

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

－処分場の建設・操業・閉鎖段階における地震の発生による
閉鎖後の安全機能への影響についての整理－
(受託研究)

Scenario Development on Application of Engineering
Technology for Geological Disposal
– Study of Influence of Earthquake at Site Construction, Operation and Closure
Stages and that Impact on Safety Functions after Closure of Disposal Facility –
(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

March 2017

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, 2017

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
—処分場の建設・操業・閉鎖段階における地震の発生による閉鎖後の安全機能への
影響についての整理—
(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

(2016 年 12 月 20 日受理)

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価では、処分場の建設・操業・閉鎖段階で用いられる工学技術の適用により生じるバリア特性への影響を考慮したシナリオを構築する必要がある。日本原子力研究開発機構では工学技術の適用に関連したシナリオを、ヒューマンエラー等の事故・人的要因を起因事象とする場合と地質・気候関連事象を起因事象とする場合の2つに区分して、その設定手法について検討している。事故・人的要因を起因事象としたシナリオについてはこれまでの研究において、工学技術適用上の事故・人的要因により生じる可能性がある処分場閉鎖後の長期安全性に与える影響の連鎖を、シナリオとして提示した。

本研究では、地質・気候関連事象のうち処分場の建設から閉鎖段階における地震の発生が長期安全性に与える影響をシナリオとして設定するための検討を行った。まず、地震による地下施設の被害事例を収集し、被害をもたらす条件について分析した。その調査結果に加え、既往のバリア材の熱・水・応力・化学に関する特性への影響に関する FEP (Feature、Event、Process) の情報を踏まえて、地震による影響要因を特定した。さらに、工学技術適用上の事故・人的要因の検討結果を参考にして、地震発生により起こりうる人工バリア・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）を特定した。そして、逸脱事象により起こりうるバリア特性の変化および安全機能の喪失・低下につながる影響の連鎖をシナリオとして提示し、一連の結果を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として整備した。

本研究は、原子力安全・保安院（現 原子力規制委員会原子力規制庁）「平成 24 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 of Influence of Earthquake at Site Construction, Operation and Closure Stages and that Impact on
Safety Functions after Closure of Disposal Facility -
(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 December 20, 2016)

In the safety assessment for the engineering of high-level radioactive waste geological disposal, scenarios need to be developed considering influence to barrier features by applying engineering technologies at site selection stage, construction stage, operation stage and closure stage of disposal facility. In Japan Atomic Energy Agency, for judging validity of scenarios set in future, a method to establish scenarios has been investigated by dividing scenarios for application of engineering technologies for geological disposal into two groups. One group consists of scenarios for occurrence of accidents and human factors of applying engineering technologies at site selection stage, construction stage, operation stage and closure stage of disposal facility. These scenarios are specified as chains of the accidents and human factors and influence to safety functions after closure stage in previous study.

In this report, another group of scenarios for occurrence of earthquake at construction stage, operation stage and closure stage of disposal facility was presented. At first, we compiled information about damage cases of tunnel by earthquake and analyzed conditions for occurrence of damage. Based on this result and the previous report, information of influence of the accidents and human factors on safety functions and information of FEP (Feature, Event and Process) about thermal-hydrological-mechanical-chemical (THMC) variation, we specified events to be considered, which occur by earthquake and influence engineering barriers, natural barriers and long-term safety after closure stage of disposal facility. We compiled influence of the events on safety functions after closure stage of disposal and showed the chains of the influence on long-term safety as scenarios. These results were integrated as a database that could support development of scenarios caused by application of engineering technologies to geological disposal.

Keywords: Geological Disposal, Engineering Technology, Deviation Event, Earthquake, Safety Function, Scenario Development

This research is funded by the Secretariat of Nuclear Regulation Authority (NRA), NRA, Japan (formerly the Nuclear and Industrial Safety Agency, Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan).

