に報告されていない。

表 3-5 工学的対策などの技術情報の調査結果 (埋め戻し材) (1/2)

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足	ベントナイト原鉱採取・加工時の材料仕分け作業の事故・人的要因 (C11-3,C12-3)	ベントナイト原鉱の品質管理 ⁽⁷⁾	【逸脱事象検知】陽イオン交換容量 (CEC)、メチレンブルー吸着量試験 ⁽⁷⁾
埋め戻し材の粒度分布不良	ベントナイト原鉱加工時の乾燥・粉碎・包装作業の事故・人的要因 (C13-3)	適切な材料品質管理 ⁽⁷⁾	【逸脱事象検知】粒度試験 ⁽⁷⁾
	ケイ砂混合材料製作時の粒度調整作業の事故・人的要因 (C20-2)	適切な混合量管理 ⁽⁷⁾	
埋め戻し材の初期含水比不良	埋め戻し材製作作業の事故・人的要因 (C20-1)	適切な品質管理、適切な養生時間の確保 ⁽⁷⁾	【逸脱事象検知】含水比測定 ⁽⁷⁾
埋め戻し材の転圧不足	処分坑道、水平坑道、斜坑、立坑の埋め戻し作業の事故・人的要因 (C44-1,D1-1,D2-1,D3-1)	適切な材料品質管理 (締固めエネルギー、巻きだし厚さなど) ⁽⁷⁾	特になし
掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	坑道発破掘削作業時の事故・人的要因 (過大な衝撃力) (B1-2)	適切な爆薬使用量の管理 ⁽⁵⁾	【要因検知】弾性波探査 ⁽⁵⁾
	坑道機械掘削時の事故・人的要因 (過大な衝撃力) (B3-2)	適切な掘削作業 ⁽⁵⁾	
	排水管の設置作業の事故・人的要因 (排水不良による路盤の劣化) (B18-2)	路盤の養生 ⁽⁵⁾	
	坑道掘削時のズリ運搬作業の事故・人的要因 (路盤の劣化) (B7-2)		
掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	TBM による坑道掘削時の支保工設置作業の事故・人的要因 (支保効果不良) (B5-2)	適切な支保工設置作業 ⁽⁵⁾	【要因検知】弾性波探査 ⁽⁵⁾
	吹付けコンクリート、鏡吹付けコンクリート作業の事故・人的要因 (コンクリートの品質低下、付着性低下、支保部材への応力伝達不良による支保効果発現不良) (B9-2,B27-2)	適切な現場配合、吹き付け作業 ⁽⁵⁾	
	鋼製支保工建て込み作業の事故・人的要因 (地山と支保の一体化不良による支保効果発現不良) (B12-2)	速やかな支保工の建て込み、支保工の連結など ⁽⁵⁾	
	インバートコンクリート作業の事故・人的要因 (コンクリートの現場配合、運搬、打ち込み、締固め、養生の不備による支保効果発現不良) (B15-2)	適切なコンクリート現場配合作業 ⁽⁵⁾	
	ロックボルト作業、先受け作業の事故・人的要因 (穿孔作業の孔荒れ、くり粉の残留などによる定着力不足) (B10-2,B25-2)	適切な穿孔作業、孔の清掃など ⁽⁵⁾	
	水抜きボーリング作業の事故・人的要因 (排水不良による過剰な地下水圧の母岩への作用) (B21-2)	特になし	

表 3-5 工学的対策などの技術情報の調査結果（埋め戻し材）（2/2）

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	グラウト作業の事故・人的要因（地山安定化効果不良）（B24-2）	適切な注入材料の配合、注入圧力管理 ⁽⁵⁾	
	力学プラグ設置時の切り欠き部掘削作業の事故・人的要因（C50-2,D10-2）	適切な掘削作業 ⁽⁵⁾	
掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	坑道発破掘削作業時の事故・人的要因（過剰な衝撃力による不陸の拡大）（B2）	適切な爆薬使用量の管理、充填材の注入 ⁽⁵⁾	【要因検知】地中レーダー探査 ⁽¹⁶⁾
	坑道機械掘削時の事故・人的要因（過剰な衝撃力による不陸の拡大）（B4）	適切な掘削作業、充填材の注入 ⁽⁵⁾	
	TBM による坑道掘削時の支保工設置作業の事故・人的要因（支保効果不良による掘削断面形状の不陸拡大）（B6）	適切な支保工設置作業、充填材の注入 ⁽⁵⁾	
	ロックボルト作業時の事故・人的要因（過剰な衝撃力による不陸の拡大）（B11）	適切なロックボルト設置作業、充填材の注入 ⁽⁵⁾	
	先受け作業時の穿孔作業の事故・人的要因（過剰な衝撃力による不陸の拡大）（B26）	適切な先受け工設置作業、充填材の注入 ⁽⁵⁾	
	覆工コンクリート施工作業の事故・人的要因（コンクリートの未充填部の発生）（B13）	適切なコンクリート現場配合作業、充填材の注入 ⁽⁵⁾	
	坑道掘削時のズリ運搬作業時の事故・人的要因（路盤の荒れ）（B8）	特になし	
	インバートコンクリート施工作業時の事故・人的要因（打ち込み箇所の清掃・排水作業の不備）（B14）	特になし	
	力学プラグ設置面の清掃・不陸処理作業の事故・人的要因（C51,D11）	特になし	
力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出	力学プラグ施工作業の事故・人的要因（C52-2,D12）	強度・耐久性に対しては、適切なコンクリートの配合、打ち込み、締固め、養生など ⁽⁵⁾	特になし
	坑口処理のための力学プラグ施工作業の事故・人的要因（D13）		
火災発生に伴う埋め戻し材の亀裂の発生	火災を生じる事故・人的要因： ・処分坑道（C44-2）、水平坑道（D1-2）、斜坑（D2-2）、立坑（D3-2）の埋め戻し作業時	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	特になし
火災発生に伴う埋め戻し材の変質	火災を生じる事故・人的要因： ・処分坑道（C44-3）、水平坑道（D1-3）、斜坑（D2-3）、立坑（D3-3）の埋め戻し作業時	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	特になし

（6）母岩（掘削影響領域を含む）

母岩（掘削影響領域を含む）に対する逸脱事象は、以下の7種類である。

- （a）ボーリング孔自体の選択的な流路形成
- （b）ボーリング孔周辺母岩の選択的な流路形成
- （c）処分孔周辺の掘削影響領域の拡大
- （d）粘土プラグ周辺の掘削影響領域の拡大
- （e）坑道周辺の掘削影響領域の拡大
- （f）火災発生に伴う母岩の亀裂の発生
- （g）火災発生に伴う母岩の変質

これら 7 種類の逸脱事象に対して、発生防止対策について整理した結果を表 3-6 の第 3 欄に、検知の手段について整理した結果を表 3-6 の第 4 欄に示す。

なお、母岩の 7 種類の逸脱事象発生後の THMC とそれに続く安全機能の喪失・低下に対する影響低減対策については、現状では特に報告されていない。

表 3-6 工学的対策などの技術情報の調査結果（母岩（掘削影響領域を含む））（1/2）

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
ボーリング孔自体の選択的な流路形成	ボーリング孔閉塞作業の事故・人的要因 (A1,D4)	特になし	特になし
ボーリング孔周辺母岩の選択的な流路形成	孔内透水試験時の注入圧管理作業の事故人的要因 (A2)	特になし	特になし
処分孔周辺の掘削影響領域の拡大	処分孔掘削作業（ダウンザホールハンマー方式、ロータリー掘削方式）による処分孔掘削作業の事故・人的要因（過剰な衝撃力）(B30-1,B32-1)	特になし	【逸脱検知】弾性波探査 ⁽⁵⁾
	処分孔安定確保のための吹付けコンクリート作業の事故・人的要因（支保効果不良）(B34-1)	適切な現場配合、吹き付け作業 ⁽⁵⁾	
	処分孔安定確保のための補強リング作業の事故・人的要因（支保効果不良）(B36-1)	特になし	
粘土プラグ周辺の掘削影響領域の拡大	粘土プラグ設置時の切り欠き部掘削作業の事故・人的要因（過剰な衝撃力）(C45-1,D5-1)	特になし	【逸脱検知】弾性波探査 ⁽⁵⁾
坑道周辺の掘削影響領域の拡大	坑道発破掘削作業の事故・人的要因（過大な衝撃力）(B1-1)	適切な爆薬使用量などの管理 ⁽⁵⁾	【逸脱検知】弾性波探査 ⁽⁵⁾
	坑道機械掘削作業の事故・人的要因（過大な衝撃力）(B3-1)	適切な掘削作業 ⁽⁵⁾	
	排水管設置作業時の事故・人的要因（排水不良による路盤の劣化）(B18-1)	路盤の養生 ⁽⁵⁾	
	坑道掘削時のズリ運搬作業の事故・人的要因（路盤の劣化）(B7-1)		
	TBM による坑道掘削時の支保工設置作業の事故・人的要因（支保効果不良）(B5-1)	適切な支保工設置作業 ⁽⁵⁾	
	吹付けコンクリート、鏡吹付けコンクリート作業時の事故・人的要因（コンクリートの品質低下、付着成低下、支保部材への応力伝達不良による支保効果発現不良）(B9-1,B27-1)	適切な現場配合、吹き付け作業 ⁽⁵⁾	
	鋼製支保工建て込み作業の事故・人的要因（地山と支保の一体化不良による支保効果発現不良）(B12-1)	速やかな支保工の建て込み、支保工の連結など ⁽⁵⁾	
	インバートコンクリート作業の事故・人的要因（コンクリートの現場配合、運搬、打ち込み、締固め、養生の不備による支保効果発現不良）(B15-1)	適切なコンクリート現場配合作業 ⁽⁵⁾	
	ロックボルト作業、先受け工作業の事故・人的要因（穿孔作業の孔荒れ、くり粉の残留などによる定着力不足）(B10-1,B25-1)	適切な穿孔作業、孔の清掃など ⁽⁵⁾	
	水抜きボーリング作業の事故・人的要因（排水不良による過剰な地下水圧の母岩への作用）(B21-1)	特になし	
	グラウト作業の事故・人的要因（地山安定化効果不良）(B24-1)	適切な注入材料の配合、注入圧力管理 ⁽⁵⁾	
	力学プラグ設置時の切り欠き部掘削作業の事故・人的要因 (C50-1, D10-1)	適切な掘削作業 ⁽⁵⁾	

表 3-6 工学的対策などの技術情報の調査結果（母岩（掘削影響領域を含む））（2/2）

逸脱事象	事故・人的要因	発生防止対策	検知の手段
火災発生に伴う母岩の亀裂の発生	火災を生じる事故・人的要因： <ul style="list-style-type: none"> ・オーバーパックの地下施設への搬送時の衝突事故、燃料漏れ（C22-4） ・緩衝材ブロックの地下施設への搬送時の衝突事故、燃料漏れ（C23-4） ・オーバーパック定置作業時の燃料漏れ（緩衝材ブロック方式（C24-4）、原位置施工方式（C28-4）、ペレット方式（C34-4）、吹付け方式（C38-4）） 	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	【逸脱検知】弾性波探査 ⁽⁵⁾
火災発生に伴う母岩の変質	火災を生じる事故・人的要因： <ul style="list-style-type: none"> ・オーバーパックの地下施設への搬送時の衝突事故、燃料漏れ（C22-5） ・緩衝材ブロックの地下施設への搬送時の衝突事故、燃料漏れ（C23-5） ・オーバーパック定置作業時の燃料漏れ（緩衝材ブロック方式（C24-5）、原位置施工方式（C28-5）、ペレット方式（C34-5）、吹付け方式（C38-5）） 	不燃性・難燃性材料の使用、着火源の排除、必要に応じて可燃性ガス対策、異常な温度上昇の防止対策 ⁽¹⁾	特になし

4. 規制側が着目すべき逸脱事象の検討

前章では、事故・人的要因と逸脱事象に対する発生防止対策や検知の手段、逸脱事象が発生した場合の影響低減のための工学的対策の適用実績や開発状況などの情報を整理した。本章では、整理した現状の工学的対策の情報に基づき、主に発生防止対策としての有効性について検討するとともに、発生防止対策としての有効性が未熟であるものに対する今後の検討課題を整理した。それらの検討結果を踏まえ、規制側が着目すべき逸脱事象を抽出した。具体的には、逸脱事象に対する発生防止対策に何らかの課題が残されていると判断される場合、つまり、以下の要件を満たしていない場合に、着目すべき逸脱事象として抽出した。

- 実施主体等が進めている研究開発において、発生防止対策の有効性が確認されている。
- 他産業においてすでに一定品質の製品の供給がなされており、かつ、発生防止対策の有効性が確認されている。

処分場の構成要素ごとに規制側として着目すべき逸脱事象を検討した結果を、工学的対策に対する理解の現状および規制側が着目すべき項目とともに、以下に示す。

(1) ガラス固化体

ガラス固化体の逸脱事象に対する検討結果を、以下に示す（表 4-1）。

① イエローフェーズガラス固化体の発生

ガラス固化体製造時の廃液調整作業の事故・人的要因により、ガラス流下運転時にイエローフェーズが発生する可能性がある。しかし、イエローフェーズ発生防止対策を講じた以降のアクティブ試験においては、イエローフェーズの発生は確認されておらず、発生防止対策の有効性が確認された⁽¹⁸⁾。

以上から、「イエローフェーズガラス固化体の発生」は着目すべき逸脱事象に含めないものとした。

② 核種の混合が不均質なガラス固化体の発生

ガラス固化体製造作業時の事故・人的要因により、核種の混合が不均質なガラス固化体が発生する可能性がある。核種の不均質なガラス固化体の発生を抑制するためには、運転条件と固化体特性の関係を明らかにする技術情報を検討する必要があることが指摘されている⁽¹⁹⁾。現状では発生防止対策の有効性が確認されていない。

以上から、「核種の混合が不均質なガラス固化体の発生」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

③ ガラス固化体のひび割れ・破壊

ガラス固化体の地上および地下でのハンドリング時の事故・人的要因、オーバーパックの地下施設への搬送時の衝突事故により、ガラス固化体のひび割れ・破壊が起こる可能性がある。

ガラス固化体の地上施設でのハンドリング技術は、日本原燃（以下、JNFL）により実用化されており、ガラス固化体の転倒・落下に対する発生防止対策が実証されている。しかし、坑道内での適用性の確認などが課題として残っている。

以上から、「ガラス固化体のひび割れ・破壊」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

④ 火災発生に伴うガラス固化体の亀裂の発生

事故・人的要因を起因とした火災に伴う熱応力により、ガラス固化体に亀裂が発生する可能性がある。

基本的な火災への発生防止対策は、他産業において実用化されている。しかし、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の対策技術の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑤ 火災発生に伴うガラス固化体の変質

事故・人的要因を起因とした火災に伴う熱負荷により、ガラス固化体が相転移することで、ガラス固化体の変質する可能性がある。

基本的な火災への発生防止対策は、他産業において実用化されている。しかし、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴うガラス固化体の変質」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

表 4-1 ガラス固化体に対する規制側が着目すべき逸脱事象の検討結果

逸脱事象	工学的対策に対する理解の現状	規制側として着目すべきか	規制側として着目すべき項目
イエローフェーズガラス固化体の発生	イエローフェーズを少量含むガラス固化体が地層処分されているとしても、多重バリアシステムの相互補完性によりより大きな影響を及ぼさないと判断されている ⁽¹⁷⁾ 。 イエローフェーズ発生防止対策を講じた以降のアクティブ試験においては、イエローフェーズの発生は確認されておらず、発生防止対策の有効性が確認された ⁽¹⁸⁾ 。	×	アクティブ試験の結果を踏まえた運転管理として、ガラス固化体の操業運転において、発生が想定される事象や運転条件に対する手順の整備や適切な対応能力について、運転管理マニュアルに反映している ⁽¹⁸⁾ 。
核種の混合が不均質なガラス固化体の発生	均質性に対する明確な定量的要求はなく、特性が把握できる程度に適切に製造されていることの確認が必要 ⁽¹⁹⁾ 。	○	運転条件と固化体特性の関係を明らかにする技術情報を検討する必要がある ⁽¹⁰⁾ 。
ガラス固化体のひび割れ・破壊	地上施設でのガラス固化体の移動に必要な遠隔操作技術は、JNFLによって実用化。	○	坑道内での適用性を確認する必要がある。
火災発生に伴うガラス固化体の亀裂の発生	基本的な火災の発生防止対策は、他産業で実用化されている。 火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
火災発生に伴うガラス固化体の変質	基本的な火災の発生防止対策は、他産業で実用化されている。 火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。

(2) オーバーパック

オーバーパックの逸脱事象に対する検討結果を、以下に示す（表 4-2）。

① 炭素鋼の延性不足

炭素鋼製造時の品質管理作業の事故・人的要因により不純物が混入した炭素鋼や炭素含有量が適切でない炭素鋼が製造される可能性がある。

炭素鋼の製造は製鉄業で実用化されており、日本工業規格⁽¹¹⁾⁽¹²⁾の適用により、製品品質のばらつきを小さくすることが可能であり、炭素鋼の延性不足は低い発生確率となることが考えられる。

以上から、「炭素鋼の延性不足」は着目すべき逸脱事象に含めないものとした。

② オーバーパック溶接部への過大な残留応力の発生

オーバーパック蓋の溶接作業時に事故・人的要因が発生した場合、溶接部に過大な残留応力が発生する可能性がある。

現在 RWMC により、オーバーパック溶接技術の実用化に向けて技術開発が行われており、過大な残留応力の発生防止対策の有効性についての検討が行われている段階である⁽⁸⁾。今後、残留応力除去を目的とした新技術の有効性について確認する必要があるものと考えられる。

以上から、「オーバーパック溶接部への過大な残留応力の発生」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

③ オーバーパック溶接部へのキズ形成

オーバーパック蓋の溶接作業時に事故・人的要因が発生した場合、溶接部にキズが形成する可能性がある。

現在 RWMC により、オーバーパック溶接技術の実用化に向けて技術開発が行われており、キズの発生防止対策の有効性について検討が行われている段階である⁽⁸⁾。今後、金属腐食に対して許容される溶接部のキズに対する検知の手段の適用性を確認する必要があるものと考えられる。

以上から、「オーバーパック溶接部へのキズ形成」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

④ オーバーパック表面へのキズ形成

オーバーパックの旋盤加工時、PEM 容器へのオーバーパック収納時、地下施設への搬送時、オーバーパックの定置時に事故・人的要因が発生した場合、オーバーパック表面にキズが形成する可能性がある。

移動物に対する落下・転倒防止対策は他産業においても広く実用化されている。さらに、JNFL により実用化されているガラス固化体の遠隔操作によるハンドリング技術のうちガラス固化体の転倒・落下に対する発生防止対策は、基本的にオーバーパックのハンドリングにも応用可能と考えられる。一方、坑道内での適用性の確認などが課題として残っている。

以上から、「オーバーパック表面へのキズ形成」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑤ 火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成

事故・人的要因を起因とした火災発生に伴う熱応力により、オーバーパック表面にキズが形成する可能性がある。

基本的な火災の発生防止対策は他産業で実用化されているものの、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑥ 火災発生に伴うオーバーパックの融解

事故・人的要因を起因とした火災発生に伴う熱負荷により、オーバーパックが融解する可能性がある。

基本的な火災の発生防止対策は他産業で実用化されているものの、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴うオーバーパックの融解」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

表 4-2 オーバーパックに対する規制側が着目すべき逸脱事象の検討結果

逸脱事象	工学的対策に対する理解の現状	規制側として着目すべきか	規制側として着目すべき項目
炭素鋼の延性不足	日本工業規格 ⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ の適用により、製品品質のばらつきを許容範囲に抑えることは可能。 低い発生確率として評価可能な見込み。	×	特になし
オーバーパック溶接部への過大な残留応力の発生	オーバーパック溶接技術の実用化が進行中であり、発生防止対策の有効性検討のデータを取得中 ⁽⁸⁾ 。	○	残留応力除去を目的とした新技術の有効性を確認する必要がある。
オーバーパック溶接部へのキズ発生	オーバーパック溶接技術の実用化が進行している。発生防止対策の有効性検討のデータを取得中であり、検知技術の開発が進行している ⁽⁸⁾ 。	○	金属腐食に対して許容される溶接部のキズに対する検知の手段の適用性を確認する必要がある。
オーバーパック表面へのキズ形成	落下・転倒防止対策は他産業でも広く実用化されている。 JNFL のガラス固化体の遠隔操作によるハンドリング技術は、基本的にオーバーパックにも応用可能と考えられる。 検知技術の開発が進行している ⁽⁸⁾ 。	○	許容されるキズと変形に対する検知手段の適用性を確認する必要がある。 オーバーパックハンドリングの坑道内での適用性を確認する必要がある。
火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成	基本的な火災に対する発生防止対策は、他産業で実用化されている。 火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
火災発生に伴うオーバーパックの融解	基本的な火災に対する発生防止対策は、他産業で実用化されている。 火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。

(3) 緩衝材

緩衝材の逸脱事象に対する検討結果を、以下に示す(表 4-3)。

① 緩衝材のスメクタイト含有量の不足

ベントナイト原鉱の採取・加工時の材料仕分け作業において、事故・人的要因が発生した場合、ベントナイト品質のばらつきが大きくなり、スメクタイト含有量が規定より少ないベントナイトが製造される可能性がある。

しかしながら、他産業では安定的な品質のベントナイトが提供されており、製品品質のばらつきを許容範囲に抑えることが可能である⁽⁷⁾と考えられる。

以上から、「緩衝材のスメクタイト含有量の不足」は着目すべき逸脱事象に含めないものとした。

② 緩衝材の粒度分布不良

ベントナイト原鉱加工時の乾燥・破砕・包装作業時、緩衝材製作時のケイ砂混合作業時の事故・人的要因により、緩衝材の粒度が不均質になる可能性がある。

他産業で安定的な品質のベントナイトが供給されており、さらに、緩衝材ブロック製作試験の結果から、製造された緩衝材の品質のばらつきが小さいことが確認されている⁽⁷⁾。

以上から、「緩衝材の粒度分布不良」は着目すべき逸脱事象に含めないものとした。

③ 緩衝材ブロックのひび割れ・剥離

防水シート作業の事故・人的要因による滴水の発生、通気工設置作業や運転管理作業の事故・人的要因による坑道内の湿度上昇、および、緩衝材ブロックの製作時、PEM 容器へのブロック設置時、緩衝材ブロックの搬送および定置時、底部緩衝材ブロックへの廃棄体設置時の作業の事故・人的要因により、緩衝材ブロックのひび割れ・剥離が発生する可能性がある。

緩衝材ブロック製作作業については、実証試験により、製造された緩衝材ブロックの品質のばらつきが小さいことが確認されており、製作作業を要因とした逸脱事象の発生確率は低いものと考えられる⁽⁷⁾。

一方、搬送・定置作業については、現在、緩衝材ブロックのハンドリングに必要な真空吸引把持技術(真空吸引ポンプにより緩衝材ブロックを把持する技術)の開発が行われているところであり、今後坑道内での適用性を確認することが課題であると考えられる。

以上から、「緩衝材ブロックのひび割れ・剥離」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

④ 緩衝材の初期含水比不良

処分場建設・操業段階の湧水処理の作業時(防水シート、水抜きボーリング、止水グラウト、処分孔鋼製ライナー、ポンプ排水)、処分場建設段階の坑道の通気工設置作業時(坑道内湿度管理)、緩衝材製作時のケイ砂混合作業時の事故・人的要因により、緩衝材の初期含水比がばらつく可能性がある。

緩衝材ブロック製作作業については、実証試験により製造された緩衝材ブロックの品質のばらつきが小さいことが確認されており⁽⁷⁾、製作作業を要因とした逸脱事象の発生確率は低いものと考えられる。

一方、湧水処理および湿度管理は、他産業で実用化されているものの、坑道内で発生する湧水や

坑道内の高湿度を完全に防ぐことは難しい。そのため、湧水および湿度に対する発生防止対策として、「無孔 PEM 容器」により緩衝材を保護する対応と、「緩衝材製作時に密度と含水比を調整すること」により緩衝材自体の機能を高度化することでの対応について、現在検討が進められている⁽⁷⁾。今後、これらの発生防止対策についての有効性について検討することが課題として残る。

以上から、「緩衝材の初期含水比不良」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑤ 緩衝材の原位置締固め時の締固め不足

緩衝材の原位置締固め時の締固めエネルギー不足などの事故・人的要因により緩衝材の締固め不足が発生する可能性がある。

原位置締固め方式については、実規模試験が行われており、現在開発中である⁽⁴⁾。今後坑道内での適用性を確認する必要があるものと考えられる。

以上から、「緩衝材の原位置締固め時の締固め不足」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑥ 緩衝材の不均質な施工