※1 Special Topic Engineer (Present affiliation, Chuo Kaihatsu Corporation)

目 次

1. はじめに.....	1
2. 検討方法.....	3
2.1 検討対象範囲.....	3
2.2 検討手順.....	3
3. 検討結果.....	11
3.1 地震による影響要因.....	11
3.2 地震による逸脱事象および安全機能への影響の連鎖.....	16
4. まとめ.....	33
謝辞.....	42
参考文献.....	42
付録 地震によるトンネルへの影響事例調査結果.....	43

Contents

1. Introduction.....	1
2. Methodology	3
2.1 Scope of this study	3
2.2 Procedure of this study.....	3
3. Results.....	11
3.1 Effect factors occurred by earthquake.....	11
3.2 Deviation events and chain of influence on safety functions of barriers occurred by earthquake	16
4. Conclusions.....	33
Acknowledgement	42
References.....	42
Appendix Survey results of damage cases of tunnel by earthquake	43

This is a blank page.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物（以下、HLW）に対する安全審査では、実施主体である原子力環境整備機構（以下、NUMO）の安全評価の中で示されるシナリオの妥当性について技術的判断を行うためのシナリオ設定手法が必要となる。日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）安全研究センターでは、処分にあって想定されるシナリオを表 1-1 に示す 3 タイプに分類し、シナリオ設定手法の整備を実施している。これらのシナリオは、人工バリアの安全機能や処分サイトの地質環境、処分事業の適用される工学技術に関する様々な条件や起こりうる現象を考慮して、構築されなければならない。それらの条件や現象、処分場閉鎖後の長期安全性に関係すると考えられる要因は多岐にわたるため、情報を体系的に整理し、シナリオ整備を進める必要がある。そのため原子力機構では、経済協力開発機構／原子力機関（以下、OECD/NEA）の国際 FEP（Feature：特性、Event：事象、Process：プロセス、以下 FEP）リスト⁽¹⁾に基づき、我が国の処分概念に適合する FEP をリストアップし、それらに関する科学的知見に基づいてシナリオを整備している。

表 1-1 HLW 地層処分の安全評価におけるシナリオの分類

シナリオ	前提条件	起回事象	影響
①処分の工学技術の適用に関連したシナリオ	建設・操業・閉鎖段階に起回事象が発生	ヒューマンエラー 地質・気候関連事象	バリアの特性変化 安全機能への影響
②人工バリアの変遷である内的条件に関連したシナリオ	地質環境条件が安定に将来まで継続、人工バリアが適切に設置	内的条件（緩衝材の変質、飽和の進展等）	
③地質・気候関連事象に関連したシナリオ	処分場閉鎖後に起回事象が発生	地質・気候関連事象	

表 1-1 の①処分の工学技術の適用に関連したシナリオのうち、ヒューマンエラーを起回事象としたシナリオについては、「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）において検討を行った。シナリオの整備にあたっては、処分場のサイト調査・建設・操業・閉鎖段階の期間にヒューマンエラーが発生した場合に起こりうる、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）を特定し、それらが人工バリア・天然バリアの特性（THMC）や安全機能に与える影響の連鎖をシナリオとして抽出している。

本研究では、①処分の工学技術の適用に関連したシナリオのうち、地質・気候関連事象を起回事象としたシナリオについて検討を行った。考慮すべき地質・気候関連事象については、原子力規制委員会による「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の制定について」⁽³⁾で示されている自然事象（表 1-2）を基に、以下のように選定した。ここで、第二種埋設廃棄物の処分は HLW を対象とした地層処分とは異なるが、地質・気候関連事象による影響は地層処分でも同様に検討する必要があると考え、ここでは同制定を参考に考慮すべき事象を整理することとした。

表 1-2 第二種廃棄物埋設施設に対して考慮されている自然事象

条	自然事象
第四条	地震
第五条	津波
第六条	外部からの衝撃（洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、地形及び陸水の変化、生物学的事象、森林火災等）