緩衝材吹き付け作業時のノズル操作作業時の事故・人的要因により、緩衝材が不均質に施工される可能性がある。

吹き付け方式による緩衝材の施工については、試験が実施されている。それにより、ベントナイト単体でも高密度の緩衝材の施工が可能であること、品質のばらつきが小さいことが確認されている⁽⁴⁾。

以上から、「緩衝材の不均質な施工」は着目すべき逸脱事象に含めないものとした。

⑦ 掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出

処分孔掘削作業の事故・人的要因、処分孔安定性確保のための吹付けコンクリート作業および補強リング施工作業の事故・人的要因により、処分孔周辺の掘削影響領域が拡大し、それに伴って坑道周辺岩盤の水理特性が変化することで緩衝材と岩盤の境界に水流が生じ、緩衝材が流出する可能性が考えられる。

以上から、「掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑧ 掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出

処分孔掘削作業の事故・人的要因、処分孔安定性確保のための吹付けコンクリート作業における処分孔の孔底部のズリの除去や不陸処理作業の事故・人的要因、オーバーパック定置作業の事故・人的要因、廃棄体定置作業前に実施する孔底／坑底の清掃および不陸処理作業の事故・人的要因、ペレット状緩衝材の隙間充填作業の事故・人的要因、および、PEM 定置作業の事故・人的要因によって、処分孔周辺に過剰な掘削ズリが残存したり、空洞が形成されることにより、緩衝材が流出する可能性がある。

緩衝材ペレットを用いた隙間充填作業などについては、実証試験が実施され、充填技術の有効性についての情報が取得されている⁽⁴⁾。しかし、緩衝材密度のばらつきに対する発生防止対策の有効性確認が今後の課題として残っている。

以上から、「掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑨ 水量低減不良に伴う緩衝材の流出

水抜きボーリング作業の事故・人的要因による地下水位低下不良、グラウト作業の事故・人的要因による湧水量低減効果不良、処分孔鋼製ライナー設置作業の事故・人的要因による鋼製ライナー水密性喪失により、水量低減不良が発生し、それに伴って緩衝材が流出する可能性がある。

湧水処理対策については、他産業で実用化されている。一方、湧水処理対策の緩衝材初期含水比に対する適用性確認が課題として残る。

以上から、「水量低減不良に伴う緩衝材の流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑩ 処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出

処分孔上部キャップ施工作业の事故・人的要因により、コンクリートの強度・耐久性の低下、アンカーの定着力不足、地山との密着不良が発生する可能性がある。その結果、地下水の浸潤による緩衝材の膨潤圧の影響でコンクリートが破断し、緩衝材が流出する可能性がある。

他産業でコンクリートの強度・耐久性を確保するための対策²⁰⁾が実用化されており、一定品質のコンクリート構造物の施工が行われている。しかし、地層処分の技術・作業段階に応じた発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑪ 力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出

坑道内の力学プラグ施工作业の事故・人的要因、および、坑口処理のための力学プラグ施工作业の事故・人的要因によるコンクリートの強度や耐久性の低下が発生した場合、地下水の浸潤による緩衝材の膨潤圧の影響でコンクリートが破断し、コンクリートの破断面など空間側へ緩衝材が流出する可能性がある。

他産業でコンクリートの強度・耐久性を確保するための対策²⁰⁾が実用化されており、一定品質のコンクリート構造物の施工が行われている。しかし、地層処分の技術・作業段階に応じた発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑫ 火災発生に伴う緩衝材の亀裂の発生

操業段階において、緩衝材ブロック搬送時の事故・人的要因、および、緩衝材定置時（ブロック方式、締固め方式、ペレット方式、吹付け方式）の事故・人的要因による火災発生を要因として、緩衝材が高温にさらされ、亀裂が発生する可能性がある。

基本的な火災の発生防止対策は他産業で実用化されているものの、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑬ 火災発生に伴う緩衝材の変質

操業段階において、緩衝材ブロック搬送時の事故・人的要因、および、緩衝材定置時（ブロック方式、締固め方式、ペレット方式、吹付け方式）の事故・人的要因による火災発生の際の熱負荷によって、緩衝材の変質が起こる可能性がある。

基本的な火災の発生防止対策は他産業で実用化されているものの、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴う緩衝材の変質」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

表 4-3 緩衝材に対する規制側が着目すべき逸脱事象の検討結果 (1/3)

逸脱事象	工学的対策に対する理解の現状	規制側として着目すべきか	規制側策として着目すべき項目
緩衝材のスメクタイト含有量の不足	他産業で安定的な品質のベントナイトが提供されており、製品品質のばらつきを許容範囲に抑えることは可能。低い発生確率として評価可能な見込み。	×	特になし
緩衝材の粒度分布不良	他産業で安定的な品質のベントナイトが供給されており、製品品質のばらつきを許容範囲に抑えることは可能である。緩衝材ブロック製作試験が実施され、現場施工と比べ、含水比、乾燥密度ともに品質のばらつきが小さいことが確認されている ⁽⁷⁾ 。	×	特になし
緩衝材ブロックのひび割れ・剥離	緩衝材ブロックの移動に必要な真空吸引把持技術（真空吸引ポンプにより緩衝材ブロックを把持する装置）が開発されており、地上での実規模試験が行われている。その結果、吸引ポンプ停止時などの不具合発生時にも直ちにブロックが落下することはないことなどが確認されている ⁽⁸⁾ 。 JNFL のガラス固化体の遠隔操作によるハンドリング技術は、基本的にオーバーパックの移動にも応用可能と考えられる。 第二次とりまとめにより、緩衝材ブロック製作の実証試験が行われ、製造された緩衝材ブロックの品質のばらつきが小さいことが確認されている ⁽⁶⁾ 。	○	オーバーパックおよび緩衝材ブロックのハンドリング技術の坑道内での適用性を確認することが必要。 緩衝材ブロックについては、品質のばらつきが小さく、緩衝材ブロック製作作業を要因としたひび割れ・剥離は、低い発生確率として評価可能な見込み。

表 4-3 緩衝材に対する規制側が着目すべき逸脱事象の検討結果 (2/3)

逸脱事象	工学的対策に対する理解の現状	規制側として着目すべきか	規制側として着目すべき項目
緩衝材の初期含水比不良	<p>防水シート、水抜きボーリング、鋼製ライナー、排水ポンプ作業は湧水対策として他産業で実用化されている。しかし、これらの対応では、坑道に発生する湧水を完全に防ぐことは難しい。従って、「無孔 PEM 容器」により緩衝材を保護する対応と、「緩衝材製作時に密度と含水比を調整すること」により緩衝材自体の機能を高度化することで対応することが考えられている⁽⁸⁾。</p> <p>坑道内の湿度は換気による管理を基本とするが、コントロールが難しいことから、坑道内は高湿度環境であると考えられるので、高温高湿度環境下での緩衝材ブロックの挙動に関するデータを RWMC が取得している。その結果、含水比を低めに設定した場合にはブロック内の飽和度と周辺環境の湿度の差異により、吸水によるブロック表面のひび割れが発生することが分かった。このことにより、高湿度環境下に緩衝材ブロックをある程度の時間放置する必要がある場合には、緩衝材ブロック製作時初期含水比を定置環境の湿度を考慮して適切に設定する必要がある⁽¹⁾。発生防止対策としては、緩衝材製造時に含水比を調整（緩衝材自体の機能を高度化）することの他、坑道内の換気による湿度調整、緩衝材と外気との接触防止（無孔 PEM 容器）が示されている⁽⁸⁾。なお、湿度を考慮した含水比調整については、フィルダムの遮水性材料にて実績がある⁽⁸⁾。</p> <p>緩衝材ブロックの製作試験が実施され、現場施工と比べ、含水比、乾燥密度ともに品質のばらつきが小さいことが確認⁽⁷⁾。</p>	○	<p>湧水および湿度に対する発生防止対策である「無孔 PEM 容器」や「緩衝材自体の機能を高度化」の有効性について検討する必要がある。</p> <p>緩衝材ブロックについては、品質のばらつきが小さく、初期含水比不良は、低い発生確率として評価可能な見込み。</p>
緩衝材の原位置締固め時の締固め不足	<p>原位置締固め方式の実規模試験が行われており、発生防止対策の有効性についての情報を取得している⁽¹⁾。</p>	○	<p>原位置締固め方式の坑道内での適用性を確認する必要がある。</p>
緩衝材の不均質な施工	<p>吹き付け方式による緩衝材の施工試験が実施されている。超高速ノズルを用いて高速でベントナイト材料を吹き付けることにより、ベントナイト単体でも高い乾燥密度（1.6t/m³）の緩衝材の施工が可能であることが実証されている。さらに、吹き付け方式により施工した緩衝材は密度の均一性が高く、ブロック方式や締固め方式で施工した場合の乾燥密度の標準偏差が 0.09, 0.12 であるのに対して、吹き付けによる場合は 0.02 という値が得られている⁽¹⁾。</p>	×	<p>特になし</p>
掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出	<p>処分孔掘削作業時の処分孔周辺岩盤への衝撃を緩和するための対策は、特に示されていない。</p> <p>処分孔安定確保のための補強リング作業の支保効果不良に対する発生防止対策は示されていない。</p> <p>処分孔安定確保のための吹き付けコンクリート作業の支保効果不良に対する発生防止対策は他産業で実用化されている。</p>	○	<p>緩衝材と岩盤の境界に水流が生じ緩衝材が浸食・流出する可能性がある。この事象に対する発生防止対策の有効性を確認する必要がある。</p>

表 4-3 緩衝材に対する規制側が着目すべき逸脱事象の検討結果 (3/3)

逸脱事象	工学的対策に対する理解の現状	規制側として着目すべきか	規制側として着目すべき項目
掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出	緩衝材ペレットを用いた隙間充填作業について実規模の模擬処分坑道での試験が実施され、充填技術の有効性についての情報を取得している ^③ 。 坑道を拡幅することにより、搬送装置の操舵性と PEM 前方の視認性が向上し、リスクへの対応が向上すると考えている ^④ 。	○	緩衝材の密度のばらつきに対する発生防止対策の有効性についての検討が必要である。 隙間充填作業、PEM 定置作業の坑道内での適用性の確認をする必要がある。
水量低減不良に伴う緩衝材の流出	防水シート、水抜きボーリング、鋼製ライナー、排水ポンプ作業は湧水対策として実用化されている。	○	湧水防止対策の緩衝材初期含水比に対する適用性を確認する必要がある。
処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出	強度・耐久性に対する対策（適切なコンクリートの配合、打ち込み、締固め、養生など）、および、定着力に対する対策（適切な穿孔、くり粉の排出など）を適用することにより、コンクリート構造物の強度・耐久性を確保することが可能であり、他産業で一定品質の施工が行われている。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
力学ブラグの破損に伴う緩衝材の流出	強度・耐久性に対する対策（適切なコンクリートの配合、打ち込み、締固め、養生など）を適用することにより、コンクリート構造物の強度・耐久性を確保することが可能であり、他産業で一定品質の施工が行われている。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
火災発生に伴う緩衝材の亀裂の発生	基本的な火災の発生防止対策は、他産業で実用化されている。 火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
火災発生に伴う緩衝材の変質	基本的な火災の発生防止対策は、他産業で実用化されている。 火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。

(4) 粘土プラグ

粘土プラグの逸脱事象に対する検討結果を、以下に示す（表 4-4）。

① 粘土プラグのス멕タイト含有量の不足

ベントナイト原鉱の採取・加工時の材料仕分け作業において、事故・人的要因が発生した場合、ベントナイト品質のばらつきが大きくなり、ス멕タイト含有量が規定より少ないベントナイトが製造される可能性がある。

しかしながら、他産業では安定的な品質のベントナイトが提供されており、製品品質のばらつきを許容範囲に抑えることが可能である⁶⁾と考えられる。

以上から、「粘土プラグのス멕タイト含有量の不足」は着目すべき逸脱事象に含めないものとした。

② 粘土プラグの粒度分布不良

ベントナイト原鉱加工時の事故・人的要因により粘土プラグの粒度が不均質になる可能性がある。

他産業で安定的な品質のベントナイトが供給されており、さらに、緩衝材ブロック製作試験の結果から、製造された緩衝材の品質のばらつきが小さいことが確認されている⁷⁾。粘土ブロックの製作には緩衝材の製作技術が応用可能であると考えられるが、緩衝材と粘土ブロックでは、使用する材料が異なることも考えられることから、実際に使用する材料を用いた材料品質の確認が今後必要となる。

以上から、「粘土プラグの粒度分布不良」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

③ 粘土プラグのひび割れ・剥離

粘土ブロックハンドリング時に粘土プラグが落下・転倒した場合、粘土ブロックのひび割れ・剥離が生じる可能性がある。

現在、緩衝材ブロックのハンドリングに必要な真空吸引把持技術の開発が行われているところであり、粘土ブロックについても同様の工学技術が採用されるものと考えられる。今後坑道内での適用性を確認することが課題であると考えられる。

以上から、「粘土プラグのひび割れ・剥離」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

④ 粘土プラグの初期含水比不良

操業、閉鎖段階での粘土プラグ切り欠き部湧水処理作業の事故・人的要因により、粘土プラグの含水比調整がうまく行かず、粘土プラグの初期含水比が高くなる可能性がある。

湧水処理技術については、他産業で実用化されているが、発生防止対策としての適用性を確認する必要がある。

以上から、「粘土プラグの初期含水比不良」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑤ 水量低減不良に伴う粘土プラグの流出

操業、閉鎖段階での粘土プラグ設置時の粘土グラウト注入作業の事故・人的要因により、粘土グラウトの注入不足が起り、水量低減不良に伴って粘土プラグの流出が起こる可能性がある。

グラウト作業については、適切な注入材料の配合、注入圧力管理などが他産業で実施されている

ものの発生防止対策としての有効性については確認されていない。

以上から、「水量低減不良に伴う粘土プラグの流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑥ 掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出

操業、閉鎖段階での粘土プラグ設置時の切り欠き部掘削作業の事故・人的要因により、周辺岩盤へ過剰な衝撃が加わり、粘土プラグ周辺の掘削影響領域が拡大し、それに伴って坑道周辺岩盤の水理特性が変化することで、粘土プラグが流出する可能性がある。

以上から、「掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑦ 掘削ズリと空洞の残存による粘土プラグの流出

操業、閉鎖段階での粘土プラグ設置面の清掃・不陸処理作業の事故・人的要因により、粘土プラグ周辺に掘削ズリの残存、空洞形成が起り、浸潤に伴い粘土プラグが流出する可能性がある。

緩衝材ペレットを用いた隙間充填作業などについては、実証試験が実施され、充填技術の有効性についての情報が取得されている⁽¹⁾。しかし、粘土プラグ密度のばらつきに対する発生防止対策の有効性確認が今後の課題として残っている。

以上から、「掘削ズリと空洞の残存による粘土プラグの流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑧ 火災発生に伴う粘土プラグの亀裂の発生

燃料漏れなどの事故・人的要因を起因とした火災に伴った熱応力が粘土プラグに作用し、粘土プラグに亀裂が発生する可能性がある。

基本的な火災の発生防止対策は他産業で実用化されているものの、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑨ 火災発生に伴う粘土プラグの変質

燃料漏れなどの事故・人的要因を起因とした火災に伴った熱負荷が粘土ブロックに作用し、粘土プラグが変質する可能性がある。

基本的な火災の発生防止対策は他産業で実用化されているものの、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴う粘土プラグの変質」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

表 4-4 粘土プラグに対する規制側が着目すべき逸脱事象の検討結果

逸脱事象	工学的対策に対する理解の現状	規制側として着目すべきか	規制側として着目すべき項目
粘土プラグのスメックタイト含有量の不足	他産業で安定的な品質のベントナイトが提供されており、製品品質のばらつきを許容範囲に抑えることは可能。 低い発生確率として評価可能な見込み。	×	特になし
粘土プラグの粒度分布不良	他産業で安定的な品質のベントナイトが供給されており、製品品質のばらつきを許容範囲に抑えることは可能である。 緩衝材ブロック製作試験が実施され、現場施工と比べ、含水比、乾燥密度ともに品質のばらつきが小さいことが確認されている ⁽⁷⁾ 。粘土プラグの製作には緩衝材の製作技術が応用可能と考えられる。	○	粘土ブロックの製作には緩衝材の製作技術が応用可能であると考えられるが、緩衝材と粘土ブロックでは、使用する材料が異なることも考えられることから、実際に使用する材料を用いた材料品質の確認が今後必要となる。
粘土プラグのひび割れ・剥離	緩衝材ブロックの移動に必要な真空吸引把持技術が開発中である。緩衝材ブロックのハンドリング技術は基本的に粘土ブロックにも応用可能と考えられる。 第二次とりまとめにより、緩衝材ブロック製作の実証試験が行われ、製造された緩衝材ブロックの品質のばらつきが小さいことが確認されている ⁽⁷⁾ 。粘土ブロックの製作には緩衝材の製作技術が応用可能と考えられる。	○	粘土ブロックのハンドリング技術の坑道内での適用性を確認することが必要。
粘土プラグの初期含水比不良	湧水対策は他産業で実用化されている。 緩衝材ブロックの製作試験が実施され、現場施工と比べ、含水比、乾燥密度ともに品質のばらつきが小さいことが確認されている ⁽⁷⁾ 。	○	湧水処理対策の適用性の確認をする必要がある。
水量低減不良に伴う粘土プラグの流出	粘土プラグ部でのグラウト作業時の注入材の充填不足に対する発生防止対策は他産業で実用化されている。	○	発生防止対策の有効性について検討する必要がある。
掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出	粘土プラグ設置作業での切り欠き部掘削作業時の周辺岩盤への過大な衝撃に対する発生防止対策は、他産業で実用化されている。	○	粘土プラグと岩盤の境界に水流が生じ粘土プラグが流出することに対する発生防止対策の有効性を確認する必要がある。
掘削ズリと空洞の残存による粘土プラグの流出	緩衝材ペレットを用いた隙間充填作業について実規模の模擬処分坑道での試験が実施され、充填技術の有効性についての情報を取得している ⁽¹⁾ 。	○	粘土プラグの密度のばらつきに対する発生防止対策の有効性についての検討が必要である。
火災発生に伴う粘土プラグの亀裂の発生	基本的な火災の発生防止対策は、他産業で実用化されている。火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
火災発生に伴う粘土プラグの変質	基本的な火災の発生防止対策は、他産業で実用化されている。火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。

(5) 埋め戻し材

埋め戻し材の逸脱事象に対する検討結果を、以下に示す（表 4-5）。

① 埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足

ベントナイト原鉱の採取・加工時の材料仕分け作業において、事故・人的要因が発生した場合、ベントナイト品質のばらつきが大きくなり、スメクタイト含有量が規定より少ないベントナイトが製造される可能性がある。

他産業では安定的な品質のベントナイトが提供されており、製品品質のばらつきを許容範囲に抑えることが可能である⁽⁶⁾と考えられる。

以上から、「埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足」は着目すべき逸脱事象に含めないものとした。

② 埋め戻し材の粒度分布不良

ベントナイト原鉱加工時の事故・人的要因により埋め戻し材の粒度が不均質になる可能性がある。

他産業で安定的な品質のベントナイトが供給されており、さらに、緩衝材ブロック製作試験の結果から、製造された緩衝材の品質のばらつきが小さいことが確認されている⁽⁷⁾。埋め戻し材の製作には緩衝材の製作技術が応用可能と考えられるが、緩衝材と埋め戻し材では、使用する材料が異なることも考えられることから、実際に使用する材料を用いた材料品質の確認が今後必要となる。

以上から、「埋め戻し材の粒度分布不良」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

③ 埋め戻し材の初期含水比不良

埋め戻し材製作時の事故・人的要因により、埋め戻し材の初期含水比がばらつく可能性がある。

緩衝材ブロック製作作業については、実証試験により、製造された緩衝材ブロックの品質のばらつきが小さいことが確認されている。埋め戻し材製作は、緩衝材の製作技術を応用することができるが、緩衝材と埋め戻し材では使用する材料が異なることも考えられることから、実際に使用する材料を用いた材料品質の確認が今後必要となると考えられる。

以上から、「埋め戻し材の初期含水比不良」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

④ 埋め戻し材の転圧不足

処分坑道、水平坑道、斜坑、立坑の埋め戻し作業時の事故・人的要因により埋め戻し材の転圧不足が発生する可能性がある。

緩衝材についての原位置締固め方式については、実規模試験が行われており現在開発中である⁽¹⁾。埋め戻し材についてもこの技術が応用されることが考えられる。緩衝材と埋め戻し材では、使用する材料が異なることも考えられることから、実際に使用する材料を用いた材料品質の確認が必要と考えられる。

以上から、「埋め戻し材の転圧不足」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑤ 掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出

坑道掘削作業、力学プラグ設置作業の事故・人的要因による周辺岩盤への過剰な衝撃、排水管設置作業の事故・人的要因による排水不良、ズリ運搬作業の事故・人的要因による路盤部岩盤の劣化、

TBM 掘削の支保工設置作業・吹き付けコンクリート作業・鋼製支保工建て込み作業の事故・人的要因などによる支保効果不良、ロックボルト作業・先受け工作業の事故・人的要因による定着力不足、および、粘土・力学プラグ設置時の事故・人的要因により、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する可能性が考えられる。その結果、母岩の間隙率・間隙構造の変化が生じ、母岩と接する埋め戻し材が流出する可能性がある。

掘削影響領域の透水性を低下させる技術として湧水処理対策が他産業で実用化されているが、埋め戻し材に対する有効性確認が課題として残る。

以上から、「掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑥ 掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出

建設段階において、坑道掘削作業や TBM 掘削による支保工設置作業に伴う坑道周辺岩盤への過剰な衝撃が発生する可能性がある。その結果、坑道壁面に過大な不陸が形成され、覆工コンクリート施工後や坑道埋め戻し後に覆工コンクリート背面に連続した空洞が形成される可能性がある。また、覆工コンクリート施工作業の事故・人的要因による天端部のコンクリート未充填区間の形成、坑道掘削時のズリ運搬作業の事故・人的要因による路盤部岩盤の劣化、および、インバートコンクリート施工作業の事故・人的要因によるトンネル敷き面への掘削ズリの残存により、インバートコンクリート背面に連続的な空洞が形成される可能性がある。さらに、建設段階におけるロックボルトや先受け工作業の事故・人的要因、操業および閉鎖段階での粘土プラグ部での粘土グラウト施工作業の事故・人的要因による止水効果不良、および、力学プラグ設置面の清掃・不陸処理作業の事故・人的要因により、坑道周辺に掘削ズリや空洞の残存が生じる可能性がある。その結果、埋め戻し材が流出する可能性がある。

覆工コンクリート背面の空洞を埋める技術として湧水処理対策が他産業で実用化されている。しかし、埋め戻し材に対する有効性が課題として残る。

以上から、「掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑦ 力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出

坑道内の力学プラグ施工作業の事故・人的要因、および、坑口処理のための力学プラグ施工作業の事故・人的要因によるコンクリートの強度や耐久性の低下が発生した場合、地下水の浸潤による埋め戻し材の膨潤圧の影響でコンクリートが破断し、コンクリートの破断面などの空間側へ埋め戻し材が流出する可能性がある。

他産業でコンクリートの強度・耐久性を確保するための対策²⁰⁾が実用化されており、一定品質のコンクリート構造物の施工が行われている。しかし、地層処分の技術・作業段階に応じた発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑧ 火災発生に伴う埋め戻し材の亀裂の発生

事故・人的要因を起因とした火災に伴った熱応力が埋め戻し材に作用し、埋め戻し材に亀裂が発生する可能性がある。

基本的な火災の発生防止対策は他産業で実用化されているものの、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑨ 火災発生に伴う埋め戻し材の変質

事故・人的要因を起因とした火災に伴った熱負荷が埋め戻し材に作用し、埋め戻し材の変質が起こる可能性がある。

基本的な火災の発生防止対策は他産業で実用化されているものの、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

表 4-5 埋め戻し材に対する規制側が着目すべき逸脱事象の検討結果 (1/2)

逸脱事象	工学的対策に対する理解の現状	規制側として着目すべきか	規制側として着目すべき項目
埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足	他産業で安定的な品質のベントナイトが提供されており、製品品質のばらつきを許容範囲に抑えることは可能。低い発生確率として評価可能な見込み。	×	特になし
埋め戻し材の粒度分布不良	他産業で安定的な品質のベントナイトが供給されており、製品品質のばらつきを許容範囲に抑えることは可能である。 緩衝材ブロック製作試験が実施され、現場施工と比べ、含水比、乾燥密度ともに品質のばらつきが小さいことが確認されている ⁷⁾ 。埋め戻し材の製作には緩衝材の製作技術が応用可能と考えられる。	○	緩衝材と埋め戻し材では、使用する材料が異なることも考えられることから、実際に使用する材料を用いた材料品質の確認が今後必要となる。
埋め戻し材の初期含水比不良	緩衝材の製作試験が実施され、現場施工と比べ、含水比、乾燥密度ともに品質のばらつきが小さいことが確認されている ⁷⁾ 。埋め戻し材の製作には緩衝材の製作技術が応用可能と考えられる。	○	緩衝材と埋め戻し材では、使用する材料が異なることも考えられることから、実際に使用する材料を用いた材料品質の確認が必要である。
埋め戻し材の転圧不足	緩衝材の原位置締固め方式の実規模試験が行われており、発生防止対策（適切な材料品質管理（締固めエネルギー、巻きだし厚さなど））の有効性についての情報を取得している ⁽¹⁾ 。	○	緩衝材と埋め戻し材では、使用する材料が異なることも考えられることから、実際に使用する材料を用いた確認が必要である。
掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	坑道掘削時および坑道拡幅時の周辺岩盤への過大な衝撃に対する発生防止対策は、他産業で実用化されている。 排水管設置作業、ズリ運搬作業の路盤部岩盤の劣化に対する発生防止対策は、他産業で実用化されている。 支保設置作業時の支保効果発現不良に対する発生防止対策は他産業で実用化されている。 水抜きボーリング作業時の排水効果不良に対する発生防止対策は示されていない。 グラウト作業時の地山安定化効果不良に対する発生防止対策は他産業で実用化されている。	○	掘削影響領域が拡大し、坑道周辺岩盤の水理特性が変化することで埋め戻し材と岩盤の境界に水流が生じ緩衝材が浸食・流出することに対する発生防止対策の有効性を確認する必要がある。

表 4-5 埋め戻し材に対する規制側が着目すべき逸脱事象の検討結果 (2/2)

逸脱事象	工学的対策に対する理解の現状	規制側として着目すべきか	規制側として着目すべき項目
掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	処分坑道掘削時、ロックボルト、先受け工施工作業時の不陸の形成に対する発生防止対策は、他産業で実用化されているが、坑道の力学的安定性の確保を目的とした対策であり、遮水性を目的としたものではない。覆工コンクリート施工作業時のコンクリート背面の充填部に対する発生防止対策は、他産業で実用化されているが、坑道の力学的安定性の確保を目的とした対策であり、遮水性を目的としたものではない。ズリ運搬作業時、インバートコンクリート施工作業時、力学プラグ設置面の清掃・不陸処理作業時の掘削ズリの残存に対する発生防止対策は示されていない。	○	処分坑道の覆工コンクリート背面の空洞に対する発生防止対策の埋め戻し材に対する有効性を検討する必要がある。坑道路盤部の掘削ズリの残存に対する発生防止対策を検討する必要がある。
力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出	強度・耐久性に対する対策（適切なコンクリートの配合、打ち込み、締固め、養生など）を適用することにより、コンクリート構造物の強度・耐久性を確保することが可能であり、他産業で一定品質の施工が行われている。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
火災発生に伴う埋め戻し材の亀裂の発生	基本的な火災の発生防止対策は、他産業で実用化されている。火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
火災発生に伴う埋め戻し材の変質	基本的な火災の発生防止対策は、他産業で実用化されている。火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。

(6) 母岩（掘削影響領域を含む）

母岩（掘削影響領域を含む）の逸脱事象に対する検討結果を、以下に示す（表 4-6）。

① ボーリング孔自体の選択的な流路形成

サイト調査段階でのボーリング孔閉塞作業時の閉塞材と分散材との配合不良、あるいは閉塞作業の不備により、閉塞材の目詰まりが生じ、ボーリング孔が完全に閉塞されなかった場合、調査ボーリング孔自体が選択的な流路となる可能性がある。

ボーリング孔閉塞作業時の目詰まりに対する発生防止対策は、他産業で実用化されているが、1,000m級のボーリング孔の埋め戻しについては、全長にわたって適切に充填できる技術の確認などが必要であるとされている⁽⁴⁾。

以上から、「ボーリング孔自体の選択的な流路形成」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

② ボーリング孔周辺母岩の選択的な流路形成

ボーリング孔での透水試験時の事故・人的要因により、ボーリング孔周辺岩盤の割れ目充填物の流出や割れ目の拡大が発生し、ボーリング孔周辺母岩が選択的な流路となる可能性がある。

現段階では、これらについての具体的な発生防止対策が示されていない。

以上から、「ボーリング孔周辺母岩の選択的な流路形成」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

③ 処分孔周辺の掘削影響領域の拡大

処分孔掘削作業時の処分孔周辺岩盤への過大な衝撃、あるいは処分孔安定確保作業時の支保効果不良により、処分孔周辺の掘削影響領域が拡大する可能性がある。

これらについては、様々な対策が他産業で実用化されているものと、対策が示されていないものがある。逸脱事象が処分孔周辺岩盤の水理特性に与える影響と発生防止対策の有効性について今後検討する必要があると考えられる。

以上から、「処分孔周辺の掘削影響領域の拡大」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

④ 粘土プラグ周辺の掘削影響領域の拡大

粘土プラグ切り欠き部掘削時の坑道周辺岩盤への過大な衝撃により、粘土プラグ周辺の掘削影響領域が拡大する可能性がある。

これらについては、様々な対策が他産業で実用化されているが、坑道周辺岩盤の水理特性に与える影響と発生防止対策の有効性について今後検討する必要があると考えられる。

以上から、「粘土プラグ周辺の掘削影響領域の拡大」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑤ 坑道周辺の掘削影響領域の拡大

坑道掘削時、力学プラグ切り欠き部掘削時の坑道周辺岩盤への過大な衝撃、坑道路盤の排水不良による路盤岩盤の劣化、支保工施工作業時の支保効果発現不良、湧水対策作業時の不備による過剰な間隙水圧の発生などにより、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する可能性がある。

これらについては、様々な対策が他産業で実用化されているものと、対策が示されていないものがある。逸脱事象が坑道周辺岩盤の水理特性に与える影響と発生防止対策の有効性について今後検討する必要があると考えられる。

以上から、「坑道周辺の掘削影響領域の拡大」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑥ 火災発生に伴う母岩の亀裂の発生

燃料漏れなどの事故・人的要因を起因とした火災に伴った熱応力が坑道周辺岩盤に作用し、母岩に亀裂が発生する可能性がある。

基本的な火災の発生防止対策は他産業で実用化されているものの、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴う母岩への亀裂の発生」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

⑦ 火災発生に伴う母岩の変質

燃料漏れなどの事故・人的要因を起因とした火災に伴った熱負荷が坑道周辺岩盤に作用し、母岩の変質が起こる可能性がある。

基本的な火災の発生防止対策は他産業で実用化されているものの、地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性の確認などが課題として残っている。

以上から、「火災発生に伴う母岩の変質」を着目すべき逸脱事象として抽出した。

表 4-6 母岩（掘削影響領域を含む）に対する規制側が着目すべき逸脱事象の検討結果（1/2）

逸脱事象	工学的対策に対する理解の現状	規制側として着目すべきか	規制側として着目すべき項目
ボーリング孔自体の選択的な流路形成	ボーリング孔閉塞作業時の目詰まりに対する発生防止対策は、他産業で実用化されている。 ボーリング孔の埋め戻し方法として、ストリパプロジェクトのボアホールプラグ、スイス放射性廃棄物管理共同組合のボーリング孔閉塞試験が実施されている。いずれの試験でも、ベントナイトを充填した区間は周辺の岩盤よりも透水係数が低くなる、または選択的な水みちとはならないことが確認されている ⁽⁴⁾ 。	○	1,000m 級のボーリング孔の埋め戻しについては、全長にわたって適切に充填できる技術の確認が必要である ⁽⁴⁾ 。
ボーリング孔周辺母岩の選択的な流路形成	具体的な発生防止対策は示されていない。	○	逸脱事象が処分場に与える影響と発生防止対策について検討する必要がある。
処分孔周辺の掘削影響領域の拡大	処分孔掘削作業時の処分孔周辺岩盤への衝撃を緩和するための対策は、特に示されていない。 処分孔安定確保のための補強リング作業の支保効果発現不良に対する発生防止対策は示されていない。 処分孔安定確保のための吹き付けコンクリート作業の支保効果発現不良に対する発生防止対策は他産業で実用化されている。	○	逸脱事象が処分孔周辺岩盤の水理特性に与える影響と発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
粘土プラグ周辺の掘削影響領域の拡大	力学プラグ設置作業での切り欠き部掘削作業時の周辺岩盤への過大な衝撃に対する発生防止対策は、他産業で実用化されている。	○	逸脱事象が坑道周辺岩盤の水理特性に与える影響と発生防止対策の有効性を検討する必要がある。

表 4-6 母岩（掘削影響領域を含む）に対する規制側が着目すべき逸脱事象の検討結果（2/2）

逸脱事象	工学的対策に対する理解の現状	規制側として着目すべきか	規制側として着目すべき項目
坑道周辺の掘削影響領域の拡大	坑道掘削時の周辺岩盤への過大な衝撃に対する発生防止対策は、他産業で実用化されている。 排水管設置作業、ズリ運搬作業の路盤部岩盤の劣化に対する発生防止対策は、他産業で実用化されている。 支保設置作業時の支保効果発現不良に対する発生防止対策は他産業で実用化されている。 水抜きボーリング作業時の排水効果不良に対する発生防止対策は示されていない。 グラウト作業時の止水効果不良に対する発生防止対策は示されていない。 力学プラグ設置作業での切り欠き部掘削作業時の周辺岩盤への過大な衝撃に対する発生防止対策は、他産業で実用化されている。	○	逸脱事象が坑道周辺岩盤の水理特性に与える影響と発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
火災発生に伴う母岩の亀裂の発生	基本的な火災の発生防止対策は、他産業で実用化されている。火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。
火災発生に伴う母岩の変質	基本的な火災の発生防止対策は、他産業で実用化されている。火災に対する個別の発生防止対策の有効性は示されていない。	○	地層処分の技術・作業段階に応じた火災に対する個別の発生防止対策の有効性を検討する必要がある。

5. まとめ

地層処分場の長期安全性を確保するためには、人工バリアと天然バリアを含めた多重バリアが適切に機能することが重要である。そこで日本原子力研究開発機構では、規制の観点から工学技術の適用に関するシナリオ整備を行ってきた。JAEA-Data/Code 2014-026 では、HLW 廃棄物を対象に処分場の建設・操業・閉鎖段階における工学技術適用時の事故・人的要因を起因とした人工バリアまたは天然バリアの THMC の変化、および、それにつづく安全機能への影響の連鎖を、逸脱事象ごとにシナリオとして整備した。

しかし、このような事故・人的要因を起因とした安全機能の喪失・低下につながる影響の連鎖は、事故・人的要因や逸脱事象の発生を防止するような工学的対策を施すことで、打ち切ることが可能であると考えられる。このことから、工学的対策に関する情報を収集・整理し、その適用性についての分析を行うことは、上記レポートにて整理している逸脱事象に対応したシナリオの妥当性を判断するために有効であると考えられる。

そこで本研究では、事故・人的要因によって起こりうる逸脱事象（ガラス固化体 5 事象、オーバーパック 6 事象、緩衝材 13 事象、粘土プラグ 9 事象、埋め戻し材 9 事象、母岩（掘削影響領域を含む） 7 事象、計 49 事象）（Appendix- I）ごとに、発生防止対策、検知手段および影響低減対策について情報収集を行った。さらに、その整理結果をもとに、それぞれについて工学的対策としての現状の有効性について検討するとともに、工学的対策としての有効性が未熟であるものに対する今後の検討課題を整理し、規制側が着目すべき逸脱事象として分類した。

上記の整理の結果、規制側が着目すべき逸脱事象として、計 42 事象（ガラス固化体 4 事象、オーバーパック 5 事象、緩衝材 10 事象、粘土プラグ 8 事象、埋め戻し材 8 事象、母岩（掘削影響領域を含む） 7 事象）を抽出した。

以上で示した工学的対策に関する一連の調査の結果は、JAEA-Data/Code 2014-026 において構築した「地層処分工学技術の適用に関連したシナリオ構築のためのデータベース」に追加した。本研究で追加した項目は、「逸脱事象に対する工学的対策（発生防止対策・検知の手段）に対する、理解の現状および規制側が着目すべき逸脱事象」である（図 5-1）。

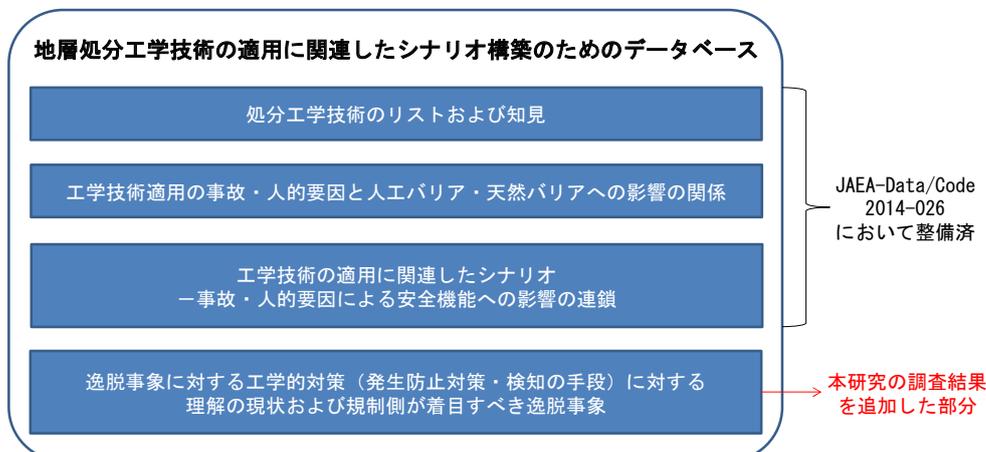


図 5-1 地層処分工学技術の適用に関連したシナリオ構築のためのデータベースの構成

なお、本稿で示した規制側として着目すべき逸脱事象は、地層処分に用いられる工学技術および発生防止対策・検知手段・影響低減のための工学的対策に関する研究・開発の進展に応じて変わっていく。事業者は、工学的対策の整備とその有効性を示すための技術開発を行うことが必要であると考えられる。それを受けて規制側は、示された工学的対策の妥当性を判断するための技術基盤の準備、また、仮に逸脱事象が発生した場合に、安全機能の低下・喪失につながる可能性がどの程度あるのかを把握するための評価手法の整備などを今後実施していく必要がある。

謝 辞

本報作成にあたって、日本原子力研究開発機構の田中忠夫氏には御指導・御協力を賜りました。また、中央開発株式会社の上田正人氏、神崎裕氏には情報収集にご協力を賜りました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 原子力発電環境整備機構, 地層処分事業の安全確保 (2010 年度版) - 確かな技術による安全な地層処分の実現のために -, NUMO-TR-11-01, 2011.
- (2) 高山秀樹, 高井静霞, 武田聖司, 地層処分の工学技術の適用に関連したシナリオ設定手法の整備 - サイト調査・建設・操業・閉鎖段階で発生する事故・人的要因とそれらの閉鎖後の安全機能への影響についての整理 - (受託研究), JAEA-Data/Code 2014-026, 2015, 189p.
- (3) 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 23 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書, 2012.
- (4) 原子力発電環境整備機構, 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性 - 「処分場の概要」の説明資料 -, NUMO-TR-04-01, 2004.
- (5) 土木学会, トンネル標準示方書, 山岳工法・同解説, 2006.
- (6) 神崎裕・武田聖司・木村英雄, 高レベル放射性廃棄物処分における地下水移行に係わる安全評価のシナリオ構築のための FEP データベース (受託研究), JAEA-Data/Code 2009-011, 2009, 90p.
- (7) 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 -, 分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999, 703p.
- (8) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 24 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書 - 遠隔操作技術高度化開発 -, 2013.
- (9) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 24 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書 - 人工バリア品質評価技術の開発 -, 2013.
- (10) 日本原子力学会, 地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント～地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物 (ガラス固化体) の特性～報告書, 2010.

- (11) 日本工業規格, JIS G 0321, 2010, 鋼材の製品分析方法及びその許容変動値.
- (12) 日本工業規格, JIS Z 2241, 2011, 金属材料引張試験方法.
- (13) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 13 年度 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書ー遠隔操作技術高度化開発ー, 2002.
- (14) 日本原子力研究開発機構, 平成 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 地下坑道施工技術高度化開発 6 カ年報告書, 2013.
- (15) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書ー遠隔操作技術高度化開発ー, 2008.
- (16) 公益社団法人 地盤工学会, 地盤調査の方法と解説ー二分冊の 1ー, 2013.
- (17) 日本原子力学会イエローフェーズ含有ガラス固化体評価特別専門委員会, イエローフェーズ含有ガラス固化体の処分時影響評価試算結果の妥当性について, 2008.
- (18) エネルギー総合工学研究所, 核燃料サイクル技術の安定性に関する検討 第一ステップ 再処理工場におけるガラス固化施設の安定運転の実現に向けた見通しの技術的評価報告書, 2013.
- (19) 日本原子力学会地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント特別委員会, 地層処分対象放射性廃棄物品質マネジメント～地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の機能と要件～報告書, 2011.
- (20) 土木学会 コンクリート委員会 コンクリート標準示方書改訂小委員会編集, コンクリート標準示方書 [施工編], 2012.
- (21) 社団法人 日本道路協会, 道路トンネル技術基準（構造編）・同解説, 2003.

付 録

Appendix- I 事故・人的要因と逸脱事象

Table I-1. 構成要素ごとの逸脱事象のリスト(1/2)

構成要素	安全機能への影響	逸脱事象（事故・人的要因の整理番号）
ガラス固化体	ガラスマトリックスによる浸出抑制	(a) イエローフェーズガラス固化体の発生 (C1)
		(b) 核種の混合が不均質なガラス固化体の発生 (C3)
		(c) ガラス固化体のひび割れ・破壊 (C2、C4、C5-1、C8、C9、C19、C22-1、C22-6、C25-1、C29-1、C35-1、C39-1)
		(d) 火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生 (C5-2、C22-2、C25-2、C29-2、C35-2、C39-2)
		(e) 火災発生に伴うガラス固化体の変質 (C5-3、C22-3、C25-3、C29-3、C35-3、C39-3)
オーバーパック	発熱が著しい期間の地下水接触の防止	(a) 炭素鋼の延性不足 (C6)
		(b) オーバーパック溶接部への過大な残留応力の発生 (C10-1)
		(c) オーバーパック溶接部へのキズ形成 (C10-2)
		(d) オーバーパック表面へのキズ形成 (C7、C18、C21-1、C24-1、C28-1、C34-1、C38-1)
		(e) 火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成 (C21-2、C24-2、C28-2、C34-2、C38-2)
		(f) 火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解 (C21-3、C24-3、C28-3、C34-3、C38-3)
緩衝材	移流による移行の抑制、コロイド移行の防止・抑制、収着による放射性物質の移行遅延	(a) 緩衝材のスメクタイト含有量の不足 (C11-1、C12-1)
		(b) 緩衝材の粒度分布不良 (C13-1、C15)
		(c) 緩衝材ブロックのひび割れ・剥離 (B16、B28、C16、C17、C23-1、C26-1、C36、C40)
		(d) 緩衝材の初期含水比不良 (B17、B19、B22、B29、B37、C33、C14)
		(e) 緩衝材の原位置締固め時の締固め不足 (C32)
		(f) 緩衝材の不均質な施工 (C41-1)
		(g) 掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出 (B30-2、B32-2、B34-2、B36-2)
		(h) 掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出 (B31、B33、B35、C27、C30、C37-1、C42)
		(i) 水量低減不良に伴う緩衝材の流出 (B20、B23、B36)
		(j) 処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出 (C43)
		(k) 力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出 (C52-1)
		(l) 火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生 (C23-2、C26-2、C31-1、C37-2、C41-2)
		(m) 火災発生に伴う緩衝材の変質 (C23-3、C26-3、C31-2、C37-3、C41-3)
粘土プラグ	アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制	(a) 粘土プラグのスメクタイト含有量の不足 (C11-2、C12-2)
		(b) 粘土プラグの粒度分布不良 (C13-2、C20-4)
		(c) 粘土プラグのひび割れ・剥離 (C20-5、C47-1、D7-1)
		(d) 粘土プラグの初期含水比不良 (C20-3、C48、D8)
		(e) 水量低減不良に伴う粘土プラグの流出 (C46、D6)
		(f) 掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出 (C45-2、D5-2)
		(g) 掘削ズリと空洞の残存による粘土プラグの流出 (C49、D9)
		(h) 火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生 (C47-2、D7-2)
		(i) 火災発生に伴う粘土プラグの変質 (C47-3、D7-3)

Table I -1. 構成要素ごとの逸脱事象のリスト (2/2)

構成要素	安全機能への影響	逸脱事象 (事故・人的要因の整理番号)
埋め戻し材	アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制	(a) 埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足 (C11-3、C12-3)
		(b) 埋め戻し材の粒度分布不良 (C13-3、C20-2)
		(c) 埋め戻し材の初期含水比不良 (C20-1)
		(d) 埋め戻し材の転圧不足 (C44-1、D1-1、D2-1、D3-1)
		(e) 掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出 (B1-2、B3-2、B18-2、B7-2、B5-2、B9-2、B27-2、B12-2、B15-2、B10-2、B25-2、B21-2、B24-2、C50-2、D10-2)
		(f) 掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出 (B2、B4、B6、B11、B13、B8、B14、B26、C51、D11)
		(g) 力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出 (C52-2、D12、D13)
		(h) 火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生 (C44-2、D1-2、D2-2、D3-2)
		(i) 火災発生に伴う埋め戻し材の変質 (C44-3、D1-3、D2-3、D3-3)
母岩 (掘削影響領域を含む)	アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制、収着による放射性物質の移行遅延	(a) ボーリング孔自体の選択的な流路形成 (A-1、D-4)

Appendix-II 工学技術適用上の事故・人的要因

JAEA-Data/Code 2014-026 において、サイト調査、建設、操業、閉鎖の各段階で用いられる各工学技術に対して、工学技術の適用に起因して起こりうる事故・人的要因、および、事故・人的要因が起こった場合の人工バリア・天然バリアのバリア特性（THMC）への影響を整理した結果を、Table II-1～II-4 に示す。

Table II-1. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【サイト調査段階】（1/2）

【工学技術の分類】 ボーリングー機械ボーリングーロータリー掘削方式		
【事故・人的要因整理番号】 A1		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	地層処分における調査からモニタリングまで終了までのボーリング孔はそれ自体が水みちとなり、地質環境に影響を与える可能性があるので確実に閉塞する必要がある。 閉塞材料としてセメント系材料や粘土系材料などが考えられる。	
手順	①ボーリング孔の削孔、②保孔、③孔閉塞	
適用上の留意点	閉塞材料の目詰まりにより、完全に閉塞されない場合がある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	ボーリング孔閉塞作業の事故・人的要因に伴い、閉塞材の目詰まりなどを起因としてボーリング孔閉塞が不十分となり、ボーリング孔の間隙構造、間隙率に影響を及ぼす可能性がある。その結果、ボーリング孔自体が選択的な水みちとなり、母岩の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(A1)(H)。【ボーリング孔自体の選択的な流路形成】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
A1	ボーリング孔自体の選択的な流路形成	閉塞材料の閉塞材と分散媒の配合不良(配合比や混合不良) 閉塞材料の注入量・注入圧などの管理作業の事故・人的要因

Table II-1. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【サイト調査段階】 (2/2)

【工学技術の分類】 物理探査－孔内検層－孔内透水試験(注水方式)		
【事故・人的要因整理番号】 A2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ボーリング孔を利用した地盤の透水性を把握する試験の一つとして、ルジオンテストがある。	
手順	①試験区間の洗浄、②バッカーの挿入設置、③注水および測定	
適用上の留意点	注入圧力(P)～注入量(Q)は、比例関係にあるはずだが、ある注入圧力以上になると注入量が急激に増大することがある。割れ目を充填している粘土や細粒分が流出したり、割れ目が広げられる現象によって岩盤状態が変化する可能性がある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	掘削影響領域の拡大に伴い、ボーリング孔周辺岩盤の割れ目充填物の流出や割れ目の拡大が発生する可能性がある。その結果、母岩の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(A2)(M→H)。【ボーリング孔周辺母岩の選択的な流路形成】	
M	孔内透水試験時の事故・人的要因による限界圧力を越えた過剰な注水圧の付与に伴い、ボーリング孔周辺の母岩へ作用する地圧や岩盤の力学特性に影響を及ぼし、掘削影響領域の拡大につながる可能性がある(A2)(M)。【ボーリング孔周辺母岩の選択的な流路形成】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
A2	ボーリング孔周辺母岩の選択的な流路形成	注水測定時の注入圧の管理作業の事故・人的要因による限界圧を越えた過剰な注入圧の付与

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (1/21)