地層処分施設は地下深部に建設されるため、外部からの衝撃（風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、生物学的事象、森林火災等）による影響の可能性は小さいと考えられる。また平成 12 年 6 月の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」により、処分場選定時の要件（以下、法定要件）として“対象地層の物理的性質がサイトの設置に適していると思込まれること”および“将来にわたって地震等の自然現象による地層の著しい変動が生じるおそれが少ないと思込まれること”が定められているため、地震、火山の影響、地形及び陸水の変化による著しい影響は回避されると想定される。しかし、閉鎖段階の終了までは坑道は埋め戻されていない状態であり、過去にトンネル等で地震による被害事例が見られることから、地震動を起因とした処分場への影響は起こる可能性がある。また津波および洪水については、発生時に水が処分施設内に流入することによる影響が想定されるため、評価の必要があると考えられる。よって評価対象としては、津波・洪水・地震の 3 つが想定される。本研究では、上記の津波・洪水による影響は地下の施設への水侵入に対する対策等により低減化あるいは排除することは可能と考えられるため、地震のみを対象として処分場の長期安全性への影響シナリオを整理することとした。また同制定の第九条では、自然現象を起因とした廃棄物埋設施設から事業所周辺の公衆への放射線障害についても記されているが、本研究ではバリア機能に対する影響の検討を目的としているため、これについては対象外とした。

本研究ではまず、地震による地下施設への影響事例を整理し、影響とその要因の関係について分析した。その情報を基に、処分場の建設・操業・閉鎖段階の期間に地震が発生した場合に起こりうる逸脱事象を特定した。そして、特定した地震による逸脱事象により起こる可能性のあるバリア特性や安全機能への影響の連鎖を、地層処分のシナリオ構築のための FEP データベースに記載されている科学的知見情報をもとに整理し、一連の影響の連鎖をシナリオとして整理した。

2. 検討方法

2.1 検討対象範囲

処分場の建設・操業・閉鎖段階に地震が発生した場合、地震の揺れや処分場周辺の応力場の変化などにより、処分場閉鎖後の長期安全性に影響を及ぼすような事象が発生する可能性がある。本研究では、我が国の一般的な処分概念に対応した長期的な変遷を想定することを前提とし、NUMO⁽⁵⁾で採用が検討されている人工バリアおよび天然バリア（ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、埋め戻し材、粘土プラグ、力学プラグ、および、坑道周辺の母岩（掘削影響領域を含む））を対象として、閉鎖後のバリア特性と安全機能への影響の検討を行った。

NUMO が提示している各バリアが持つ安全機能を表 2-1 に示す。この中の安全機能の一つである「アクセス坑道およびその周辺が移行経路となることの抑制」は、NUMO では埋め戻し材とプラグの安全機能としているが、本研究ではアクセス坑道の周辺に存在する天然バリアについてもこの安全機能が求められるものと解釈し、天然バリアの安全機能の一つとして設定した。各バリアの設計要件の詳細については、JAEA-Data/Code 2014-026 を参照されたい。

また、地層処分に関する安全性には、地層処分事業の操業期間中における作業員や処分場のサイト周辺の一般公衆への放射線に対する安全性と、処分場閉鎖後の長期的な一般公衆に対する安全性があるが、本研究では後者を対象とする。

表 2-1 HLW 地層処分の安全機能と構成要素の関係 (NUMO-TR11-01⁽⁵⁾)

基本概念	安全機能		構成要素
隔離	地質の長期的な変動からの防護		天然バリア
	人の接近の抑制		
閉鎖後 閉じ込め	放射性物質の 浸出抑制	ガラスマトリクスによる浸出抑制	廃棄体
		発熱が著しい期間の地下水接触の防止	オーバーパック
	放射性物質の 移行抑制	放射性物質の溶解度制限	還元環境を保つことなどに より機能として発現
		移流による移行の抑制	緩衝材
		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	
		分散による移行率の低減	天然バリア
		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	埋め戻し材 プラグ

2.2 検討手順

本研究では、図 2-1 に示す検討手順に基づき、地震発生を起因事象としたシナリオを作成した。

まず、地震により起こりうる人工バリア・天然バリアに影響を及ぼす要因を、①地震によるトンネルへの被害事例の調査および②地質・気候関連事象に関する FEP データベースに基づき特定した。次に、JAEA-Data/Code 2014-026 における工学技術に関するシナリオの整理結果を参考に、地震によ