【工学技術の分類】 坑道建設－坑道掘削－発破掘削方式		
【事故・人的要因整理番号】 B1-1、B1-2、B2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	発破計画は、周辺地山の緩みが少なく、余堀りの少ない平滑な掘削面を得るよう、穿孔長、穿孔径、芯抜き方式、穿孔配置、爆薬の種類や使用量、雷管の種類・配置を定めなければならない。	
手順	①穿孔、②火薬・雷管の装填、③発破作業	
適用上の留意点	地山の緩みには、火薬の使用量、周辺孔の間隔、装薬量の影響が大きい。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B1-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B1-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】 掘削断面形状の過大な不陸の形成により、坑道埋め戻し後に、埋め戻し材と坑道壁面との界面に空洞が形成される可能性がある。その結果、埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の地下水流動に影響する可能性がある(B2)(H)。【掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出】	
M	周辺岩盤に対する過剰な衝撃により、坑道周辺岩盤に作用する地圧や岩盤の力学特性に影響を与える可能性がある。その場合、坑道の掘削影響による掘削影響領域の形成・拡大が生じることが考えられる(B1-1、B1-2)(M)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B1-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	爆薬の使用量、周辺孔の間隔、装薬量調整作業の事故・人的要因による周辺岩盤に対する過剰な衝撃
B1-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	
B2	掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	爆薬の使用量、周辺孔の間隔、装薬量調整作業の事故・人的要因による掘削断面形状の過大な不陸形成

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (2/21)

【工学技術の分類】 坑道建設－坑道掘削－自由断面掘削方式		
【事故・人的要因整理番号】 B3-1、B3-2、B4		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	自由断面掘削方式には、ブーム掘削機、バックホウ、大型ブレーカーおよび割岩機などが用いられる。	
手順	①ブーム掘削機、バックホウ、大型ブレーカーおよび割岩機等による掘削	
適用上の留意点	掘削機械は発破掘削に比べ、地山を緩めることが少ない。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B3-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B3-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】 掘削断面形状の過大な不陸の形成により、坑道埋め戻し後に、埋め戻し材と坑道壁面との界面に空洞が形成される可能性がある。その結果、埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の地下水流動に影響する可能性がある(B4)(H)。【掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出】	
M	周辺岩盤に対する過剰な衝撃により、坑道周辺岩盤に作用する地圧や岩盤の力学特性に影響を与える可能性がある。その場合、坑道の掘削影響による掘削影響領域の形成・拡大が生じることが考えられる(B3-1、B3-2)(M)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B3-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	掘削作業の事故・人的要因による周辺岩盤に対する過剰な衝撃
B3-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	
B4	掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	掘削作業の事故・人的要因による掘削断面形状の過大な不陸形成

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (3/21)

【工学技術の分類】 坑道建設－坑道掘削－全断面掘削方式		
【事故・人的要因整理番号】 B5-1、B5-2、B6		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	TBM は、カッターヘッドを回転させながら岩盤に押しつけて掘削を行う一般に円形の全断面トンネル掘削機で、これを用いた工法を TBM 工法という。	
手順	①TBMによる掘進、②ズリ搬出、③カッター交換、④設備延伸作業	
適用上の留意点	支保工設置位置は、カッターヘッドから0.5D～2.0D(Dは掘削径)となることから、とくに切羽の安定性の悪い不良地山では、支保作業までに肌落ち、崩壊等の地山の緩み量が増大し、通常のトンネル掘削と比べて、支保工設置時の掘削面の安定性が問題となる。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B5-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B5-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】 掘削断面形状の過大な不陸の形成により、坑道埋め戻し後に、埋め戻し材と坑道壁面との界面に空洞が形成される可能性がある。その結果、埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の地下水流動に影響する可能性がある(B6)(H)。【掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出】	
M	カッターヘッドと支保工設置位置関係により、切羽の安定性の悪い不良地山では、支保作業の事故・人的要因に伴い、支保効果が適切に発現されないことが考えられる。その場合、坑道周辺岩盤に作用する地圧や岩盤の力学特性に影響を与える可能性がある。その結果、坑道の掘削影響による掘削影響領域の形成・拡大が生じることが考えられる(B5-1、B5-2)(M)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B5-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	支保作業の事故・人的要因による掘削影響領域の拡大
B5-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	
B6	掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	支保作業の事故・人的要因による掘削断面形状の過大な不陸形成

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (4/21)

【工学技術の分類】 坑道建設－坑道掘削－ズリ運搬(タイヤ方式)		
【事故・人的要因整理番号】 B7-1、B7-2、B8		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	坑内から仮置き場までの運搬方式はタイヤ方式、レール方式、連続ベルトコンベヤー方式がある。	
手順	①ズリ積み(坑内での積み込み作業)、②ズリ運搬(坑内から仮置き場までの運搬作業)、③ズリ置き(坑内外での仮置き等)	
適用上の留意点	タイヤ方式を採用する場合、排水、湧水の処理に対する注意を怠ると掘削中のトンネル内の路盤は荒れやすく、また、いったん路盤が荒れ不陸が生ずると、たとえ湧水の影響を受けていなくても、加速度的に路盤の状態は悪くなる。特に、施工機械の大型化によって、その傾向は大きい。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B7-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B7-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】 掘削断面形状の過大な不陸の形成により、坑道埋め戻し後に、埋め戻し材と坑道壁面との界面に空洞が形成される可能性がある。その結果、埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の地下水流動に影響する可能性がある(B8)(H)。【掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出】	
M	トンネル路盤の管理作業の事故・人的要因などにより、路盤の荒れが発生する。その場合、坑道周辺岩盤に作用する地圧や岩盤の力学特性に影響を与える可能性がある。その結果、坑道の掘削影響による掘削影響領域の形成・拡大が生じることが考えられる(B7-1、B7-2)(M)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B7-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	トンネル路盤の管理作業の事故・人的要因(排水・湧水処理不良、路盤の養生不良など)による路盤の荒れに伴う掘削影響領域の拡大
B7-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	
B8	掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	トンネル路盤の管理作業の事故・人的要因(排水・湧水処理不良、路盤の養生不良など)による路盤の荒れに伴う掘削ズリの残存

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (5/21)

【工学技術の分類】 坑道建設—支保工—吹き付けコンクリート方式		
【事故・人的要因整理番号】 B9-1、B9-2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	吹き付けコンクリートは、トンネル壁面にコンクリートを面的に密着して設置する支保部材である。吹き付けコンクリートの支保機能は、掘削に伴って生ずる地山の变形や外力による圧縮やせん断等に抵抗することにある。	
手順	①吹き付けコンクリートの現場配合、②吹き付け作業	
適用上の留意点	吹き付けの支保効果を適切に発揮させるには、コンクリートの配合、浮き石の除去、ノズルの操作、吹き付け面の平滑化、吹き付け厚さの確保、吹き付け面への適切な付着が重要である。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B9-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B9-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
M	吹き付けコンクリートの支保効果発現不良に伴い、坑道周辺岩盤へ作用する地圧、岩盤の力学特性に影響を与える可能性がある。その結果、坑道の掘削影響による掘削影響領域の拡大が生じることが考えられる(B9-1、B9-2)(M)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B9-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	コンクリート配合作業の事故・人的要因によるコンクリート品質低下 掘削面浮き石除去作業、ノズル操作作業および湧水処理作業の事故・人的要因によるコンクリート付着性低下
B9-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	地山平滑化作業の事故・人的要因による支保部材の応力伝達不良

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (6/21)

【工学技術の分類】 坑道建設—支保工—ロックボルト方式		
【事故・人的要因整理番号】 B10-1、B10-2、B11		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ロックボルトは地山と鉄筋を一体化し、地山の塑性化とその拡大(掘削影響領域の形成とその拡大)を抑制する効果などを有している。この効果発現には地山と鉄筋が適切に定着していることが重要である。	
手順	①ロックボルト孔の穿孔、②孔内のくり粉の清掃、③ロックボルトの挿入・モルタルを用いた定着、④プレート・ナットによるロックボルトの固定	
適用上の留意点	<p>ロックボルト定着力不足につながる要因として、以下の事項がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> 穿孔時における穿孔水やロッドのたわみなどが原因となる孔の拡大や孔荒れ 所定の深さまでのロックボルト挿入を阻害するくり粉の存在 定着材であるモルタルの必要以上の口元からの漏洩 固定作業時で使用するプレートと吹付け面との密着不良 <p>また、ロックボルト穿孔時に過大な衝撃が地山に加わった場合、地質条件によっては、落盤・落石が発生する可能性がある。その落盤・落石の大きさによっては、坑道壁面に過大な不陸が形成される可能性がある。</p>	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	<p>掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B10-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】</p> <p>掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B10-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】</p> <p>掘削断面形状の過大な不陸の形成により、坑道埋め戻し後に、埋め戻し材と坑道壁面との界面に空洞が形成される可能性がある。その結果、埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の地下水流動に影響する可能性がある(B11)(H)。【掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出】</p>	
M	ロックボルトの定着力不足により、掘削影響領域が拡大し、母岩の応力場への影響など、力学的影響が考えられる(B10-1、B10-2)。 【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B10-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	穿孔時の事故・人的要因による孔の拡大や孔荒れ 孔内清掃時の事故・人的要因によるくり粉の残留
B10-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	定着材の充填時の事故・人的要因によるモルタルの流出 固定時の事故・人的要因によるプレートと吹付け面との密着不良
B11	掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	穿孔時の事故・人的要因による過剰な地山への衝撃

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (7/21)

【工学技術の分類】 坑道建設－支保工－鋼製支保工方式		
【事故・人的要因整理番号】 B12-1、B12-2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	鋼製支保工は吹付けコンクリート等と一体となって地山に密着し、トンネルの安定化を図る。	
手順	①鋼製支保工の建て込み、②鋼製支保工の連結、③吹付けコンクリートによる地山との一体化作業	
適用上の留意点	支保効果を発現させるためには鋼製支保工と吹付けコンクリートを一体化させなければならない。そのためには、鋼製支保工の背面に空洞が生じないように、吹付けコンクリートを入念に施工する必要がある。また、建て込み時にねじれや倒れがないようにする必要がある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B12-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B12-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
M	地山と鋼製支保工の一体化不良により、支保工化が発現しない可能性がある。その結果、坑道周辺岩盤の掘削影響領域が拡大する可能性がある(B12-1、B12-2)(M)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B12-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	鋼製支保工の連結作業の事故・人的要因による支保効果発現不良 吹付け作業の事故・人的要因による地山と鋼製支保工の一体化不良に伴う支保効果発現不良
B12-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	不良

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (8/21)

【工学技術の分類】 坑道建設－覆工－覆工コンクリート方式		
【事故・人的要因整理番号】 B13		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	山岳工法トンネルでは、支保工で地山を安定させ、地山の変形が収束してから覆工を施工する。そのため、覆工には外力は作用しないと考えられ、通常、覆工に力学的機能を付加させないことが多い。	
手順	①型枠の製作、据え付け、②覆工コンクリートの現場配合、③運搬、④打ち込み、締固め、⑤養生作業	
適用上の留意点	天端部の未充填防止のためには、コンクリートの流動性が重要である。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性や事象への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	コンクリートの流動性が確保されず、天端部の覆工コンクリートに未充填部が発生し、天端部の覆工背面に連続した空洞が形成される可能性がある。その結果、埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の水理学的影響(B13)が考えられる。【掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B13	掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	覆工コンクリートの現場配合作業の事故・人的要因による天端部未充填に伴う覆工背面の連続的な空洞形成

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (9/21)

【工学技術の分類】 坑道建設—インバート—インバートコンクリート方式		
【事故・人的要因整理番号】 B14-1、B14-2、B15		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	インバート設置が必要な地山条件としては不良地山、劣化の進行により長期的安全性を損なうおそれのある地山、ズリ出しにより路盤の泥ねい化が予想される地山などである。	
手順	①打ち込み箇所の清掃・排水、②型枠の製作、据え付け、③コンクリートの現場配合、④運搬、⑤打ち込み、締固め、⑥養生作業	
適用上の留意点	インバートには、土圧、水圧、塑性地圧の作用による側壁部の変位防止機能、地山の劣化防止機能などの力学的機能を有する必要がある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	インバートコンクリート背面に掘削ズリが過度に残存した場合、坑道埋戻し後、その掘削ズリ自体が選択的な流路となり、埋め戻し材への水理学的影響が考えられる(B14)(H)。【掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出】掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B15-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B15-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
M	インバートコンクリートの支保効果(土圧・水圧・塑性地圧に対する防止効果、地山の劣化防止の効果)が発現しない可能性がある。その結果、坑道周辺岩盤の掘削影響領域の拡大が拡大する可能性がある(B15-1、B15-2)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B14	掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	打ち込み箇所の清掃・排水作業の事故・人的要因によるインバートコンクリート背面の掘削ズリの残存
B15-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	インバートコンクリートの現場配合、運搬、打ち込み、締固め、養生作業の事故・人的要因によるインバートコンクリートの地山に対する支保効果(土圧・水圧・塑性地圧に対する変形防止効果、地山の劣化防止の効果)の発現不良
B15-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (10/21)

【工学技術の分類】 坑道建設－防水工－防水シート方式		
【事故・人的要因整理番号】 B16, B17		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	トンネルの漏水は、覆工やトンネル内諸設備の機能や耐久性を低下させることから適切な防水工、排水工等を設置する必要がある。	
手順	①吹付けコンクリート面の不陸処理、ロックボルト頭部の処理、集中湧水箇所での適切な導水処理、②防水シートの張り付け、③防水シートの現場接合作業	
適用上の留意点	山岳トンネルの防水工は、シート防水、吹付け防水、塗膜防水の三工法が代表的であるが、現状では、品質のばらつきが少なく、信頼性の高い防水層を形成できるシート防水工法が多用されている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	坑道漏水による緩衝材ブロックのひび割れ・剥離が発生した場合、緩衝材ブロック定置後に、緩衝材の密度、間隙率および間隙構造に影響を与える可能性がある。その結果、緩衝材の水理学的影響(B16)が考えられる。【緩衝材ブロックのひび割れ・剥離】 漏水による緩衝材定置時の含水比調整不良が生じた場合、緩衝材の密度、間隙率および間隙構造に影響を与える可能性がある。その結果、緩衝材の水理学的影響(B17)が考えられる。【緩衝材の初期含水比不良】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B16	緩衝材ブロックのひび割れ・剥離	打ち込み箇所の清掃・排水作業の事故・人的要因によるインバートコンクリート背面の掘削ズリの残存
B17	緩衝材の初期含水比不良	インバートコンクリートの現場配合、運搬、打ち込み、締固め、養生作業の事故・人的要因によるインバートコンクリートの地山に対する支保効果(土圧・水圧・塑性地圧に対する変形防止効果、地山の劣化防止の効果)の発現不良

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (11/21)

【工学技術の分類】 坑道建設－排水工－排水管の敷設による方式		
【事故・人的要因整理番号】 B18-1、B18-2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	排水工は、原則として路盤の勾配と同じとし、路盤の下面に集まる湧水を集水できる構造とすることが望ましい。	
手順	①敷き面の掘削、②排水管の敷設	
適用上の留意点	覆工背面に集まる湧水は、トンネル断面のもっとも低い位置を流れようとするため、排水工の位置が適切でないと施工基面付近に帯水し、車両、列車などの走行に伴う繰り返し荷重により間隙水圧が上昇し、噴泥などによる路盤劣化の原因となる。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B18-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B18-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
M	排水管の設置作業、排水工設置位置の選定作業の事故・人的要因により、路盤上の排水がうまく行かず、車両走行に伴い路盤の劣化が進行し、坑道の掘削影響領域の緩みの形成・拡大が生じる可能性がある(B18-1、B18-2)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B18-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	排水管の設置作業の事故・人的要因。排水工設置位置の選定作業の事故・人的要因により、路盤上の排水不良
B18-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】(12/21)

【工学技術の分類】坑道建設－排水工－水抜きボーリング		
【事故・人的要因整理番号】B19、B20、B21-1、B21-2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	水抜きボーリングは、ボーリング機またはドリルジャンボを利用して水を抜き、水圧、地下水を下げる方法であり、一般に多く利用されている。	
手順	①水抜き孔の掘削、②自然流下またはポンプ排水作業	
適用上の留意点	排水による細流分の流出等が懸念される場合には十分に注意して適用する必要がある。また、過度に水を抜いて地山の含水量を極端に低下させると、かえって切羽の崩壊を引き起こす場合もある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	湧水量の低減不良となり、緩衝材定置時の含水比調整が上手くいかず、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、その結果、水理学的影響(B19)(H)が考えられる【緩衝材の初期含水比不良】。 湧水量の低減不良となり、緩衝材定置後の流出が発生することにより、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造の変化が生じ、その結果、水理学的影響(B20)(H)が考えられる【湧水量低減不良に伴う緩衝材の流出】。 掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B21-1)(M→H)【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B21-2)(M→H)【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
M	地下水の排水不良により、過剰な地下水圧が坑道周辺に発生した場合、掘削影響領域が拡大することが考えられる(B21-1、B21-2)(M)【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B19	緩衝材の初期含水比不良	孔内洗浄作業の事故・人的要因による目詰まりやポンプ排水作業の事故・人的要因による地下水排除不良に伴う緩衝材原位置締め時の含水比調整不良
B20	湧水量低減不良に伴う緩衝材の流出	孔内洗浄作業の事故・人的要因による目詰まりやポンプ排水作業の事故・人的要因による地下水排除不良に伴う緩衝材定置後の緩衝材の流出
B21-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	孔内洗浄作業の事故・人的要因による目詰まりやポンプ排水作業の事故・人的要因による地下水排除不良に伴う過剰な地下水圧の地山への作用
B21-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (13/21)

【工学技術の分類】 坑道建設—止水エーグラウト方式		
【事故・人的要因整理番号】 B22、B23、B24-1、B24-2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	グラウトは地山の亀裂や空隙などの水みちを閉塞することにより地山の透水性を低下させる効果や地山を安定化させる効果がある。	
手順	①注入孔の掘削、②注入材料の配合および練り混ぜ、③注入材料の注入作業	
適用上の留意点	注入形態は浸透注入として、割裂注入は行わない。注入材料の配合や注入圧力は、水みちへの閉塞材料の充填状況に影響する。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	湧水低減効果が得られず、緩衝材定置時の含水比調整不良が発生し、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、その結果、水理学的影響(B22)(H)が考えられる。【緩衝材の初期含水比不良】 湧水低減効果が得られず、緩衝材定置後の流出が発生することにより、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、その結果、水理学的影響(B23)(H)が考えられる。【湧水量低減不良に伴う緩衝材の流出】 掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B24-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B24-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
M	注入作業の事故・人的要因により、坑道周辺の地山安定化効果不良が発生した場合、掘削影響領域の拡大することが考えられる(B24-1、B24-2)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B22	緩衝材の初期含水比不良	注入材料配合作業や注入圧力管理作業の事故・人的要因により、地山からの湧水低減効果が得られず、緩衝材定置作業時の含水比調整不良が発生
B23	湧水量低減不良に伴う緩衝材の流出	注入材料配合作業や注入圧力管理作業の事故・人的要因により、地山からの湧水低減効果が得られず、緩衝材定置後に緩衝材と処分孔／坑道との界面に水流が発生し、緩衝材を流出させる。
B24-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	注入材料配合作業や注入圧力管理作業の事故・人的要因により、地山安定化の効果が得られず、掘削影響領域が拡大する。
B24-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】(14/21)

【工学技術の分類】 坑道建設一切羽安定対策—天端部の安定対策(先受け工方式)		
【事故・人的要因整理番号】 B25-1、B25-2、B26		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	天端安定対策は、掘削に先立ち切羽前方のアーチ天端部に先受け材等を施工することで天端の安定を確保するものである。	
手順	①穿孔、②先受け材の挿入、③注入材の充填作業	
適用上の留意点	充填式フォアポーリングは天端の崩壊や崩落対策として一般的であり、対策の初期段階に採用されることが多い。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B25-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B25-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】 掘削断面形状の過大な不陸の形成により、坑道埋め戻し後に、埋め戻し材と坑道壁面との界面に空洞が形成される可能性がある。その結果、埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の地下水流動に影響する可能性がある(B26)(H)。【掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出】	
M	先受け工の効果発現不良により、坑道天端部の安定性確保が困難となり、掘削影響領域の拡大することが考えられる(B25-1、B25-2)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B25-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	穿孔作業の事故・人的要因による孔の拡大・孔荒れ、孔内清掃作業の事故・人的要因によるくり粉の残留および、定着材充填作業の事故・人的要因によるモルタル流出に伴う定着力不足
B25-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	
B26	掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	穿孔作業の事故・人的要因による地山への過大な衝撃に伴う過大な不陸形成

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (15/21)

【工学技術の分類】 坑道建設一切羽安定対策－鏡面の安定対策(鏡吹きつけ方式)		
【事故・人的要因整理番号】 B27-1、B27-2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	鏡面安定対策としては、鏡吹きつけコンクリート、鏡ボルトおよび注入工法などがある。	
手順	①吹きつけコンクリートの現場配合、②吹きつけ作業	
適用上の留意点	鏡吹きつけの支保効果を適切に発揮させるには、コンクリートの配合、浮き石の除去、ノズルの操作、吹きつけ面の平滑化、吹きつけ厚さの確保、吹きつけ面への適切な付着が重要である。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、地下水流動現象に影響する可能性がある(B27-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B27-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
M	吹きつけコンクリートの支保効果発現不良が生じた場合、応力伝達不良となり、坑道周囲の安定性が確保されず、掘削影響領域の拡大することが考えられる(B27-1、B27-2)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B27-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	コンクリート配合作業の事故・人的要因によるコンクリート品質低下 掘削面浮き石除去作業、ノズル操作作業および湧水処理作業の事故・人的要因によるコンクリート付着性低下
B27-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	地山平滑化作業の事故・人的要因による支保部材の応力伝達不良

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】 (16/21)

【工学技術の分類】 坑道建設－通気工－風管・扇風機を用いる方式		
【事故・人的要因整理番号】 B28、B29		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	通気設備としては一般に局部扇風機が用いられ、扇風機からは風管が取り付けられている。	
手順	①風管の設置、②扇風機の設置、③通気設備の運転作業	
適用上の留意点	通気的方式には吹込式、吸出式、両者の併用方式などがある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	坑道内湿度上昇による緩衝材ブロックのひび割れ・剥離が発生した場合、緩衝材の密度、間隙率・間隙構造が変化し、水理学的影響が考えられる(B28)。【緩衝材ブロックのひび割れ・剥離】 坑道内湿度上昇による緩衝材定置時の含水比調整不良が生じた場合、緩衝材の密度、間隙率・間隙構造が変化し、水理学的影響が考えられる(B29)。【緩衝材の初期含水比不良】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B28	緩衝材ブロックのひび割れ・剥離	風管設置作業や管理作業、通気設備運転作業の事故・人的要因、電源の喪失による坑道内湿度の上昇に伴う、緩衝材ブロックのひび割れ・剥離
B29	緩衝材の初期含水比不良	風管設置作業や管理作業、通気設備運転作業の事故・人的要因、電源の喪失による坑道内湿度の上昇に伴う、緩衝材原位置締固め時の緩衝材含水比調整不良

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】(17/21)

【工学技術の分類】 処分孔建設－処分孔掘削－ダウンザホールハンマー方式		
【事故・人的要因整理番号】 B30-1、B30-2、B31		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ダウンザホールハンマー方式は、ドリルロッドの先端にエアーハンマを接続して削孔深度に応じて上部にロッドを継ぎ足す方式である。	
手順	①圧縮空気を用いたピストン振動による打撃掘削、②エアーによるスライム(掘り屑)の除去	
適用上の留意点	超硬岩盤を確実に掘削できるという点では、ロータリー掘削工法よりも処分孔掘削の適用性は高いものと思われる。ただし、大規模な圧縮空気設備を必要とする。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴い、母岩の間隙率・間隙構造の変化が生じ、母岩の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B30-1)(M→H)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する緩衝材が流出し、緩衝材の密度が変化し、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B30-2)(M→H)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出】 孔壁の過大な不陸形成を要因とした緩衝材定置後の緩衝材の流出が発生した場合、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、水理学的影響(B31)(H)が考えられる。【掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出】	
M	掘削時の過剰な衝撃が発生した場合、処分孔周辺の安定性が確保されず掘削影響領域の拡大することが考えられる(B30-1、B30-2)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大、処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B30-1	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大	打撃掘削作業での地山への衝撃力伝達時の事故・人的要因による過剰な衝撃に伴う掘削影響領域の拡大
B30-2	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出	
B31	掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出	打撃掘削作業での地山への衝撃力伝達時の事故・人的要因による過剰な衝撃に伴う孔壁の過大な不陸形成

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】(18/21)

【工学技術の分類】 処分孔建設－処分孔掘削－ロータリー掘削方式		
【事故・人的要因整理番号】 B32-1、B32-2、B33		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ドリルパイプ先端に取り付けたローラービットにドリルカラーで荷重をかけ、ロータリーテーブルまたはパワースイベルでドリルストリングスを回転させ岩盤を掘削する工法である。	
手順	①掘削機械によりビットを回転させた掘削、②送水または無水によるスライム(掘り屑)の除去	
適用上の留意点	短時間に処分孔を掘削して次の処分孔に移動するために、カッターヘッドとカッターホイールが直交して回転する二軸回転機構を採用した掘削・ズリ搬出機械が検討されている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴い、母岩の間隙率・間隙構造の変化が生じ、母岩の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B32-1)(M→H)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する緩衝材が流出し、緩衝材の密度が変化し、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B32-2)(M→H)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出】 孔壁の過大な不陸形成を要因とした緩衝材定置後の緩衝材の流出が発生した場合、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、水理学的影響(B33)(H)が考えられる。【掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出】	
M	掘削時の過剰な衝撃が発生した場合、処分孔周辺の安定性が確保されず掘削影響領域の拡大することが考えられる(B32-1、B32-2)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大、処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B32-1	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大	掘削作業時の給圧・回転数の設定作業の事故・人的要因による地山への過剰な衝撃に伴う掘削影響領域の拡大
B32-2	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出	
B33	掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出	掘削作業時の給圧・回転数の設定作業の事故・人的要因による地山への過剰な衝撃に伴う孔壁の過大な不陸形成

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】(19/21)

【工学技術の分類】 処分孔建設－処分孔安定性確保－吹きつけコンクリート方式		
【事故・人的要因整理番号】 B34-1、B34-2、B35		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	無支保で処分孔の安定が確保されない場合に実施する。	
手順	①吹きつけコンクリートの現場配合、②吹きつけ作業	
適用上の留意点	吹きつけの支保効果を適切に発揮させるには、コンクリートの配合、浮き石の除去、ノズルの操作、吹きつけ面の平滑化、吹きつけ厚さの確保、吹きつけ面への適切な付着が重要である。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴い、母岩の間隙率・間隙構造の変化が生じ、母岩の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B34-1)(M→H)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する緩衝材が流出し、緩衝材の密度が変化し、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B34-2)(M→H)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出】 孔壁の過大な不陸形成を要因とした緩衝材定置後の緩衝材の流出が発生した場合、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、水理学的影響(B35)(H)が考えられる。【掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出】	
M	吹きつけコンクリートの支保効果発現不良が生じた場合、応力伝達不良となり、処分孔周囲の安定性が確保されず、掘削影響領域の拡大することが考えられる(B34-1、B34-2)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大、処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B34-1	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大	コンクリート配合作業の事故・人的要因によるコンクリート品質低下、掘削面浮き石除去作業、ノズル操作作業および湧水処理作業の事故・人的要因によるコンクリート付着性低下、
B34-2	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出	地山平滑化作業の事故・人的要因による支保部材の応力伝達不良に伴う掘削影響領域の拡大
B35	掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出	処分孔底面掘削ズリ除去作業の事故・人的要因による吹きつけコンクリート背面の掘削ズリの残存

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】(20/21)

【工学技術の分類】 処分孔建設－処分孔安定性確保－補強リングによる方式		
【事故・人的要因整理番号】 B36-1、B36-2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	無支保で処分孔の安定が確保されない場合に実施する。処分孔壁は上部の肩部に応力が集中し、力学安定上の弱部になることが多いため、補強リングを設置することが考えられる。	
手順	現場打ちコンクリートを想定した場合、①型枠の製作、据え付け、②覆工コンクリートの現場配合、③運搬、④打ち込み、締固め、⑤養生作業	
適用上の留意点	ひび割れの原因はコンクリートに作用する外力によるひび割れ、収縮ひずみによるものがある。収縮ひずみの発生要因は温度収縮、乾燥収縮、自己収縮などがある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴い、母岩の間隙率・間隙構造の変化が生じ、母岩の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B36-1)(M→H)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する緩衝材が流出し、緩衝材の密度が変化し、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(B36-2)(M→H)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出】	
M	補強リングの支保効果発現不良により、処分孔周辺の安定性が確保されず、掘削影響領域が拡大することが考えられる(B36-1、B36-2)。【処分孔周辺の掘削影響領域の拡大、処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B36-1	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大	コンクリート現場配合、運搬、打ち込み、締固め、養生作業の事故・人的要因による支保効果発現不良に伴う処分孔周辺の掘削影響領域の拡大
B36-2	処分孔周辺の掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出	

Table II-2. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【建設段階】(21/21)

【工学技術の分類】 処分孔建設－処分孔湧水対策－鋼製ライナーによる方式		
【事故・人的要因整理番号】 B37、B38		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	鋼製ライナーは無支保で処分孔の安定が確保されない場合、緩衝材と地下水との接触を防止するために設置される。	
手順	①処分孔への鋼製ライナーの挿入、②ライナー背面のポンプ排水	
適用上の留意点	鋼製ライナーの浮き上がりを防止するために背面をポンプで排水する必要がある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	鋼製ライナー破損した場合、鋼製ライナーの水密性が喪失する。その結果、緩衝材定置時に緩衝材含水比調整不良により密度、間隙率、間隙構造の変化に伴う水理学的影響が考えられる(B37)。【緩衝材の初期含水比不良】 鋼製ライナー破損した場合、鋼製ライナーの水密性が喪失する。その結果、地下水流により緩衝材の流出が発生し、密度、間隙率、間隙構造の変化(B38)に伴う水理学的影響が考えられる。【湧水量低減不良に伴う緩衝材の流出】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
B37	緩衝材の初期含水比不良	鋼製ライナーの取扱い作業の事故・人的要因による落下や周辺設備への衝突を要因とした鋼製ライナー溶接部の破損による水密性の喪失に伴う緩衝材原位置締固め時の含水比調整不良
B38	湧水量低減不良に伴う緩衝材の流出	鋼製ライナーの取扱い作業の事故・人的要因による落下や周辺設備への衝突を要因とした鋼製ライナー溶接部の破損による水密性の喪失に伴う緩衝材の流出

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】(1/26)

【工学技術の分類】 ガラス固化体の製造から輸送—ガラス固化体の製造—LFCM 法		
【事故・人的要因整理番号】 C1、C2、C3		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ガラス固化体の製造プロセスである JNFL の LFCM 法は高レベル放射性廃液とガラス材料を同時にセラミック製溶融炉に投入し、溶融炉で溶融して高レベルガラス固化体とする方式である。	
手順	①廃液を混合槽で混合、②ナトリウム濃度の調整、③所定量の廃液を溶融炉に供給、④ガラスビーズの供給、⑤溶融炉で加熱・溶融、⑥加熱混合された廃液をキャニスタに流下、⑦冷却後、キャニスタ蓋の溶接、⑧検査後、貯蔵施設で保管	
適用上の留意点	JNFL の製造プロセスにおける作業の逸脱によって発生することが想定されるガラス固化体の例が示されている。逸脱ガラス固化体としては、イエローフェーズガラス固化体、ガラス充填量の少ないガラス固化体、キャニスタ蓋溶接不良のガラス固化体、破砕係数の大きいガラス固化体である。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	事故・人的要因に起因した直接的な水理学的影響は想定できない。	
M	ガラス固化体に過剰な衝撃が加わり、表面積の大きいガラス固化体が製造される(C2)(M)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】	
C	イエローフェーズガラス固化体が製造された場合、モリブデン酸のグループはホウケイ酸ガラスのネットワーク内には固定されないことから、ガラス固化体と地下水との接触後、ガラスの溶解性に影響を及ぼすことが考えられる(C1)。【イエローフェーズガラス固化体の発生】 ガラス表面積の大きいガラス固化体が製造された場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラス固化体の溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C2)(M→C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】 核種混合が不均質なガラス固化体(C3)が製造された場合、それらが埋設定置され、地下水と接触後に化学的影響が考えられる。【核種の混合が不均質な固化体の発生】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C1	イエローフェーズガラス固化体の発生	廃液調整作業の事故・人的要因により、ガラス流下運転時にイエローフェーズガラスが発生する。
C2	ガラス固化体のひび割れ・破壊	高レベルガラス固化体を取り扱う機器の故障や機器の運転作業の事故・人的要因により、高レベルガラス固化体の転倒、落下し、ガラス固化体の表面積が増加する。
C3	核種の混合が不均質な固化体の発生	廃液混合作業の事故・人的要因による核種の不均質混合

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】 (2/26)

【工学技術の分類】 ガラス固化体の製造から輸送—ガラス固化体の貯蔵管理—間接空冷方式		
【事故・人的要因整理番号】 C4		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	再処理の結果製造されたガラス固化体は、30～50年間冷却のために専用施設で貯蔵管理され、その後、地層処分施設まで輸送され、地下施設に搬入される。	
手順	①輸送容器の受入れ、②ガラス固化体の輸送容器からの抜き出し、③検査、④収納管への収納、⑤30～50年の冷却貯蔵	
適用上の留意点	ガラス固化体を貯蔵施設に収納する前に、次の7項目の検査・測定を実施している。外観検査、発熱量測定、重量測定、閉じ込め検査、表面汚染検査、放射能測定	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	事故・人的要因に起因した直接的な水理学的影響は想定できない。	
M	ガラス固化体に過剰な衝撃が加わりガラス表面積が増加する(C4)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】	
C	ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C4)(M→C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C4	ガラス固化体のひび割れ・破壊	ガラス固化体の輸送容器からの抜き出し、収納管への収納の作業時に、ガラス固化体を取り扱う機械の故障、装置の運転作業の事故・人的要因、電源の喪失などによるガラス固化体の転倒落下に伴う表面積の増加

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (3/26)

【工学技術の分類】 ガラス固化体の製造から輸送—ガラス固化体の輸送—海上輸送・陸上輸送による方式		
【事故・人的要因整理番号】 C5-1、C5-2、C5-3		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ガラス固化体の貯蔵管理後、発熱量や放射能レベル、寸法など必要な検査が行われた上で、専用輸送容器に収納されて処分場へ向け搬出される。ガラス固化体の輸送には海上輸送、陸上輸送について実績がある。	
手順	①検査、②専用輸送容器への挿入、③海上輸送、陸上輸送による処分場への輸送	
適用上の留意点	ガラス固化体の輸送には、専用の容器(キャスク)を用いる。この輸送容器は、放射線を遮へいする能力を備え、輸送中に事故(衝突、火災、沈没など)が発生しても放射性物質が漏れ出さないよう国が定めた基準に基づいて頑丈に作られている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	火災発生に伴い、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C5-2、C5-3)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生、火災発生に伴うガラス固化体の変質】	
H	事故・人的要因に起因した直接的な水理学的影響は想定できない。	
M	火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体に亀裂が発生することが考えられる(C5-2)(T→M)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生】	
C	ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C5-1)(C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】 火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C5-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生】 火災発生に伴う温度上昇により、ガラス固化体の変質が発生した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C5-3)(T→C)。【火災発生に伴うガラス固化体の変質】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C5-1	ガラス固化体のひび割れ・破壊	専用輸送容器への収納時の、ガラス固化体を取り扱う機器の故障、電源の喪失、運転作業の事故・人的要因によるガラス固化体の転倒・落下によるガラス表面積の増加 海上輸送、陸上輸送時の衝突事故によるガラス固化体の破損によるガラス表面積の増加
C5-2	火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生	海上輸送、陸上輸送作業時の事故・人的要因による衝突事故後に火災が発生した場合、ガラス固化体に熱応力が発生し、ガラス表面積の増加
C5-3	火災発生に伴うガラス固化体の変質	海上輸送、陸上輸送作業時の事故・人的要因による衝突事故後に火災が発生した場合、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体の変質を起こす。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (4/26)

【工学技術の分類】炭素鋼の製造からガラス固化体のオーバーパックへの封入－製鉄－製鉄・製鋼による方式		
【事故・人的要因整理番号】 C6		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	炭素鋼は、粉状の鉄鉱石と石灰石を高温で焼き固めた焼結石とコークスを高炉内で化学反応させて不純物を分離し、「銑鉄」を取り出す(製銑工程)。さらに、製鋼工程により不純物の除去や炭素含有量の調整を行う。	
手順	①製銑工程、粉状の鉄鉱石と焼結石とコークスを高炉内で化学反応させ不純物を分離、②製鋼工程(不純物の除去や炭素含有量の調整)	
適用上の留意点	製鉄時の品質管理作業の事故・人的要因により、炭素鋼に不純物が残存し、炭素鋼の延性が不足し、外力によりオーバーパックが破損する可能性が高まる。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	事故・人的要因に起因した直接的な水理学的影響は想定できない。	
M	不純物の影響で延性が不足し、炭素鋼の力学特性に影響を及ぼすことが考えられる(C→M)。	
C	不純物の残存や炭素量調整不良の炭素鋼が製造され、炭素鋼の化学組成が異なることが考えられる。【炭素鋼の延性不足】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C6	炭素鋼の延性不足	銑鉄、製鋼工程時の不純物除去作業や炭素含有量の調整作業の事故・人的要因により、不純物が混入した炭素鋼や炭素含有量が不適切な炭素鋼が発生する。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (5/26)

【工学技術の分類】炭素鋼の製造からガラス固化体のオーバーパックへの封入－オーバーパックの製作－鍛造によるオーバーパックの製作		
【事故・人的要因整理番号】 C7		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	鍛造による材料製造および成型加工は、現状技術で十分対応可能であり、特に問題ないことが試作を通じ確認されている。	
手順	オーバーパックの製作の工程は、①鍛造、②機械加工に大きく区分される。①鍛造は、炭素鋼を炉で1,000℃に加熱→素材の切り出し→筒状の胴体の製作→プレス機で加圧し、厚さ・高さ・端部の調整→自然冷却の順で行われる。②機械加工は、旋盤に胴体部を設置し、内側・外側の加工、蓋の旋盤での加工に区分される。	
適用上の留意点	オーバーパックを処分施設で受け入れる際に確認検査が行われるが、検査項目としては、記録確認、外観検査、寸法検査が挙げられている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	事故・人的要因に起因した直接的な水理学的影響は想定できない。	
M	オーバーパックのキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる。【オーバーパック表面へのキズ形成】	
C	地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(M→C)。【オーバーパック表面へのキズ形成】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C7	オーバーパック表面へのキズ形成	機械加工作業の事故・人的要因によりオーバーパック胴体部や蓋部にキズが形成される。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】(6/26)

【工学技術の分類】炭素鋼の製造からガラス固化体のオーバーパックへの封入－廃棄体封入－ガラス固化体の受け入れ(輸送容器による方式)		
【事故・人的要因整理番号】C8		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	処分場に輸送されたガラス固化体(輸送容器)は、専用輸送車両に積載された状態のままガラス固化体受け入れ・封入・検査施設へ搬入される。	
手順	①輸送容器受入、②輸送容器輸送、③輸送容器検査、④ガラス固化体抽出、⑤ガラス固化体仮置、⑥ガラス固化体検査、⑦ガラス固化体仮置	
適用上の留意点	ガラス固化体受入・封入・検査施設内では、輸送途上における輸送容器やガラス固化体への損傷などの異常発生の有無についての検査を行い、オーバーパックへの封入前にその健全性を確認することが必要である。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	事故・人的要因に起因した直接的な水理学的影響は想定できない。	
M	ガラス固化体に過剰な衝撃が加わりガラス表面積が増加する。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】	
C	ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(M→C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C8	ガラス固化体のひび割れ・破壊	ガラス固化体を輸送容器から引き出すときの、装置の故障、電源の喪失、装置の運転作業の事故・人的要因などによりガラス固化体が転倒・落下し、ガラス表面積が増加する。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】 (7/26)

【工学技術の分類】 炭素鋼の製造からガラス固化体のオーバーパックへの封入－廃棄体封入－ガラス固化体の受け入れ(溶接によるオーバーパックへの封入)		
【事故・人的要因整理番号】 C9、C10-1、C10-2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	溶接技術については、第2次取りまとめでの評価が高い代表的な高エネルギービーム溶接法である電子ビーム溶接、および代表的なアーク溶接法である TIG 溶接、MAG 溶接などを対象に、実規模の蓋構造試験体を用いた溶接試験が実施されている。	
手順	①オーバーパックへのガラス固化体の収納、②オーバーパック上蓋の溶接、③オーバーパック溶接部の検査	
適用上の留意点	TIG 溶接はその原理、使用実績、および一般的な評価からも、現時点では最も高品質の溶接が可能であることが確かめられている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	事故・人的要因に起因した直接的な水理学的影響は想定できない。	
M	ガラス固化体に過剰な衝撃が加わりガラス表面積が増加する(C9)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】 オーバーパック溶接部のキズへの外力の作用やオーバーパック溶接部の残留応力の発生により力学的影響(C10-1,C10-2)が考えられる。【オーバーパック溶接部への過大な残留応力の発生、オーバーパック溶接部へのキズ形成】	
C	ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C9)(C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】 オーバーパック溶接部に残留応力が発生すると、地下水組成によっては、地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C10-1)(M→C)。【オーバーパック溶接部への過大な残留応力の発生】 オーバーパック溶接部にキズが発生すると、地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C10-2)(M→C)。【オーバーパック溶接部へのキズ形成】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C9	ガラス固化体のひび割れ・破壊	オーバーパックへのガラス固化体収納時の装置の故障、電源の喪失、装置の運転作業の事故・人的要因などによりガラス固化体が転倒・落下し、ガラス表面積が増加する。
C10-1	オーバーパック溶接部への過大な残留応力の発生	溶接作業の事故・人的要因により、溶接部に過大な残留応力が発生する可能性がある。
C10-2	オーバーパック溶接部へのキズ形成	溶接作業の事故・人的要因により、溶接部にキズが形成する可能性がある。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】 (8/26)

【工学技術の分類】 ベントナイト原鉱の採取・加工ーベントナイト原鉱の採取ー露天堀・坑内堀による方式		
【事故・人的要因整理番号】 C11-1、C11-2、C11-3		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ベントナイト原鉱はベントナイト鉱山において、露天掘りまたは坑内掘りによって採取される。	
手順	①ベントナイト原鉱の分布・品質の確認、②掘削重機による採取、③原鉱の仕分け・仮置き	
適用上の留意点	ベントナイト鉱山では、ベントナイトの層厚が変化すると同様に、同一の層内での品質変化も考えられるので、安定した品質の確保方策が重要である。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材の膨潤圧力の変化に伴う水理学的影響が考えられる(C11-1、C11-2、C11-3) (C→M→H)。【緩衝材のスメクタイト含有量の不足、粘土プラグのスメクタイト含有量の不足、埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足】	
M	スメクタイト含有量の変化に伴い、緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材の膨潤圧などの力学特性に影響を及ぼす可能性がある(C11-1、C11-2、C11-3) (C→M)。【緩衝材のスメクタイト含有量の不足、粘土プラグのスメクタイト含有量の不足、埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足】	
C	原鉱の品質のばらつきが大きくなり、スメクタイト含有量が変化し、緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材の取着特性などに影響を及ぼす可能性がある(C11-1、C11-2、C11-3)。【緩衝材のスメクタイト含有量の不足、粘土プラグのスメクタイト含有量の不足、埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C11-1	緩衝材のスメクタイト含有量の不足	ベントナイト原鉱の品質確認作業、原鉱の仕分け作業の事故・人的要因により、ベントナイト品質のばらつきが大きくなり、スメクタイト含有量に影響を及ぼす。
C11-2	粘土プラグのスメクタイト含有量の不足	
C11-3	埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足	

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (9/26)

【工学技術の分類】 ベントナイト原鉱の採取・加工ーベントナイト原鉱の加工ー乾燥や粉碎による方式		
【事故・人的要因整理番号】 C12-1、C12-2、C12-3、C13-1、C13-2、C13-3		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ベントナイト鉱山で採取されたベントナイト原鉱は、工場で加工されベントナイト製品が製造される。	
手順	①原鉱の仕分けおよび天日乾燥、②活性化工程、③乾燥工程、④粉碎工程、⑤包装工程	
適用上の留意点	品質管理として原鉱の品質確認から、包装製品までの各段階で品質確認、規格適合判定が行われる。おもな検査項目としては、水分、粒度、膨潤力、pH、メチレンブルー吸着量などの基本物性に加え、粘性、鋳物砂試験などがある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材の膨潤圧力の変化に伴う水理学的影響が考えられる(C12-1、C12-2、C12-3)(C→M→H)。【緩衝材のスメクタイト含有量の不足、粘土プラグのスメクタイト含有量の不足、埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足】 ベントナイト粒径・含水調整不良により緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材の密度変化が考えられる。地下水の再冠水後に緩衝材の膨潤が進展し、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材の水理学的影響が考えられる(C13-1、C13-2、C13-3)(H)。【緩衝材の粒度分布不良、粘土プラグの粒度分布不良、埋め戻し材の粒度分布不良】	
M	スメクタイト含有量の変化に伴い、緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材の膨潤圧などの力学特性に影響を及ぼす可能性がある(C12-1、C12-2、C12-3)(C→M)。【緩衝材のスメクタイト含有量の不足、粘土プラグのスメクタイト含有量の不足、埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足】	
C	原鉱の品質のばらつきが大きくなり、スメクタイト含有量が変化し、緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材の収着特性などに影響を及ぼす可能性がある(C12-1、C12-2、C12-3)。【緩衝材のスメクタイト含有量の不足、粘土プラグのスメクタイト含有量の不足、埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C12-1	緩衝材のスメクタイト含有量の不足	原鉱の品質確認作業の事故・人的要因、原鉱の仕分け作業の事故・人的要因により、ベントナイトのスメクタイト含有量に影響する。
C12-2	粘土プラグのスメクタイト含有量の不足	
C12-3	埋め戻し材のスメクタイト含有量の不足	
C13-1	緩衝材の粒度分布不良	乾燥・粉碎、包装作業の事故・人的要因により、ベントナイトの粒径や含水量などの品質のばらつきが大きくなる。
C13-2	粘土プラグの粒度分布不良	
C13-3	埋め戻し材の粒度分布不良	

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (10/26)

【工学技術の分類】 ベントナイト材料の製作-緩衝材の製作-ケイ砂混合材料の製作(練り混ぜ方式)		
【事故・人的要因整理番号】 C14, C15		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ブロック方式や原位置締め固め方式で用いる材料の調整工程について述べる。	
手順	①ベントナイトとケイ砂のミキサーによる空練り、②水を投入しながらの練混ぜ、③混合材料の養生	
適用上の留意点	養生時間や攪拌条件が緩衝材の材料品質に影響を及ぼすことが分かっている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	緩衝材の初期含水比が不適切となった場合、緩衝材定置時に所定の密度を確保できない可能性がある。地下水の再冠水後に緩衝材の膨潤が進展し、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材の水理学的影響が考えられる(C14)。【緩衝材の初期含水比不良】 緩衝材の粒度特性が不適切となった場合、緩衝材定置時に所定の密度を確保できない可能性がある。地下水の再冠水後に緩衝材の膨潤が進展し、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材の水理学的影響が考えられる(C15)。【緩衝材の粒度分布不良】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C14	緩衝材の初期含水比不良	ミキサーの回転速度、時間の設定作業の事故・人的要因による混合材料が不均質となる要因および、練り混ぜ時の水の投入量計量作業の事故・人的要因による混合材料の含水比が不適切となる要因により緩衝材の密度に影響を及ぼす。
C15	緩衝材の粒度分布不良	ケイ砂とベントナイトの投入作業の事故・人的要因により、混合材料の粒度特性が不均質となり、緩衝材の密度に影響を及ぼす。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (11/26)

【工学技術の分類】 ベントナイト材料の製作-緩衝材の製作-緩衝材ブロックの製作(加圧方式)		
【事故・人的要因整理番号】 C16		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	緩衝材ブロック方式は、地上施設でプレス機により圧縮成形された緩衝材ブロックを地下施設に運搬し、真空把持装置による定置を実施するものである。	
手順	①材料を金型に充填、②プレス機による成形加圧、③緩衝材ブロックの金型からの取り出し、④緩衝材加工	
適用上の留意点	プレスによる圧縮成型時には材料条件を考慮した圧縮時間や速度、圧縮力の保持時間などを考慮することにより、型枠から取り出した後の緩衝材ブロックの寸法変化の影響を抑制することがある程度可能	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	緩衝材ブロックの寸法変化、ひび割れ、剥離などが生じた場合、緩衝材ブロック定置時に積み上げ誤差が生じ、ブロック間に隙間が生じる可能性がある。地下水の再冠水後に緩衝材の膨潤が進展し、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材の水理学的影響が考えられる(C16)。【緩衝材のブロックのひび割れ・剥離】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C16	緩衝材のブロックのひび割れ・剥離	プレス機による圧縮時間や速度、圧縮力の保持時間の管理作業の事故・人的要因により、緩衝材ブロックの寸法変化が生じる。 金型からのブロックの脱型作業の事故・人的要因により、ブロックにひび割れ・剥離が生じる。これらにより、緩衝材の密度に影響を及ぼす可能性がある。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】 (12/26)