る影響要因によって起こりうる人工バリア・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）を特定し、逸脱事象により起こる可能性のあるバリア特性の変化および安全機能への影響の連鎖をシナリオとして作成した。以下に、各検討手順の概要を示す。

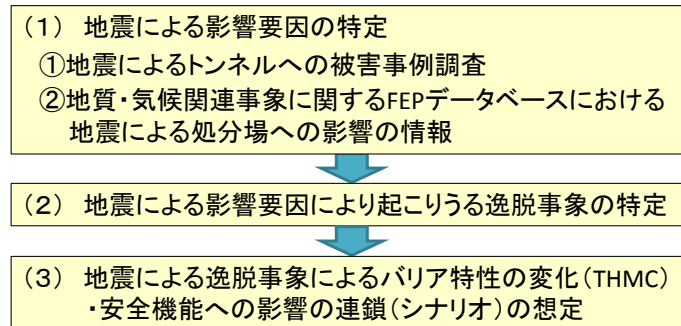


図 2-1 シナリオ作成の検討手順

(1) 地震による影響要因の特定

① 地震によるトンネルへの被害事例調査

地震発生により処分場に起こる可能性のある被害を特定するためには、実際の被害事例を調査することが重要だが、現状我々は処分場への地震発生に対する実際の経験を有していない。そこで、処分場が大深度に設置されたトンネル状の建造物であることを踏まえて、現在までに発生した地震によるトンネルへの被害事例の調査を行った。

地震による被害事例は、地震が起こった場所の条件により区分できると考えられる。朝倉ほか(2000)⁽⁴⁾は山岳トンネルの地震被害のパターンを、Ⅰ．小土被り区間における被害、Ⅱ．地質不良区間における被害、Ⅲ．断層のずれによる被害の3つに分類した。これらに対する被害パターンの概要および概念図(図 2-2)を、以下に示す。

Ⅰ．小土被り区間における被害

小土被り区間である坑門、坑口部における被害の形態は、斜面の崩壊、滑落に伴う本体の変状、圧壊など、坑口付近の斜面崩壊によるもらい災害が多い。

例として、1923 年の関東大地震による箱根 3 号トンネルの斜面崩壊に伴う坑口部の崩落、1993 年の北海道南西沖地震による第 2 白糸トンネルの岩盤斜面の崩落に伴う岩石の直撃による坑門の破壊などが挙げられる。

Ⅱ．地質不良区間における被害

山岳トンネルの土被りの大きな部分は、トンネルが堅固な岩盤内に存在するため地震による被害は受けにくいものの、何らかの地質不良がある箇所において被害の発生が確認されている。

1995 年の兵庫県南部地震では、六甲トンネルにおいて土被り 100m を超す箇所、アーチクラウン部の覆工コンクリートのせん断ひび割れなどの被害が確認された。被害箇所は、粘土を伴う破碎帯、および、施工時に大量湧水が確認された箇所であった。また、2011 年の東北地方太平洋沖地震

では、福島トンネルにおいて土被りが大きい箇所で中央通路部の損傷や路盤隆起などの被害が確認された。被害箇所は、褶曲構造により地層が乱れている箇所であった。

Ⅲ. 断層のずれによる被害

トンネルが地震断層を貫いている場合、地震による断層のずれによりトンネルが被害を受けることがある。被害事例は少ないが、北伊豆地震断層系の丹那断層などの活動によって生じた 1930 年の北伊豆地震では、丹那断層のずれによるトンネル被害が確認された。