【工学技術の分類】 ベントナイト材料の製作-緩衝材の製作-PEMの製作(鋼製セルの方式)		
【事故・人的要因整理番号】 C17、C18、C19		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	地上施設であらかじめ緩衝材と廃棄体を鋼製セル内に収納し、地下施設へ鋼製セルを輸送・定置する PEM方式が検討されている。	
手順	①鋼製セルの製作、②PEM 容器下部の設置、③リング状ブロックの組立て、④PEM 容器上部の設置、⑤オーバーパックの挿入、⑥端部ブロックの挿入、⑦PEM 容器端面蓋の設置	
適用上の留意点	リング状ブロックの組立て、端部ブロックの挿入には、把持方式として、フォーク方式、真空吸着方式が検討されている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	緩衝材ブロックの寸法変化、ひび割れ、剥離などが生じた場合、緩衝材ブロック定置時に積み上げ誤差が生じ、ブロック間に隙間が生じる可能性がある。地下水の再冠水後に緩衝材の膨潤が進展し、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材の水理学的影響が考えられる(C17)。【緩衝材ブロックのひび割れ・剥離】	
M	オーバーパックのキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C18)。【オーバーパック表面へのキズ形成】 ガラス固化体に過剰な衝撃が加わりガラス表面積が増加する(C19)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】	
C	地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C18) (M→C)。【オーバーパック表面へのキズ形成】 ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C19) (M→C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C17	緩衝材ブロックのひび割れ・剥離	リング状ブロックの組立て、オーバーパックの挿入、端部ブロックの挿入時の作業の事故・人的要因により緩衝材ブロックの変形・ひび割れ・剥離が生じ、緩衝材の密度に影響を及ぼす。
C18	オーバーパック表面へのキズ形成	PEM 容器へのオーバーパック挿入時の吊り上げ作業の事故・人的要因や装置の故障により、オーバーパックの転倒・落下が生じ、オーバーパック表面にキズ・変形が形成される。
C19	ガラス固化体のひび割れ・破壊	PEM 容器へのオーバーパック挿入時の吊り上げ作業の事故・人的要因や装置の故障により、オーバーパックの転倒・落下が生じ、オーバーパック内に挿入されているガラス固化体の表面積が増加する。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】 (13/26)

【工学技術の分類】 ベントナイト材料の製作-埋め戻し材の製作-埋め戻し材の製作(練り混ぜ方式)		
【事故・人的要因整理番号】 C20-1、C20-2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	埋め戻しに用いる埋め戻し材は、採用する埋め戻し工法などによって様々な仕様のものが考えられるが、基本的には埋め戻し後、長期にわたって地下水が流れにくいよう設計され、埋め戻し材製作・検査施設において製作される。	
手順	①現地発生材料調整、②混合、③移送、④貯蔵	
適用上の留意点	混合は、現地発生材調整で調整された骨材とベントナイト鉱物を混合し、所定の配合及び含水比の埋め戻し材を得る工程である。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	埋め戻し材の含水比にばらつきが生じた場合、坑道埋戻し後に、埋め戻し材の密度・間隙構造、間隙率に影響を及ぼす可能性がある。その結果、埋め戻し材への地下水流動現象に影響を及ぼすことが考えられる(C20-1)(H)。【埋め戻し材の初期含水比不良】 埋め戻し材の粒度など粒度特性にばらつきが生じた場合、坑道埋戻し後に、埋め戻し材の密度・間隙構造、間隙率に影響を及ぼす可能性がある。その結果、埋め戻し材への地下水流動現象に影響を及ぼすことが考えられる(C20-2)(H)。【埋め戻し材の粒度分布不良】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C20-1	埋め戻し材の初期含水比不良	現地発生材料の乾燥、破砕などの材料調整作業の事故・人的要因による埋め戻し材の品質のばらつき、および、骨材とベントナイトの混合作業時の水の投入量の計量作業の調整作業の事故・人的要因により埋め戻し材の含水比が不適切になる可能性がある。
C20-2	埋め戻し材の粒度分布不良	現地発生材料の乾燥、破砕などの材料調整作業の事故・人的要因による埋め戻し材の品質のばらつき、および、骨材とベントナイトの混合作業時の水の投入量の計量作業、ベントナイトと骨材の混合割合の調整作業、練り混ぜ時間や回転速度の調整作業の事故・人的要因により埋め戻し材の粒度分布が不適切になる可能性がある。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】(14/26)

【工学技術の分類】ベントナイト材料の製作-粘土プラグの製作-ケイ砂混合材料の製作		
【事故・人的要因整理番号】C20-3、C20-4		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ブロック方式や原位置締め固め方式で用いる材料の調整工程について述べる。	
手順	①ベントナイトとケイ砂のミキサーによる空練り、②水を投入しながらの練混ぜ、③混合材料の養生	
適用上の留意点	養生時間や攪拌条件が粘土プラグの材料品質に影響を及ぼすことが分かっている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	粘土プラグの初期含水比が不適切となった場合、粘土プラグ設置時に所定の密度を確保できない可能性がある。地下水の再冠水後に粘土プラグの膨潤が進展し、粘土プラグの密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、粘土プラグの水理学的影響が考えられる(C20-3)。【粘土プラグの初期含水比不良】 粘土プラグの粒度特性が不適切となった場合、粘土プラグ設置時に所定の密度を確保できない可能性がある。地下水の再冠水後に粘土プラグの膨潤が進展し、粘土プラグの密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、粘土プラグの水理学的影響が考えられる(C20-4)。【粘土プラグの粒度分布不良】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C20-3	粘土プラグの初期含水比不良	ミキサーの回転速度、時間の設定作業の事故・人的要因による混合材料が不均質となる要因および、練り混ぜ時の水の投入量計量作業の事故・人的要因による混合材料の含水比が不適切となる要因により緩衝材の密度に影響を及ぼす。
C20-4	粘土プラグの粒度分布不良	ケイ砂とベントナイトの投入作業の事故・人的要因により、混合材料の粒度特性が不均質となり、緩衝材の密度に影響を及ぼす。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】(15/26)

【工学技術の分類】ベントナイト材料の製作-粘土プラグの製作-粘土ブロックの製作(加圧方式)		
【事故・人的要因整理番号】C20-5		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	粘土ブロック方式は、地上施設でプレス機により圧縮成形された粘土ブロックを地下施設に運搬し、真空把持装置による定置を実施するものである。	
手順	①材料を金型に充填、②プレス機による成形加圧、③粘土ブロックの金型からの取り出し、④粘土ブロック加工	
適用上の留意点	プレスによる圧縮成型時には材料条件を考慮した圧縮時間や速度、圧縮力の保持時間などを考慮することにより、型枠から取り出した後の粘土ブロックの寸法変化の影響を抑制することがある程度可能	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	粘土ブロックの寸法変化、ひび割れ、剥離などが生じた場合、粘土ブロック設置時に積み上げ誤差が生じ、ブロック間に隙間が生じる可能性がある。地下水の再冠水後に緩衝材の膨潤が進展し、粘土プラグの密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材の水理学的影響が考えられる(C20-5)。【粘土プラグのひび割れ・剥離】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C20-5	粘土プラグのひび割れ・剥離	プレス機による圧縮時間や速度、圧縮力の保持時間の管理作業の事故・人的要因により、粘土ブロックの寸法変化が生じる。金型からのブロックの脱型作業の事故・人的要因により、ブロックにひび割れ・剥離が生じる。これらにより、粘土プラグの密度に影響を及ぼす可能性がある。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (16/26)

【工学技術の分類】 地下施設への搬送－オーバーバックの地下施設への搬送－輸送装置を用いた方式	
【事故・人的要因整理番号】 C21-1、C21-2、C21-3、C22-1、C22-2、C22-3、C22-4、C22-5、C22-6	
【工学技術の知見・要約版】	
概要・特徴	地上施設内での検査終了後、廃棄体を地下に搬送し坑道内に位置する。廃棄体の輸送に使用するアクセス坑道の形態や定置方式の組み合わせに応じ、搬送途中に廃棄体を縦方向または横方向に傾転する。
手順	①廃棄体輸送装置への積み込み、②廃棄体輸送装置のアクセス設備積み込み、③廃棄体のアクセス坑道搬送、④廃棄体輸送装置のアクセス設備積み降ろし、⑤廃棄体定置装置へ積み替え
適用上の留意点	アクセス立坑で廃棄体を搬送する場合には、重量物の搭載が可能な専用エレベータでの輸送になる。アクセス斜坑で搬送する場合には、トラックなどのタイヤ方式の搬送車両や軌道方式の搬送車両が考えられる。
【バリア特性への影響の想定】	
TH MC	バリア特性への影響
T	火災発生に伴い、オーバーバックの温度が上昇し、オーバーバックに熱応力への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C21-2、C21-3)。【火災発生に伴うオーバーバック表面へのキズ形成、火災発生に伴うオーバーバックの変質・融解】 火災発生に伴い、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C22-2、C22-3)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生、火災発生に伴うガラス固化体の変質】 火災発生に伴い、母岩の温度が上昇し、母岩への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C22-4、C22-5)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生、火災発生に伴う母岩の変質】
H	熱応力により母岩の亀裂の進展が発生した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C22-4)(T→M→H)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】 温度上昇により母岩の鉱物組成が変化した場合、母岩の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、地下水流動へ影響を与える可能性がある(C22-5)(T→C→H)。【火災発生に伴う母岩の変質】
M	オーバーバック表面のキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C21-1)(M)。【オーバーバック表面へのキズ形成】 火災発生に伴う熱応力により、オーバーバック表面にキズが形成した場合、オーバーバック表面のキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C21-2)(T→M)。【火災発生に伴うオーバーバック表面へのキズ形成】 ガラス固化体に過剰な衝撃が加わりガラス表面積が増加する(C22-1、C22-6)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】 火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体に亀裂が発生することが考えられる(C22-2)(T→M)。【火災発生に伴うガラス固化体のひび割れ・破壊】 火災発生に伴う熱応力により、母岩の亀裂の進展が発生する可能性がある(C22-4)(T→M)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】
C	地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C21-1)(M→C)。【オーバーバック表面へのキズ形成】 火災発生に伴う熱応力により、オーバーバック表面にキズが形成した場合、地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C21-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うオーバーバック表面へのキズ形成】 火災発生に伴う熱応力により、オーバーバックの変質・融解が発生した場合、地下水組成によっては、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C21-3)(T→C)。【火災発生に伴うオーバーバックの変質・融解】 ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C22-1、C22-6)(M→C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】 火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C22-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うガラス固化体のひび割れ・破壊】 火災発生に伴う温度上昇により、ガラス固化体の変質が発生した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C22-3)(T→C)。【火災発生に伴うガラス固化体の変質】 火災発生に伴う温度上昇により、母岩の鉱物組成が変化することが考えられる(C22-5)(T→C)。【火災発生に伴う母岩の変質】

【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C21-1	オーバーバック表面へのキズ形成	搬送装置への廃棄体の積込み、搬送装置から廃棄体の積降ろし、定置装置への積込み作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による廃棄体の転倒・落下、および、搬送装置によるアクセス坑道搬送時の装置の故障、運転操作作業の事故・人的要因による周辺設備や坑道壁面への衝突を要因としてオーバーバック表面にキズや変形が生じる可能性がある。
C21-2	火災発生に伴うオーバーバック表面へのキズ形成	廃棄体の地下施設への搬送時の衝突事故により火災が発生する可能性がある。オーバーバックに熱応力が発生し、オーバーバック表面にキズや変形が生じる可能性がある。
C21-3	火災発生に伴うオーバーバックの変質・融解	廃棄体の地下施設への搬送時の衝突事故により火災が発生する可能性がある。オーバーバックの温度が上昇し、オーバーバックに変質・融解が生じる可能性がある。
C22-1	ガラス固化体のひび割れ・破壊	搬送装置への廃棄体の積込み、搬送装置から廃棄体の積降ろし、定置装置への積込み作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による廃棄体の転倒・落下を要因として、ガラス固化体表面積が増加する可能性がある。
C22-2	火災発生に伴うガラス固化体のひび割れ・破壊	輸送作業時の事故・人的要因による衝突事故後に火災が発生した場合、ガラス固化体に熱応力が発生し、ガラス表面積の増加
C22-3	火災発生に伴うガラス固化体の変質	輸送作業時の事故・人的要因による衝突事故後に火災が発生した場合、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体が化学的変質を起こす。
C22-4	火災発生に伴う母岩への亀裂の発生	輸送作業時の事故・人的要因による衝突事故後に火災が発生した場合、母岩の温度が上昇し母岩の温度が上昇し、母岩の亀裂の進展が発生する。
C22-5	火災発生に伴う母岩の変質	輸送作業時の事故・人的要因による衝突事故後に火災が発生した場合、母岩の温度が上昇し母岩の温度が上昇し、母岩の鉱物組成の変化が発生する。
C22-6	ガラス固化体のひび割れ・破壊	搬送装置によるアクセス坑道搬送時の装置の故障、運転操作作業の事故・人的要因による周辺設備や坑道壁面への衝突を要因として、ガラス固化体表面積が増加する可能性がある。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (17/26)

【工学技術の分類】 地下施設への搬送-緩衝材ブロックの地下施設への搬送-輸送装置を用いた方式		
【事故・人的要因整理番号】 C23-1、C23-2、C23-3、C23-4、C23-5		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	ブロック方式は複数に分割した緩衝材ブロックをあらかじめ地上施設で製作し、地下に搬送して組み立てるものである。	
手順	①輸送装置への積み込み、②アクセス坑道搬送、③ positioning 装置への積み替え	
適用上の留意点	緩衝材ブロックの積み込み、積み卸しは、真空保持装置を用いたハンドリング技術が開発されている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	火災発生に伴い、緩衝材の温度が上昇し、緩衝材への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C23-2、C23-3)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生、火災発生に伴う緩衝材の変質】 火災発生に伴い、母岩の温度が上昇し、母岩への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C23-4、C23-5)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生、火災発生に伴う母岩の変質】	
H	緩衝材ブロックの寸法変化、ひび割れ、剥離などが生じた場合、緩衝材ブロック設置時に積み上げ誤差が生じ、ブロック間に隙間が生じる可能性がある。地下水の再冠水後に緩衝材の膨潤が進展し、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材の水理学的影響が考えられる(C23-1)(H)。【緩衝材のひび割れ・剥離】。 火災発生に伴う熱応力により、緩衝材に亀裂が発生した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(C23-2)(T→M→H)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】。 火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材の膨潤圧が変化した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造が変化し、緩衝材の地下水流動に影響を与える可能性がある(C23-3)(T→C→M→H)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】。 火災発生に伴う温度上昇により、母岩の亀裂の進展が発生した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C23-4)(T→M→H)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】 温度上昇により母岩の鉱物組成が変化した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C23-5)(T→C)。【火災発生に伴う母岩の変質】	
M	火災発生に伴う熱応力により、緩衝材に亀裂が発生した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を与える(C23-2)(T→M)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】 火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材の鉱物組成が変化した場合、緩衝材の膨潤圧に影響を及ぼすことが考えられる(C23-3)(T→C→M)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】 火災発生に伴う温度上昇により、母岩の亀裂の進展が発生する可能性がある(C23-4)(T→M)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】	
C	火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材の鉱物組成が変化することが考えられる(C23-3)(T→C)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】 火災発生に伴う温度上昇により、母岩の鉱物組成が変化することが、考えられる(C23-5)(T→C→H)。【火災発生に伴う母岩の変質】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C23-1	緩衝材ブロックのひび割れ・剥離	真空保持装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による緩衝材ブロックの転倒・落下。搬送装置によるアクセス坑道搬送時の装置の故障、運転操作作業の事故・人的要因により、搬送装置が周辺設備や坑道壁面に衝突する。その結果、緩衝材ブロックのひび割れ・剥離が生じ、緩衝材の密度に影響を及ぼす。
C23-2	火災発生に伴う緩衝材ブロックへの亀裂の発生	緩衝材ブロック搬送時の事故により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、緩衝材が高温にさらされ、緩衝材に亀裂が発生する可能性がある。
C23-3	火災発生に伴う緩衝材の変質	緩衝材ブロック搬送時の事故により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、緩衝材が高温にさらされ、緩衝材の鉱物組成など化学特性を変化させる可能性がある。
C23-4	火災発生に伴う母岩への亀裂の発生	緩衝材ブロック輸送作業時の事故・人的要因による衝突事故後に火災が発生した場合、母岩の温度が上昇し、母岩の亀裂の進展が発生する。
C23-5	火災発生に伴う母岩の変質	緩衝材ブロック輸送作業時の事故・人的要因による衝突事故後に火災が発生した場合、母岩の温度が上昇し、母岩の鉱物組成の変化が発生する。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (18/26)

【工学技術の分類】 定置-オーバーパックと緩衝材の定置-緩衝材ブロック方式	
【事故・人的要因整理番号】 C24-1、C24-2、C24-3、C24-5、C25-1、C25-2、C25-3、C26-1、C26-2、C26-3、C27	
【工学技術の知見・要約版】	
概要・特徴	ブロック方式は複数に分割した緩衝材ブロックをあらかじめ地上施設で製作し、地下に搬送して組み立てるものである。底部および側部の緩衝材ブロックを設置後、廃棄体を定置し上部緩衝材ブロックを設置する。
手順	①湧水処理、②孔底、孔壁の清掃処理、③底部、側部緩衝材ブロックの定置、④廃棄体の定置、⑤隙間の充填
適用上の留意点	処分孔竖置き定置方式では、緩衝材ブロック方式は、緩衝材ブロックの製作と真空把持装置を用いたハンドリング技術が開発されており、技術開発レベルは最も高いと考えられるため、ブロック方式が基本形態として考えられている。
【バリア特性への影響の想定】	
TH MC	バリア特性への影響
T	<p>火災発生に伴い、オーバーパックの温度が上昇し、オーバーパックへの熱応力の発生や温度上昇による変質の発生が考えられる(C24-2、C24-3)。【火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成、火災発生に伴うオーバーパックの変質・溶解】</p> <p>火災発生に伴い、母岩の温度が上昇し、母岩への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C24-4、C24-5)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生、火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>火災発生に伴い、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C25-2、C25-3)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生、火災発生に伴うガラス固化体の変質】</p> <p>火災発生に伴い、緩衝材の温度が上昇し、緩衝材への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C26-2、C26-3)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生、火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>
H	<p>火災発生に伴う温度上昇により、母岩の亀裂の進展が発生した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C24-4)(T→M→H)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】</p> <p>温度上昇により母岩の鉱物組成が変化した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C24-5)(T→C→H)。【火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>緩衝材ブロックの寸法変化、ひび割れ、剥離などが生じた場合、緩衝材ブロック定置時に積み上げ誤差が生じ、ブロック間に隙間が生じる可能性がある。地下水の再冠水後に緩衝材の膨潤が進展し、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C26-1)(H)。【緩衝材のひび割れ・剥離】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、緩衝材に亀裂が発生した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(C26-2)(T→M→H)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により鉱物組成が変化しさらに緩衝材の膨潤圧が変化した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造が変化する。緩衝材の地下水流動に影響を与える可能性がある(C26-3)(T→C→M→H)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p> <p>緩衝材と処分孔/坑道の孔底/坑底部に空洞や掘削ズリが残存した場合、地下水の浸潤に伴って、緩衝材が空間側へ流出する。その結果、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。緩衝材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C27)(H)。【掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出】</p>
M	<p>オーバーパックのキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C24-1)(M)。【オーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、オーバーパックのキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C24-2)(T→M)。【火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生による温度上昇により、母岩の亀裂の進展が発生する可能性がある(C24-4)(T→M)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】</p> <p>ガラス固化体に過剰な衝撃が加わりガラス表面積が増加する(C25-1)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体に亀裂が発生することが考えられる(C25-2)(T→M)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生】</p> <p>火災発生による温度上昇により、緩衝材の亀裂の進展が発生する可能性がある(C26-2)(T→M)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材の鉱物組成が変化した場合、緩衝材の膨潤圧に影響を及ぼすことが考えられる(C26-3)(T→C→M)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>

C	<p>地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C24-1)(M→C)。【オーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、オーバーパック表面にキズが形成した場合、地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C24-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、オーバーパックの変質・融解が発生した場合、地下水組成によっては、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C24-3)(T→C)。【火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、母岩の鉱物組成が変化することが考えられる(C24-5)(T→C)。【火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C25-1)(M→C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C25-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、ガラス固化体の化学的変質が発生した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C25-3)(T→C)。【火災発生に伴うガラス固化体の変質】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材の鉱物組成が変化することが考えられる(C26-3)(T→C)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>
---	--

【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C24-1	オーバーパック表面へのキズ形成	廃棄体定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による廃棄体の転倒・落下に伴うオーバーパックのキズや変形
C24-2	火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。オーバーパックの表面に熱応力が発生し、オーバーパック表面にキズや変形が生じる可能性がある。
C24-3	火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。オーバーパックの温度が上昇し、オーバーパックに変質・融解が生じる可能性がある。
C24-4	火災発生に伴う母岩への亀裂の発生	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。母岩の温度が上昇し、母岩の亀裂の進展が発生する。
C24-5	火災発生に伴う母岩の変質	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生した場合、母岩の温度が上昇し、母岩の鉱物組成の変化が発生する。
C25-1	ガラス固化体のひび割れ・破壊	廃棄体定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による廃棄体の転倒・落下に伴うガラス固化体の表面積増加
C25-2	火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生	廃棄体定置作業時の事故・人的要因により火災が発生した場合、ガラス固化体に熱応力が発生し、ガラス表面積の増加
C25-3	火災発生に伴うガラス固化体の変質	廃棄体定置作業時の事故・人的要因により火災が発生した場合、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体に変質を起こす。
C26-1	緩衝材ブロックのひび割れ・剥離	緩衝材ブロック定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因により緩衝材ブロックの転倒・落下した場合、緩衝材ブロックの変形・ひび割れ・剥離が発生し緩衝材の密度へ影響
C26-2	火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生	緩衝材ブロック定置時の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、緩衝材が高温にさらされ、緩衝材に亀裂が発生する可能性がある。
C26-3	火災発生に伴う緩衝材の変質	緩衝材ブロック定置時の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、緩衝材が高温にさらされ、緩衝材の鉱物組成など化学特性を変化させる可能性がある。
C27	掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出	処分孔／坑道の孔底／坑底の清掃処理作業、隙間充填作業の事故・人的要因による緩衝材と孔底／坑底の岩盤界面に空洞やズリの残存に伴う緩衝材の密度への影響

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】(19/26)

【工学技術の分類】 定置-オーバーバックと緩衝材の定置-原位置施工方式	
【事故・人的要因整理番号】 C28-1、C28-2、C28-3、C28-4、C28-5、C29-1、C29-2、C29-3、C30、C31-1、C31-2、C32、C33	
【工学技術の知見・要約版】	
概要・特徴	原位置施工方式は、緩衝材材料を地下に搬送し、原位置で所期の密度まで締固め施工するものである。
手順	①湧水処理、②孔底、孔壁の清掃処理、③底部緩衝材締固め、④内型枠の設置と緩衝材の締固め、⑤内型枠の脱型、⑥廃棄体の定置、⑦上部緩衝材の締固め、⑧隙間の充填
適用上の留意点	ハンマー打撃による衝撃が周辺岩盤に悪影響を与えないことを試験値と解析により確認している。
【バリア特性への影響の想定】	
TH MC	バリア特性への影響
T	<p>火災発生に伴い、オーバーバックの温度が上昇し、オーバーバックへの熱応力の発生や温度上昇による変質の発生が考えられる(C28-2、C28-3)。【火災発生に伴うオーバーバック表面へのキズ形成、火災発生に伴うオーバーバックの変質・溶解】</p> <p>火災発生に伴い、母岩の温度が上昇し、母岩への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C28-4、C28-5)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生、火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>火災発生に伴い、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C29-2、C29-3)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生、火災発生に伴うガラス固化体の変質】</p> <p>火災発生に伴い、緩衝材の温度が上昇し、緩衝材への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C31-1、C31-2)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生、火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>
H	<p>火災発生に伴う温度上昇により、母岩の亀裂の進展が発生した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C28-4)(T→M→H)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】</p> <p>温度上昇により母岩の鉱物組成が変化した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C28-5)(T→C→H)。【火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>廃棄体定置作業時の孔底／坑底の清掃および不陸の処理作業の事故・人的要因(原位置施工方式)。処分孔／坑道の孔底／坑底の清掃処理作業、隙間充填作業の事故・人的要因により、緩衝材と孔底／坑底の岩盤界面に空洞やズリの残存する可能性がある。地下水の再冠水後に緩衝材の流出が進展し、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C30)(H)。【掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、緩衝材に亀裂が発生した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(C31-1)(T→M→H)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により鉱物組成が変化しさらに緩衝材の膨潤圧が変化した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造が変化し、緩衝材の地下水流動に影響を与える可能性がある(C31-2)(T→C→M→H)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p> <p>原位置締固め作業時で含水比調整や締固めエネルギーが適切で無い場合、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率に影響を及ぼす。その結果、緩衝材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C32)(H)。【緩衝材の原位置締固め時の締固め不足】</p> <p>緩衝材と処分孔／坑道の孔底／坑底部に空洞や掘削ズリが残存した場合、緩衝材定置後に、緩衝材と岩盤界面に水流が発生し、緩衝材を侵食・流出させる可能性がある。さらに、地下水の浸潤に伴って、緩衝材が空間側へ膨潤する。その結果、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化し、緩衝材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C33)(H)。【緩衝材の初期含水比不良】</p>
M	<p>オーバーバックのキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C28-1)(M)。【オーバーバック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、オーバーバックのキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C28-2)(T→M)。【火災発生に伴うオーバーバック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、母岩の亀裂の進展が発生する可能性がある(C28-4)(T→M)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】</p> <p>ガラス固化体に過剰な衝撃が加わりガラス表面積が増加する(C29-1)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体に亀裂が発生することが考えられる(C29-2)(T→M)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、緩衝材に亀裂が発生することが考えられる(C31-1)(T→M)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材の鉱物組成が変化した場合、緩衝材の膨潤圧に影響を及ぼすことが考えられる(C31-2)(T→C→M)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>

C	<p>地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C28-1)(M→C)。【オーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、オーバーパック表面にキズが形成した場合、地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C28-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、オーバーパックの変質・融解が発生した場合、地下水組成によっては、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C28-3)(T→C)。【火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、母岩の鉱物組成が変化することが考えられる(C28-5)(T→C)。【火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C29-1)(M→C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C29-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、ガラス固化体の化学的変質が発生した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C29-3)(T→C)。【火災発生に伴うガラス固化体の変質】</p> <p>火災に伴う温度上昇により、緩衝材の鉱物組成が変化することが考えられる(C31-2)(T→C)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】</p>
---	--

【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】

番号	逸脱事象	事故・人的要因
C28-1	オーバーパック表面へのキズ形成	廃棄体定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による廃棄体の転倒・落下に伴うオーバーパックのキズや変形
C28-2	火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。オーバーパックの表面に熱応力が発生し、オーバーパック表面にキズや変形が生じる可能性がある。
C28-3	火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。オーバーパックの表面に熱応力が発生し、オーバーパック表面にキズや変形が生じる可能性がある。
C28-4	火災発生に伴う母岩への亀裂の発生	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。母岩の温度が上昇し、母岩の亀裂の進展が発生する。
C28-5	火災発生に伴う母岩の変質	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。母岩の温度が上昇し、母岩の鉱物組成の変化が発生する。
C29-1	ガラス固化体のひび割れ・破壊	廃棄体定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による廃棄体の転倒・落下に伴うガラス固化体の表面積増加
C29-2	火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生	廃棄体定置作業時の事故・人的要因により火災が発生した場合、ガラス固化体に熱応力が発生し、ガラス表面積の増加
C29-3	火災発生に伴うガラス固化体の変質	廃棄体定置作業時の事故・人的要因により火災が発生した場合、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体が化学的変質を起こす。
C30	掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出	処分孔／坑道の孔底／坑底の清掃処理作業、隙間充填作業の事故・人的要因による緩衝材と孔底／坑底の岩盤界面に空洞やズリの残存に伴う緩衝材の流出
C31-1	火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生	緩衝材の締固め作業時の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、緩衝材が高温にさらされ、緩衝材に亀裂が発生する可能性がある。
C31-2	火災発生に伴う緩衝材の変質	緩衝材の締固め作業時の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、緩衝材が高温にさらされ、緩衝材の鉱物組成など化学特性を変化させる可能性がある。
C32	緩衝材の原位置締固め時の締固め不足	緩衝材の締固め作業時の事故・人的要因により含水比の調整や締固めエネルギーが不適切となることがある。その結果、緩衝材の密度が目標値に達しない可能性がある。
C33	緩衝材の初期含水比不良	処分孔／坑道の孔底／坑底の清掃処理作業、隙間充填作業の事故・人的要因による緩衝材と孔底／坑底の岩盤界面に空洞やズリの残存。定置後、界面に水流が発生し、緩衝材を流出することによる緩衝材の密度への影響

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】(20/26)

【工学技術の分類】 定置-オーバーバックと緩衝材の定置-ペレット方式	
【事故・人的要因整理番号】 C34-1、C34-2、C34-3、C34-4、C34-5、C35-1、C35-2、C35-3、C36、C37-1、C37-2、C37-3	
【工学技術の知見・要約版】	
概要・特徴	ペレット充填方式は、廃棄体を定置するための底部緩衝材をブロック方式で施工し、その上に廃棄体を定置する。側部および上部緩衝材、地上で製作したペレット状の緩衝材を充填することにより構築する。
手順	①底部緩衝材をブロック方式で定置、②ブロック上に廃棄体を定置、③ペレット状緩衝材の充填
適用上の留意点	ペレット充填方式による施工試験が行われており、充填前のペレットの特性把握、ペレット充填後の密度分布(平均 1.3 Mg/m ³)の把握、ペレット充填時の安息角の把握と到達可能な密度、残存する空隙の位置などを確認している。
【バリア特性への影響の想定】	
TH MC	バリア特性への影響
T	<p>火災発生に伴い、オーバーバックの温度が上昇し、オーバーバックへの熱応力の発生や温度上昇による変質の発生が考えられる(C34-2、C34-3)。【火災発生に伴うオーバーバック表面へのキズ形成、火災発生に伴うオーバーバックの変質・溶解】</p> <p>火災発生に伴い、母岩の温度が上昇し、母岩への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C34-4、C34-5)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生、火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>火災発生に伴い、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C35-2、C35-3)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生、火災発生に伴うガラス固化体の変質】</p> <p>火災発生に伴い、緩衝材の温度が上昇し、緩衝材への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C37-2、C37-3)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生、火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>
H	<p>火災発生に伴う温度上昇により、母岩の亀裂の進展が発生した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C34-4)(T→M→H)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】</p> <p>温度上昇により母岩の鉱物組成が変化した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C34-5)(T→C→H)。【火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>緩衝材ブロックの寸法変化、ひび割れ、剥離などが生じた場合、緩衝材ブロック定置時に積み上げ誤差が生じ、ブロック間に隙間が生じる可能性がある。地下水の再冠水後に緩衝材の膨潤が進展し、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C36)(H)。【掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出】</p> <p>ペレット状緩衝材の充填作業不良により、隙間が残存した場合、地下水の浸潤に伴って、ペレット状緩衝材が空間側へ膨潤する。その結果、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化し、緩衝材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C37-1)(H)。【掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出】</p> <p>緩衝材に亀裂が発生した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(C37-2)(T→M→H)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により鉱物組成が変化しさらに緩衝材の膨潤圧が変化した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造が変化し、緩衝材の地下水流動に影響を与える可能性がある(C37-3)(T→C→M→H)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>
M	<p>オーバーバックのキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C34-1)(M)。【オーバーバック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、オーバーバックのキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C34-2)(T→M)。【火災発生に伴うオーバーバック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、母岩の亀裂の進展が発生する可能性がある(C34-4)(T→M)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】</p> <p>ガラス固化体に過剰な衝撃が加わりガラス表面積が増加する(C35-1)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体に亀裂が発生することが考えられる(C35-2)(T→M)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、緩衝材に亀裂が発生することが考えられる(C37-2)(T→M)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材の鉱物組成が変化した場合、緩衝材の膨潤圧に影響を及ぼすことが考えられる(C37-3)(T→C→M)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>

C	<p>地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C34-1)(M→C)。【オーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、オーバーパック表面にキズが形成した場合、地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C34-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、オーバーパックの変質・融解が発生した場合、地下水組成によっては、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C34-3)(T→C)。【火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、母岩の鉱物組成が変化することが考えられる(C34-5)(T→C)。【火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C35-1)(M→C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C35-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、ガラス固化体の化学的変質が発生した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C35-3)(T→C)。【火災発生に伴うガラス固化体の変質】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材の鉱物組成が変化することが考えられる(C37-3)(T→C)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>
---	--

【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】

番号	逸脱事象	事故・人的要因
C34-1	オーバーパック表面へのキズ形成	廃棄体定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による廃棄体の転倒・落下に伴うオーバーパックのキズや変形
C34-2	火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。オーバーパックの表面に熱応力が発生し、オーバーパック表面にキズや変形が生じる可能性がある。
C34-3	火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。オーバーパックの表面に熱応力が発生し、オーバーパック表面にキズや変形が生じる可能性がある。
C34-4	火災発生に伴う母岩への亀裂の発生	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。母岩の温度が上昇し、母岩の亀裂の進展が発生する。
C34-5	火災発生に伴う母岩の変質	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。母岩の温度が上昇し、母岩の鉱物組成の変化が発生する。
C35-1	ガラス固化体のひび割れ・破壊	廃棄体定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による廃棄体の転倒・落下に伴うガラス固化体の表面積増加
C35-2	火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生	廃棄体定置作業時の事故・人的要因により火災が発生した場合、ガラス固化体に熱応力が発生し、ガラス表面積の増加
C35-3	火災発生に伴うガラス固化体の変質	廃棄体定置作業時の事故・人的要因により火災が発生した場合、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体が化学的変質を起こす。
C36	掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出	廃棄体定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因により廃棄体が底部緩衝材ブロック上に落下した場合、緩衝材ブロックの変形・ひび割れ・剥離が発生し緩衝材の密度へ影響
C37-1	掘削ズリと空洞の残存に伴う緩衝材の流出	ペレット状緩衝材の隙間充填作業の事故・人的要因による空隙の残存。緩衝材の密度へ影響
C37-2	火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生	ペレット状緩衝材の隙間充填作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、緩衝材ペレットが高温にさらされ、緩衝材に亀裂が発生する可能性がある。
C37-3	火災発生に伴う緩衝材の変質	ペレット状緩衝材の隙間充填作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、緩衝材ペレットが高温にさらされ、緩衝材ペレットの鉱物組成など化学特性を変化させる可能性がある。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】 (21/26)

【工学技術の分類】 定置-オーバーパックと緩衝材の定置-吹き付け方式	
【事故・人的要因整理番号】 C38-1、C38-2、C38-3、C38-4、C38-5、C39-1、C39-2、C39-3、C40、C41-1、C41-2、C41-3	
【工学技術の知見・要約版】	
概要・特徴	吹き付け方式は、廃棄体を定置するための底部緩衝材をブロック方式で施工し、その上に廃棄体を定置する。側部および上部緩衝材を吹き付けにより構築する。
手順	①底部緩衝材をブロック方式で定置、②ブロック上に廃棄体を定置、③緩衝材の吹き付け施工
適用上の留意点	吹き付け方式による緩衝材の施工試験では、超音速ノズルを用いて高速でベントナイト材料を吹き付けることによりベントナイト単体でも乾燥密度(1.6Mg/m ³)の高密度の緩衝材施工を行うことが実証されている。
【バリア特性への影響の想定】	
TH MC	バリア特性への影響
T	<p>火災発生に伴い、オーバーパックの温度が上昇し、オーバーパックへの熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C38-2、C38-3)。【火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成、火災発生に伴うオーバーパックの変質・溶解】</p> <p>火災発生に伴い、母岩の温度が上昇し、母岩への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C38-4、C38-5)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生、火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>火災発生に伴い、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C39-2、C39-3)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生、火災発生に伴うガラス固化体の変質】</p> <p>火災発生に伴い、緩衝材の温度が上昇し、緩衝材への熱応力の発生や温度上昇による変質が発生することが考えられる(C41-2、C41-3)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>
H	<p>火災発生に伴う熱応力により、母岩の亀裂の進展が発生した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C38-4)(T→M→H)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】</p> <p>温度上昇により母岩の鉱物組成が変化した場合、母岩の地下水流動へ影響を与える可能性がある(C38-5)(T→C→H)。【火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>緩衝材ブロックの寸法変化、ひび割れ、剥離などが生じた場合、緩衝材ブロック定置時に積み上げ誤差が生じ、ブロック間に隙間が生じる可能性がある。地下水の再冠水後に緩衝材の膨潤が進展し、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、緩衝材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C40)(H)。【緩衝材のひび割れ・剥離】</p> <p>緩衝材の吹き付け作業の事故・人的要因により、緩衝材が不均質に定置された場合、地下水の再冠水に伴う緩衝材の膨潤により、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が不適切な状態となり、緩衝材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C41-1)(H)。【緩衝材の不均質な施工】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材に亀裂が発生した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(C41-2)(T→M→H)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により鉱物組成が変化しさらに緩衝材の膨潤圧が変化した場合、緩衝材の間隙率・間隙構造が変化し、緩衝材の地下水流動に影響を与える可能性がある(C41-3)(T→C→M→H)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>
M	<p>オーバーパックのキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C38-1)(M)。【オーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、オーバーパックのキズへの応力集中による内部応力の発生や、キズへの外力の作用が発生し、力学的影響が考えられる(C38-2)(T→M)。【火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生による温度上昇により、母岩の亀裂の進展が発生する可能性がある(C38-4)(T→M)。【火災発生に伴う母岩への亀裂の発生】</p> <p>ガラス固化体に過剰な衝撃が加わりガラス表面積が増加する(C39-1)【ガラス固化体のひび割れ・破壊】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体に亀裂が発生することが考えられる(C39-2)(T→M)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材に亀裂が発生することが考えられる(C41-2)(T→M)。【火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材の鉱物組成が変化した場合、緩衝材の膨潤圧に影響を及ぼすことが考えられる(C41-3)(T→C→M)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>

C	<p>地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C38-1)(M→C)。【オーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、オーバーパック表面にキズが形成した場合、地下水組成によっては、キズ内で地下水と炭素鋼との反応が進展し、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C38-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、オーバーパックの変質・融解が発生した場合、地下水組成によっては、応力腐食割れや水素脆化割れの進展が考えられ、化学的影響が考えられる(C38-3)(T→C)。【火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解】</p> <p>火災による温度上昇により、母岩の鉱物組成が変化することが考えられる(C38-5)(T→C)。【火災発生に伴う母岩の変質】</p> <p>ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C39-1)(M→C)。【ガラス固化体のひび割れ・破壊】</p> <p>火災発生に伴う熱応力により、ガラス固化体の表面積が増加した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、地下水との接触面積が大きくなることから、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C39-2)(T→M→C)。【火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、ガラス固化体の変質が発生した場合、ガラス固化体と地下水との接触後、ガラスの溶解特性に影響を及ぼすことが考えられる(C39-3)(T→C)。【火災発生に伴うガラス固化体の変質】</p> <p>火災発生に伴う温度上昇により、緩衝材の鉱物組成が変化することが考えられる(C41-2)(T→C)。【火災発生に伴う緩衝材の変質】</p>
---	---

【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】

番号	逸脱事象	事故・人的要因
C38-1	オーバーパック表面へのキズ形成	廃棄体定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による廃棄体の転倒・落下に伴うオーバーパックのキズや変形
C38-2	火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。オーバーパックの表面に熱応力が発生し、オーバーパック表面にキズや変形が生じる可能性がある。
C38-3	火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。オーバーパックの表面に熱応力が発生し、オーバーパック表面にキズや変形が生じる可能性がある。
C38-4	火災発生に伴う母岩への亀裂の発生	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。母岩の温度が上昇し、母岩の鉱物組成の変化、亀裂の進展が発生する。
C38-5	火災発生に伴う母岩の変質	廃棄体を取り扱う装置の燃料漏れにより火災が発生する可能性がある。母岩の温度が上昇し、母岩の鉱物組成の変化が発生する。
C39-1	ガラス固化体のひび割れ・破壊	廃棄体定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因による廃棄体の転倒・落下に伴うガラス固化体の表面積増加
C39-2	火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生	廃棄体定置作業時の事故・人的要因により火災が発生した場合、ガラス固化体に熱応力が発生し、ガラス表面積の増加
C39-3	火災発生に伴うガラス固化体の変質	廃棄体定置作業時の事故・人的要因により火災が発生した場合、ガラス固化体の温度が上昇し、ガラス固化体が化学的変質を起こす。
C40	緩衝材のひび割れ・剥離	廃棄体定置作業時の装置の故障、電源の喪失、運転操作作業の事故・人的要因により廃棄体が底部緩衝材ブロック上に落下した場合、緩衝材ブロックの変形・ひび割れ・剥離が発生し緩衝材の密度へ影響
C41-1	緩衝材の不均質な施工	緩衝材の吹付け作業の事故・人的要因による不均質施工に伴い、緩衝材の密度へ影響
C41-2	火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生	緩衝材の吹き付け作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、緩衝材が高温にさらされ、緩衝材に亀裂が発生する可能性がある。
C41-3	火災発生に伴う緩衝材の変質	緩衝材の吹き付け作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、緩衝材が高温にさらされ、緩衝材の鉱物組成など化学特性を変化させる可能性がある。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (22/26)

【工学技術の分類】 定置-オーバーバックと緩衝材の定置-PEM方式		
【事故・人的要因整理番号】 C42		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	廃棄体と緩衝材を地上施設において所定の形状に組み立てたものを地下に搬送し処分孔あるいは坑道内に定置するものである。	
手順	①地上施設で製作した PEM を地下に搬送する。②坑道内に定置。③PEM と坑道の坑壁との隙間(15cm 程度)に緩衝材ベレットなどの充填	
適用上の留意点	狭隘空間における PEM 輸送の実現性の見通しが示されている。輸送する床面の不陸を 10mm 程度に抑える必要がある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	PEM の定置作業中の事故・人的要因により、PEM 同士間に想定以上の空間が生じた場合、地下水の再冠水に伴う緩衝材の流出により、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が不適切な状態となり、緩衝材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C42)(H)。【処分孔周辺の掘削ズリや空間の残存に伴う緩衝材の流出】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C42	処分孔周辺の掘削ズリや空間の残存に伴う緩衝材の流出	PEM の搬送時の装置の故障・運転操作作業の事故・人的要因などにより、坑道内において PEM 同士間に想定以上の空間が生じる。その結果緩衝材の密度に影響を及ぼす可能性がある。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【操業段階】 (23/26)

【工学技術の分類】 定置-処分孔上部キャップの設置-コンクリートキャップを用いた方式		
【事故・人的要因整理番号】 C43		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	処分孔上部には操業期間中の処分孔からの埋め戻し材のはらみ出しを防止するためのキャップを設置しアンカーで固定する。	
手順	①処分孔上部にキャップを設置、②アンカー孔の穿孔、③孔に鉄筋を挿入・モルタルを用いた定着、④頭部の固定	
適用上の留意点	人工バリアに用いられる緩衝材は膨潤性の材料であることから、地下水の浸潤に伴って膨潤する。これによって、緩衝材の一部が坑道や処分孔からはらみ出し、その密度が低下すると、緩衝材の性能に有意な影響を及ぼす可能性がある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	処分孔上部キャップの設置不良により、緩衝材の再冠水に伴う膨潤圧により、上部キャップが破損する可能性がある。その場合、緩衝材が流出することにより、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造を変化させ、緩衝材の地下水流動現象に影響を与えることが考えられる(C43)(M→H)。【処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出】	
M	緩衝材の地下水の浸潤に伴って、膨潤圧が発生し上部キャップが破損する可能性がある(C43)。【処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C43	処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出	上部キャップの品質不良による強度不足、アンカー穿孔作業・モルタル充填作業・頭部固定作業の事故・人的要因による定着力不足、孔口部の平滑化作業の事故・人的要因による上部キャップと地山の密着不良などにより、上部キャップの設置効果が得られない。その結果緩衝材の密度に影響を及ぼす可能性がある。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】(24/26)

【工学技術の分類】 坑道埋め戻し－埋め戻し材の締固め－締固め・横締固め		
【事故・人的要因整理番号】 C44-1、C44-2、C44-3		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	処分孔竖置き方式の場合には、廃棄体と緩衝材の定置後に処分孔上部に空間として残る坑道を、埋め戻し材を用いて埋め戻す作業を行う。	
手順	①埋め戻し材の撒き出し、②転圧	
適用上の留意点	ブロックを用いた工法は、あらかじめ密度を調整できることや製作機械の能力に応じて高密度のものを製作できることなどが長所としてあげられる。まきだし・締固め、横締固め、吹付けの各工法については、一定の形状をとらない粒状の埋め戻し材を用いることにより坑道の形状などに合わせて現場での柔軟な施工が可能となることが示されている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	火災発生に伴い、埋め戻し材の温度が上昇し、埋め戻し材への熱応力の発生や温度上昇による変質の発生が考えられる(C44-2、C44-3)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生、火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
H	坑道の埋め戻し材の施工不良により、所定の締固め密度が得られず、再冠水の進展に伴い、埋め戻し材の密度、間隙構造、間隙率に影響を与える可能性がある。その結果、埋め戻し材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C44-1)(H)。【埋め戻し材の転圧不足】 火災が発生した場合、埋め戻し材に亀裂が生じ、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(C44-2)(T→M→H)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生】 火災発生に伴う温度上昇による埋め戻し材の鉱物組成の変化により、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(C44-3)(T→C→H)。【火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
M	火災が発生した場合、埋め戻し材に亀裂が生じる可能性が考えられる(C44-2)(T→M)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生】	
C	火災発生に伴う温度上昇により、埋め戻し材の鉱物組成が変化することが考えられる(C44-3)(T→C)。【火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C44-1	埋め戻し材の転圧不足	埋め戻し材のまきだし厚さ、転圧回数、締固めエネルギー管理作業の事故・人的要因により起こる転圧不足により、埋め戻し材密度へ影響を及ぼす可能性がある。
C44-2	火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生	坑道の埋め戻し作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、埋め戻し材に亀裂が発生する可能性がある。
C44-3	火災発生に伴う埋め戻し材の変質	坑道の埋め戻し作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、埋め戻し材の鉱物組成など化学特性が変化する可能性がある。

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】(25/26)

【工学技術の分類】 坑道埋め戻し-粘土プラグの設置-粘土ブロック方式	
【事故・人的要因整理番号】 C45-1、C45-2、C46、C47-1、C47-2、C47-3、C48、C49	
【工学技術の知見・要約版】	
概要・特徴	粘土プラグは、坑道およびその周辺が水みちとなり卓越した移行経路となることを防止することを目的として、設置する。
手順	①プラグ設置用切欠き部の施工、②粘土グラウトの施工、③プラグ設置面の清掃・不陸の処理、④粘土ブロックの積み上げ
適用上の留意点	切り欠き部の施工試験、ベントナイトスラリーを用いた粘土グラウトの適用性評価などの研究が行われている。
【バリア特性への影響の想定】	
TH MC	バリア特性への影響
T	火災発生に伴い、粘土プラグの温度が上昇し、粘土プラグへの熱応力の発生や温度上昇による変質の発生が考えられる(C47-2、C47-3)。【火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生、火災発生に伴う粘土プラグの変質】
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、その結果水理学的影響が考えられる(C45-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する粘土プラグが流出し、粘土プラグの密度が変化し、粘土プラグの間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(C45-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出】 粘土グラウトによる止水効果が得られず、粘土プラグの流出が起こり、粘土プラグの間隙率・間隙構造の変化が生じ、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(C46)(H)。【湧水量低減不良に伴う粘土プラグの流出】 粘土ブロックの寸法変化、ひび割れ、剥離などが生じた場合、粘土ブロック定置時に積み上げ誤差が生じ、ブロック間に隙間が生じる可能性がある。地下水の再冠水後に粘土プラグの膨潤が進展し、密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、粘土プラグの地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C47-1)(H)。【粘土プラグのひび割れ・剥離】。 火災発生に伴う熱応力により、粘土プラグに亀裂が発生した場合、粘土プラグの間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(C47-2)(T→M→H)。【火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生】 火災発生に伴う温度上昇による粘土プラグの鉱物組成の変化により、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(C47-3)(T→C→H)。【火災発生に伴う粘土プラグの変質】 切欠き部の湧水処理不良が生じた場合、定置作業時にブロックが膨潤し寸法変化が生じる可能性がある。その結果、ブロックの積み上げ誤差が生じ、地下水の浸潤に伴って、粘土プラグの密度、間隙構造、間隙率に影響を及ぼす。そして、粘土プラグの地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C48)(H)。【粘土プラグの初期含水比不良】 粘土プラグと切欠き部の境界に空洞や掘削ズリが残存した場合、地下水の浸潤に伴って、粘土プラグが空間側へ膨潤する。その結果、粘土プラグの密度、間隙構造、間隙率が変化し、粘土プラグの地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(C49)(H)。【掘削ズリと空洞の残存による粘土プラグの空間側への膨潤】
M	粘土プラグ設置用の切欠き部の掘削作業に伴い、周辺岩盤へ過剰な衝撃が加わった場合、周辺岩盤に作用する地圧や岩盤の力学特性に影響を与える可能性がある。その結果、プラグ部周辺岩盤の掘削影響領域が拡大することが考えられる(C45-1、C45-2)(M)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出】 火災発生に伴う熱応力により、粘土プラグに亀裂が発生する可能性が考えられる(C47-2)(T→M)。【火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生】
C	火災発生に伴う温度上昇により、粘土プラグの鉱物組成が変化することが考えられる(C47-3)(T→C)。【火災発生に伴う粘土プラグの変質】