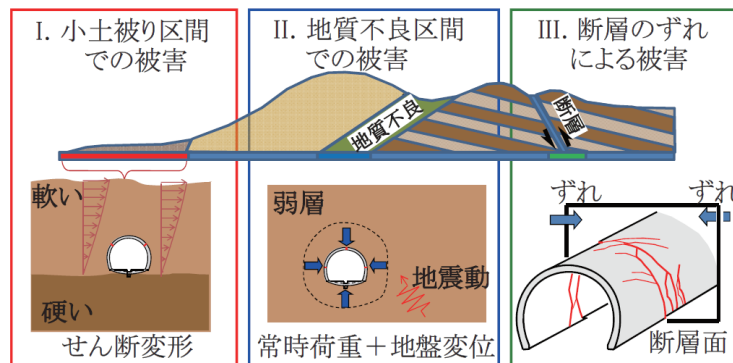


図 2-2 地震によるトンネルの被害パターン（野城ほか(2009)⁽¹⁰⁾）

処分場においては、Ⅰ. 小土被り区間は処分場では地下施設の入口に、Ⅱ. 地質不良区間は処分坑道・連絡坑道・アクセス坑道の地質不良区間に対応し、これらの場所で同様の地震被害が起これとされる（図 2-3）。従って、過去に発生した地震によるトンネルへの被害事例を調査し、調査結果をこれらの場所の条件に基づき整理することで、処分場への地震による影響要因を特定した。

ただし、Ⅲ. 断層のずれ（断層によるトンネルの直接破壊）については、サイト選定時の法定要件の 1 つとして“将来にわたって地震等の自然現象による地層の著しい変動が生じるおそれが少ないと見込まれること”を満たすために、活断層の幅（断層破碎帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲は回避されることが定められている⁽⁵⁾。一方、概要調査では処分坑道への断層の直撃（派生断層の発生や地質断層の再活動による）が将来起こる可能性を回避しきれないことが指摘されているが⁽⁶⁾、これは数万年以上の長期に及ぶ期間に対するものであるため、処分施設閉鎖までの期間に起こる可能性は低いと想定される。よって、Ⅲ. 断層のずれについては今回の調査では対象としないこととした。また調査は、土木学会、地盤工学会、日本トンネル技術協会が発行している学会誌、および、鉄道総合技術研究所の報告をもとに実施した。

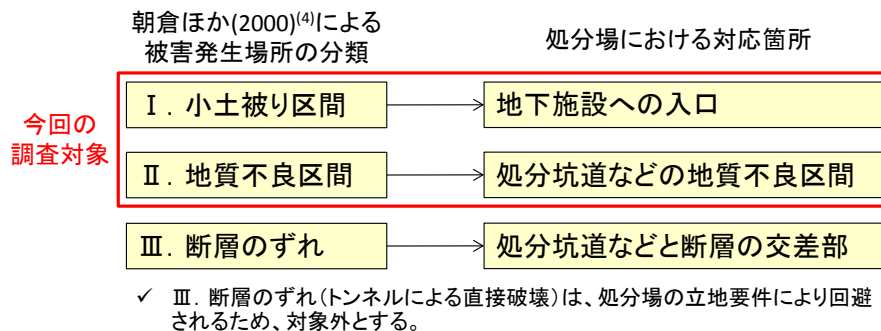


図 2-3 朝倉ほか(2000)⁽⁴⁾による被害発生場所の分類に対する処分場における対応箇所

② 地質・気候関連事象に関する FEP データベースにおける地震による処分場への影響の情報

①における被害事例の調査は、既往の道路・鉄道トンネルに対して行ったものであり、我々が経験したことのない処分場の大深度トンネル特有の被害に関する情報は収集できていない。これを補うため、原子力機構で整備している地質・気候関連事象に関する FEP データベース⁽⁷⁾の情報を踏まえて、地震による影響要因を検討することにした。

地質・気候関連事象に関する FEP データベースでは、隆起・侵食、地震・断層活動、気候変動を対象として、起因事象の発生からバリア材の特性変化 (THMC) までの影響の連鎖を整理している。本研究ではこの中で、地震・断層活動に関する FEP の情報を参考にした。また、FEP データベースでは地震・断層活動を細分化して評価を行っている（海側プレートの沈み込み境界付近の地震、プレートの衝突に伴う地震、活断層沿いの地震、活断層沿い以外の地震）が、これらによってサイトに生じる影響の記載が同じであることから、本研究では細分化せずにこれらを全て地震・断層活動として扱うこととする。