【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C45-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	切り欠き部の掘削作業の事故・人的要因による周辺岩盤へ過剰な衝撃。坑道周囲の掘削影響領域の形成・拡大
C45-2	掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出	
C46	湧水量低減不良に伴う粘土プラグの流出	粘土グラウト施工時の注入材料配合作業や注入圧力管理作業の事故・人的要因による注入材の充填不足、止水効果不良
C47-1	粘土プラグのひび割れ・剥離	粘土ブロック定置作業時の装置の故障、運転操作作業の事故・人的要因による緩衝材ブロックの転倒・落下に伴う粘土ブロックのひび割れ・剥離。粘土プラグの密度への影響
C47-2	火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生	粘土ブロック定置作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、粘土プラグが高温にさらされ、粘土プラグに亀裂が発生する可能性がある。
C47-3	火災発生に伴う粘土プラグの変質	粘土ブロック定置作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、粘土プラグが高温にさらされ、粘土プラグの鉱物組成など化学特性を変化させる可能性がある。
C48	粘土プラグの初期含水比不良	プラグ設置用切り欠き部の湧水処理不良による粘土ブロックの寸法変化。粘土プラグの密度への影響
C49	掘削ズリと空洞の残存による粘土プラグの空間側への膨潤	プラグ設置面の清掃・不陸の処理作業、隙間充填作業の事故・人的要因による粘土ブロックとプラグ設置面の空洞やズリの残存。浸潤に伴う空間側への膨潤による粘土プラグ密度への影響

Table II-3. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【作業段階】(26/26)

【工学技術の分類】 坑道埋め戻し-力学プラグの設置-コンクリートプラグ方式		
【事故・人的要因整理番号】 C50-1、C50-2、C51、C52-1、C52-2		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	坑道内の湧水の状況によっては、処分場の閉鎖までの間に地下水が緩衝材や埋め戻し材に浸潤し、閉鎖の完了していない空間側へ膨潤することが考えられる。この対策として、強度を持たせたコンクリート製などの力学プラグを坑道の端部に設置することが考えられる。	
手順	コンクリートプラグの設置手順は以下の通り。①プラグ設置用切欠き部の施工、②型枠設置、③コンクリート現場配合、④コンクリート運搬、⑤コンクリート打ち込み、⑥コンクリート締固め、⑦養生	
適用上の留意点	現場配合の留意点として、単位水量と単位セメント量はコンクリートの強度、耐久性に大きく影響を与え、単位水量が多いと単位セメント量も多くなり不経済となるばかりでなく、材料の分離が起こりやすくなる。したがって、所要の強度、耐久性のあるコンクリートとするためには、作業に適するワーカビリティが得られる範囲で、単位水量をできるだけ少なくすることが重要である。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H (M →H)	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、その結果水理学的影響が考えられる(C50-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度が変化し、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(C50-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】 力学プラグとプラグ設置面の界面に空洞やズリが残存することにより、坑道周辺の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、母岩の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(C51)(H)。【掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出】 力学プラグが破損した場合、緩衝材が地下水の浸潤に伴って、空間側へ膨潤することが考えられる。その結果、緩衝材の密度、間隙構造、間隙率が変化し、緩衝材の地下水流動現象に影響を与える可能性がある(C52-1)(M→H)。【力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出】 力学プラグが破損した場合、埋め戻し材が地下水の浸潤に伴って、空間側へ膨潤することが考えられる。その結果、埋め戻し材の密度、間隙構造、間隙率が変化し、埋め戻し材の地下水流動現象に影響を与える可能性がある(C52-2)(M→H)。【力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出】	
M	プラグ設置用の切欠き部の掘削作業に伴い、周辺岩盤へ過剰な衝撃が加わった場合、周辺岩盤に作用する地圧や岩盤の力学特性に影響を与える可能性がある。その結果、プラグ部周辺岩盤の掘削影響領域が拡大することが考えられる(C50-1、C50-2)(M)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】 力学プラグの強度や耐久性が低下した場合、緩衝材の膨潤圧力の力学プラグへ作用し、力学プラグが破損することで、緩衝材の応力状態へ影響を及ぼす可能性がある(C52-1)(M)。【力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出】 力学プラグの強度や耐久性が低下した場合、埋め戻し材の膨潤圧力の力学プラグへ作用し、力学プラグが破損することで、埋め戻し材の応力状態へ影響を及ぼす可能性がある(C52-2)(M)。【力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
C50-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	切り欠き部の掘削作業の事故・人的要因による周辺岩盤へ過剰な衝撃。坑道周囲の掘削影響領域の形成・拡大
C50-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	
C51	掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	プラグ設置面の清掃・不陸の処理作業の事故・人的要因による力学プラグとプラグ設置面の界面に空洞やズリの残存
C52-1	力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出	コンクリート現場配合作業、打ち込み作業、締固め作業、養生作業の事故・人的要因による力学プラグの強度・耐久性低下。浸潤に伴う緩衝材の膨潤圧による力学プラグの破損。緩衝材の空間側への膨潤による緩衝材密度への影響
C52-2	力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出	コンクリート現場配合作業、打ち込み作業、締固め作業、養生作業の事故・人的要因による力学プラグの強度・耐久性低下。浸潤に伴う埋め戻し材の膨潤圧による力学プラグの破損。埋め戻し材の空間側への膨潤による埋め戻し材密度への影響

Table II-4. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【閉鎖段階】(1/6)

【工学技術の分類】 坑道埋め戻し—水平坑道埋め戻し—締固め・横締固め方式		
【事故・人的要因整理番号】 D1-1、D1-2、D1-3		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	連絡坑道は処分パネル同士あるいは処分パネルとアクセス坑道を結ぶ坑道であり、処分パネルの周囲にほぼ水平に展開するものであるが、処分パネルが多層配置又は傾斜配置される場合その一部は立坑または斜坑となる。	
手順	まきだし・締固め、横締固め方式は、①埋め戻し材の撒き出し、②転圧の順で施工される。	
適用上の留意点	まきだし・締固め、横締固め工法については、一定の形状をとらない粒状の埋め戻し材を用いることにより坑道の形状などに合わせて現場での柔軟な施工が可能となることが示されている。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	火災発生に伴い、埋め戻し材の温度が上昇し、埋め戻し材への熱応力の発生や温度上昇による変質の発生が考えられる(D1-2、D1-3)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生、火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
H	埋め戻し材の転圧不足などにより埋め戻し材が所定の密度を得られないことが考えられる。この場合、地下水の再冠水に伴う埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が、所定の値を得られない可能性がある。その結果、埋め戻し材での地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(D1-1)(H)。【埋め戻し材の転圧不足】 火災発生に伴う熱応力により、埋め戻し材に亀裂が発生した場合、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(D1-2)(T→M→H)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生】 火災発生に伴う温度上昇による埋め戻し材の鉱物組成の変化により、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(D1-3)(T→C→H)。【火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
M	火災発生に伴う熱応力により、埋め戻し材に亀裂が発生する可能性が考えられる(D1-2)(T→M)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生】	
C	火災発生に伴う温度上昇により、埋め戻し材の鉱物組成が変化することが考えられる(D1-3)(T→C)。【火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
D1-1	埋め戻し材の転圧不足	埋め戻し材のまきだし厚さ、転圧回数、締固めエネルギー管理作業の事故・人的要因により起こる転圧不足により、埋め戻し材密度へ影響を及ぼす可能性がある。
D1-2	火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生	水平坑道の埋め戻し作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、埋め戻し材に亀裂が発生する可能性がある。
D1-3	火災発生に伴う埋め戻し材の変質	水平坑道の埋め戻し作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、埋め戻し材の鉱物組成など化学特性の変化が発生する可能性がある。

Table II-4. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【閉鎖段階】(2/6)

【工学技術の分類】 坑道埋め戻し-斜坑埋め戻し-締固め・横締固め方式		
【事故・人的要因整理番号】 D2-1、D2-2、D2-3		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	斜坑方式のアクセス坑道の埋め戻しに関しては、坑道と天端近傍の鋭角となる部分の作業性に工夫が求められるものの、坑道の上半下半といった区別をすることなく、連続して埋め戻すことが可能であると考えられる。このような埋め戻しにおいては、坑道の形状に合わせて柔軟な対応が可能で、まきだし・締固め方式、及び横締固め方式の組み合わせが考えられる。	
手順	施工手順は、①埋め戻し材のまきだし、または供給、②転圧または横締固め	
適用上の留意点	締固め施工では、調整された材料を用い、規定のまきだし厚さ、締固めエネルギーなどで行われることを管理する。適宜、サンプリングを行い、その確認を行う。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	火災発生に伴い、埋め戻し材の温度が上昇し、埋め戻し材への熱応力の発生や温度上昇による変質の発生が考えられる(D2-2、D2-3)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生、火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
H	埋め戻し材の転圧不足などにより埋め戻し材が所定の密度を得られないことが考えられる。この場合、地下水の再冠水に伴う埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が、所定の値を得られない可能性がある。その結果、埋め戻し材での地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(D2-1)(H)。【埋め戻し材の転圧不足】 火災発生に伴う熱応力により、埋め戻し材に亀裂が発生した場合、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(D2-2)(T→M→H)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生】 火災発生に伴う温度上昇による埋め戻し材の鉱物組成の変化により、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(D2-3)(T→C→H)。【火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
M	火災発生に伴う熱応力により、埋め戻し材に亀裂する可能性が考えられる(D2-2)(T→M)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生】	
C	火災発生に伴う温度上昇により、埋め戻し材の鉱物組成が変化することが考えられる(D2-3)(T→C)。【火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
D2-1	埋め戻し材の転圧不足	埋め戻し材のまきだし厚さ、転圧回数、締固めエネルギー管理作業の事故・人的要因により起こる転圧不足により、埋め戻し材密度へ影響を及ぼす可能性がある。
D2-2	火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生	水平坑道の埋め戻し作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、埋め戻し材に亀裂が発生する可能性がある。
D2-3	火災発生に伴う埋め戻し材の変質	水平坑道の埋め戻し作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、埋め戻し材の鉱物組成など化学特性の変化が発生する可能性がある。

Table II-4. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【閉鎖段階】(3/6)

【工学技術の分類】 坑道埋め戻し－立坑埋め戻し－締固め・横締固め方式		
【事故・人的要因整理番号】 D3-1、D3-2、D3-3		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	立坑方式のアクセス坑道の埋め戻しは、重力方向の締固めが容易であることから、立坑下部より順次締固めて施工していく方式が有効である。工法としては、まきだし・締固め工法が考えられる。	
手順	①埋め戻し材の昇降装置による搬入、②バケット転倒装置によるまきだし、③敷きならし、④搭乗式振動ローラやハンドガイド振動ローラでの締固め	
適用上の留意点	ハンドガイド振動ローラは、搭乗式振動ローラでは締固めが不十分となる端部に用いられる。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	火災発生に伴い、埋め戻し材の温度が上昇し、埋め戻し材への熱応力の発生や温度上昇による変質の発生が考えられる(D3-2、D3-3)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生、火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
H	埋め戻し材の転圧不足などにより埋め戻し材が所定の密度を得られないことが考えられる。この場合、地下水の再冠水に伴う埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が、所定の値を得られない可能性がある。その結果、埋め戻し材での地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(D3-1)(H)。【埋め戻し材の転圧不足】 火災発生に伴う熱応力により、埋め戻し材に亀裂が発生した場合、埋め戻し材の間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(D3-2)(T→M→H)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生】 火災発生に伴う温度上昇による埋め戻し材の鉱物組成の変化により、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(D3-3)(T→C→H)。【火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
M	火災発生に伴う熱応力により、埋め戻し材に亀裂する可能性が考えられる(D3-2)(T→M)。【火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生】	
C	火災発生に伴う温度上昇により、埋め戻し材の鉱物組成が変化することが考えられる(D3-3)(T→C)。【火災発生に伴う埋め戻し材の変質】	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
D3-1	埋め戻し材の転圧不足	埋め戻し材のまきだし厚さ、転圧回数、締固めエネルギー管理作業の事故・人的要因により起こる転圧不足により、埋め戻し材密度へ影響を及ぼす可能性がある。
D3-2	火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生	水平坑道の埋め戻し作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、埋め戻し材に亀裂が発生する可能性がある。
D3-3	火災発生に伴う埋め戻し材の変質	水平坑道の埋め戻し作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、埋め戻し材の鉱物組成など化学特性の変化が発生する可能性がある。

Table II-4. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【閉鎖段階】(4/6)

【工学技術の分類】坑道埋め戻し-ボーリング孔埋め戻し-粘土材を用いた方式		
【事故・人的要因整理番号】D4		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	処分場にはサイト調査段階に地表から掘削されたボーリング孔や、湧水を緩和するための水抜き孔など、様々な方向や径、長さのボーリング孔などが残存することになる。特に地表からのボーリング孔は地下施設と地表を短絡する水みちに、坑道内からのボーリング孔などは岩盤内での新たな水みちとなる可能性があるため、これらは適切に止水処理しておく。	
手順	①注入材料の配合および練り混ぜ、②注入材の注入	
適用上の留意点	閉塞材料の目詰まりにより、完全に閉塞されない場合がある。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H	孔の閉塞不良により、ボーリング孔が完全に閉塞されなかった場合、ボーリング孔自体を含めた周辺岩盤の間隙率、間隙構造へ影響を及ぼす可能性がある。その結果、ボーリング孔自体を含めた周辺岩盤が選択的な水みちとなり、地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(D4)(H)。【ボーリング孔自体の選択的な流路形成】	
M	事故・人的要因に起因した直接的な力学的影響は想定できない。	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
D4	ボーリング孔自体の選択的な流路形成	ボーリング孔の閉塞時における閉塞材と分散媒との配合不良(配合比や混合不良)や孔内への閉塞材の注入量や注入圧力管理作業の事故・人的要因による閉塞材の目詰まり、ボーリング孔の閉塞不良

Table II-4. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【閉鎖段階】(5/6)

【工学技術の分類】 坑道埋め戻し-粘土プラグ設置-粘土ブロック方式	
【事故・人的要因整理番号】 D5-1、D5-2、D6、D7-1、D7-2、D7-3、D8、D9	
【工学技術の知見・要約版】	
概要・特徴	粘土プラグは、坑道およびその周辺が水みちとなり卓越した移行経路となることを防止することを目的として、設置する。
手順	①プラグ設置用切欠き部の施工、②粘土グラウトの施工、③プラグ設置面の清掃・不陸の処理、④粘土ブロックの積み上げ
適用上の留意点	切り欠き部の施工試験、ベントナイトスラリーを用いた粘土グラウトの適用性評価などの研究が行われている。
【バリア特性への影響の想定】	
TH MC	バリア特性への影響
T	火災発生に伴い、粘土プラグの温度が上昇し、粘土プラグへの熱応力の発生や温度上昇による変質の発生が考えられる(D7-2、D7-3)。【火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生、火災発生に伴う粘土プラグの変質】
H	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、その結果、坑道周辺岩盤の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(D5-1)(M→H)。【粘土プラグ周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、母岩・掘削影響領域の間隙率・間隙構造の変化が生じる。その結果、母岩・掘削影響領域と接する粘土プラグが流出し、粘土プラグの密度が変化し、粘土プラグの間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある(D5-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出】 粘土グラウトによる止水効果不良により、粘土プラグの流出が起こり、粘土プラグの間隙率・間隙構造へ影響を及ぼす可能性がある(D6)(H)。【湧水量低減不良に伴う粘土プラグの流出】 粘土ブロックの寸法変化、ひび割れ、剥離などが生じた場合、粘土ブロック定置時に積み上げ誤差が生じ、ブロック間に隙間が生じる可能性がある。地下水の再冠水後に粘土プラグの膨潤が進展し、密度、間隙構造、間隙率が変化する。その結果、粘土プラグの地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(D7-1)(H)。【粘土プラグのひび割れ・剥離】 火災発生に伴う熱応力により、粘土プラグに亀裂が発生した場合、粘土プラグの間隙率・間隙構造に影響を与える。さらに、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(D7-2)(T→M→H)。【火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生】 火災発生に伴う温度上昇による粘土プラグの鉱物組成の変化により、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性が考えられる(D7-3)(T→C→H)。【火災発生に伴う粘土プラグの変質】 切欠き部の湧水処理不良が生じた場合、定置作業時にブロックが膨潤し寸法変化が生じる可能性がある。その結果、ブロックの積み上げ誤差が生じ、地下水の浸潤に伴って、粘土プラグの密度、間隙構造、間隙率に影響を及ぼす。そして、粘土プラグの地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(D8)(H)。【粘土プラグの初期含水比不良】 粘土プラグと切欠き部の境界に空洞や掘削ズリが残存した場合、地下水の浸潤に伴って、粘土プラグが空間側へ膨潤する。その結果、粘土プラグの密度、間隙構造、間隙率が変化し、粘土プラグの地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(D9)(H)。【掘削ズリと空洞の残存による粘土プラグの流出】
M	プラグ設置用の切欠き部の掘削作業に伴い、周辺岩盤へ過剰な衝撃が加わった場合、周辺岩盤に作用する地圧や岩盤の力学特性に影響を与える可能性がある。その結果、プラグ部周辺岩盤の掘削影響領域が拡大することが考えられる(D5-1、D5-2)(M)。【粘土プラグ周辺の掘削影響領域の拡大、掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出】 火災発生に伴う熱応力により、粘土プラグに亀裂が発生する可能性が考えられる(D7-2)(T→M)。【火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生】
C	火災が発生した場合、粘土プラグが高温にさらされることにより、粘土プラグの鉱物組成が変化することが考えられる(D7-3)(T→C)。【火災発生に伴う粘土プラグの変質】

【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
D5-1	粘土プラグ周辺の掘削影響領域の拡大	切り欠き部の掘削作業の事故・人的要因による周辺岩盤へ過剰な衝撃。坑道周囲の掘削影響領域の形成・拡大
D5-2	掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出	切り欠き部の掘削作業の事故・人的要因による周辺岩盤へ過剰な衝撃。坑道周囲の掘削影響領域の形成・拡大
D6	湧水量低減不良に伴う粘土プラグの流出	粘土グラウト施工時の注入材料配合作業や注入圧力管理作業の事故・人的要因による注入材の充填不足、止水効果不良
D7-1	粘土プラグのひび割れ・剥離	粘土ブロック定置作業時の装置の故障、運転操作作業の事故・人的要因による緩衝材ブロックの転倒・落下に伴う粘土ブロックのひび割れ・剥離。粘土プラグの密度への影響
D7-2	火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生	粘土ブロック定置作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、粘土プラグが高温にさらされ、粘土プラグに亀裂が発生する可能性がある。
D7-3	火災発生に伴う粘土プラグの変質	粘土ブロック定置作業の事故・人的要因により、燃料漏れなどが発生し、火災が発生する可能性がある。その結果、粘土プラグが高温にさらされ、粘土プラグの鉱物組成など化学特性を変化させる可能性がある。
D8	粘土プラグの初期含水比不良	プラグ設置用切り欠き部の湧水処理不良による粘土ブロックの寸法変化。粘土プラグの密度への影響
D9	掘削ズリと空洞の残存による粘土プラグの流出	プラグ設置面の清掃・不陸の処理作業、隙間充填作業の事故・人的要因による粘土ブロックとプラグ設置面の空洞やズリの残存、浸潤に伴う空間側への膨潤による粘土プラグ密度への影響

Table II-4. 工学技術適用上の事故・人的要因の特定および人工バリア・天然バリアへの影響の想定【閉鎖段階】(6/6)

【工学技術の分類】 坑道埋め戻し-力学プラグ設置-コンクリートプラグ方式		
【事故・人的要因整理番号】 D10-1、D10-2、D11、D12		
【工学技術の知見・要約版】		
概要・特徴	坑道内の湧水の状況によっては、処分場の閉鎖までの間に地下水が緩衝材や埋め戻し材に浸潤し、閉鎖の完了していない空間側へ膨潤することが考えられる。この対策として、強度を持たせたコンクリート製などの力学プラグを坑道の端部に設置することが考えられる。	
手順	①プラグ設置用切欠き部の施工、②型枠設置、③コンクリート現場配合、④コンクリート運搬、⑤コンクリート打ち込み、⑥コンクリート締固め、⑦養生	
適用上の留意点	現場配合の留意点として、単位水量と単位セメント量はコンクリートの強度、耐久性に大きく影響を与え、単位水量が多いと単位セメント量も多くなり不経済となるばかりでなく、材料の分離が起こりやすくなる。したがって、所要の強度、耐久性のあるコンクリートとするためには、作業に適するワーカビリティが得られる範囲で、単位水量をできるだけ少なくすることが重要である。	
【バリア特性への影響の想定】		
TH MC	バリア特性への影響	
T	事故・人的要因に起因した直接的な熱的影響は想定できない。	
H (M →H)	掘削影響領域の拡大に伴い、坑道周辺岩盤の間隙率・間隙構造の変化が生じ、その結果、坑道周辺岩盤の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(D10-1)(M→H)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大】 掘削影響領域の拡大に伴い、埋め戻し材の流出が生じ、その結果、埋め戻し材の地下水流動現象へ影響を及ぼす可能性がある(D10-2)(M→H)。【掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】 プラグ設置面に掘削ズリが過剰に残存したり、空洞が形成された場合、残存したズリや空洞自体が選択的な水みちとなる可能性がある。その結果、埋め戻し材が流出し、埋め戻し材の密度、間隙率・間隙構造に影響を与え、埋め戻し材の地下水流動に影響を及ぼす可能性がある(D11)(H)。【掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出】 力学プラグが破損した場合、埋め戻し材が地下水の浸潤に伴って、空間側へ膨潤することが考えられる。その結果、埋め戻し材の密度、間隙構造、間隙率が変化し、埋め戻し材の地下水流動現象に影響を与える可能性がある(D12)(M→H)。【力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出】 坑口処理のための力学プラグが破損した場合、埋め戻し材が地下水の浸潤に伴って、空間側へ膨潤することが考えられる。その結果、埋め戻し材の密度、間隙構造、間隙率が変化し、埋め戻し材の地下水流動現象に影響を与える可能性がある(D13)(M→H)。【力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出】	
M	プラグ設置用の切欠き部の掘削作業に伴い、周辺岩盤へ過剰な衝撃が加わった場合、周辺岩盤に作用する地圧や岩盤の力学特性に影響を与える可能性がある。その結果、プラグ部周辺岩盤の掘削影響領域が拡大することが考えられる(D10-1、D10-2)(M)。【坑道周辺の掘削影響領域の拡大。掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出】 力学プラグの強度や耐久性が低下した場合、埋め戻し材の膨潤圧力の力学プラグへ作用し、力学プラグが破損することで、埋め戻し材の応力状態へ影響を及ぼす可能性がある(D12)(M)。【力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出】 坑口処理のための力学プラグの強度や耐久性が低下した場合、埋め戻し材の膨潤圧力の力学プラグへ作用し、力学プラグが破損することで、埋め戻し材の応力状態へ影響を及ぼす可能性がある(D13)(M)。【力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出】	
C	事故・人的要因に起因した直接的な化学的影響は想定できない。	
【工学技術適用上の事故・人的要因の特定】		
番号	逸脱事象	事故・人的要因
D10-1	坑道周辺の掘削影響領域の拡大	切り欠き部の掘削作業の事故・人的要因による周辺岩盤へ過剰な衝撃。坑道周囲の掘削影響領域の形成・拡大
D10-2	掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	切り欠き部の掘削作業の事故・人的要因による周辺岩盤へ過剰な衝撃。坑道周囲の掘削影響領域の形成・拡大
D11	掘削ズリや空洞の残存に伴う埋め戻し材の流出	プラグ設置面の清掃・不陸の処理作業の事故・人的要因による力学プラグとプラグ設置面の界面に空洞やズリの残存
D12	力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出	コンクリート現場配合作業、打ち込み作業、締固め作業、養生作業の事故・人的要因による力学プラグの強度・耐久性低下、浸潤に伴う埋め戻し材の膨潤圧力による力学プラグの破損、埋め戻し材の空間側への膨潤による埋め戻し材密度への影響
D13	力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出	コンクリート現場配合作業、打ち込み作業、締固め作業、養生作業の事故・人的要因による力学プラグの強度・耐久性低下、浸潤に伴う埋め戻し材の膨潤圧力による力学プラグの破損、埋め戻し材の空間側への膨潤による埋め戻し材密度への影響

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光路長	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