（２）地震による影響要因により起こりうる逸脱事象の特定

JAEA-Data/Code 2014-026 では、処分場のサイト調査・建設・操業・閉鎖段階における工学技術適用上の事故・人的要因を起因事象としたシナリオについて検討している。JAEA-Data/Code 2014-026 において作成した工学技術のリストを、表 2-2 に示す。表 2-2 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 2-2 工学技術のリスト⁽²⁾

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
B	建設段階	坑道建設	機械ボーリング(ロータリー掘削方式)
			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	ダウンザホールハンマー方式、ロータリー掘削方式
			吹付けコンクリート、補強リング
			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パックへの封入	製鉄
			製鉄(製鉄、製鋼による方式)
			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
		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パ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
			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	オーバーパックの地下施設への搬送
			オーバーパ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	オーバーパ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)
		力学プラグの設置	力学プラグ※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)
		力学プラグ設置	力学プラグ設置(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。

※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 NC 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) 力学プラグ：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 2-2 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・人的要因により人工バリア・天然バリア（母岩）に起こりうる逸脱事象を、表 2-3 のように特定している。

表 2-3 工学技術適用上の事故・人的要因により起こりうる逸脱事象⁽²⁾ (1/2)

構成要素	逸脱事象
ガラス固化体	(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への亀裂の発生
	(e) 火災発生に伴うガラス固化体の変質
オーバーパック	(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
緩衝材	(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) 湧水量低減不足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への亀裂の発生
	(m) 火災発生に伴う緩衝材の変質

表 2-3 工学技術適用上の事故・人的要因により起こりうる逸脱事象⁽²⁾ (2/2)

構成要素	逸脱事象
粘土プラグ	(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) 湧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伴う粘土プラグの流出
	(h) 火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生
	(i) 火災発生に伴う粘土プラグの変質
埋め戻し材	(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) 掘削ズリや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への亀裂の発生
	(i) 火災発生に伴う埋め戻し材の変質
母岩(掘削影響領域を含む)	(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) 坑道周辺の掘削ズリや空洞の残存
	(d) 坑道周辺の掘削影響領域の拡大
	(e) 処分孔周辺の掘削影響領域の拡大
	(f) 火災発生に伴う母岩への亀裂の発生
	(g) 火災発生に伴う母岩の変質

地震発生により起こる逸脱事象は、影響の度合いは違うものの、工学技術適用上の逸脱事象と同様であると考えられる。例えば処分場の操業時に地震が発生した場合、運搬中に廃棄体が地震のゆれによって落下することで、ガラス固化体のひび割れ・破壊が起こる可能性がある。これは表 2-3 に示した工学技術適用上の逸脱事象の中で、廃棄体搬送中の事故・人的要因等の結果としてすでに特定されている。

よって本研究では、表 2-3 に示した事故・人的要因による逸脱事象を参考に地震による逸脱事象を選定し、さらに過去に発生した地震によるトンネルへの被害事例調査結果を基に追加的に考慮されるべき逸脱事象を特定するものとした。

(3) 地震による逸脱事象によるバリア特性の変化 (THMC)・安全機能への影響の連鎖 (シナリオ) の想定

工学技術適用上の事故・人的要因および地震による影響要因により生じるバリア特性の変化および安全機能への影響は、逸脱事象が同じであれば同様であると考えられる。例えば、地震によるガラス固化体のひび割れ・破壊によって起こるバリア材の特性変化 (ガラス固化体の溶解現象への影響) および安全機能への影響 (ガラスマトリックスによる浸出抑制への影響) は、JAEA-Data/Code 2014-026 で整理した工学技術適用上の事故・人的要因によるガラス固化体のひび割れ・破壊により起こる影響を参考にして、図 2-4 のように想定した。

本研究では、JAEA-Data/Code 2014-026 で整理した逸脱事象からの影響の連鎖を参考として、地震による逸脱事象からの影響の連鎖をシナリオとして想定することとした。また本研究で新しく設定する逸脱事象については、FEP データベースの人工バリアの変遷に関するシークエンスの情報⁽⁸⁾をもとに想定した。

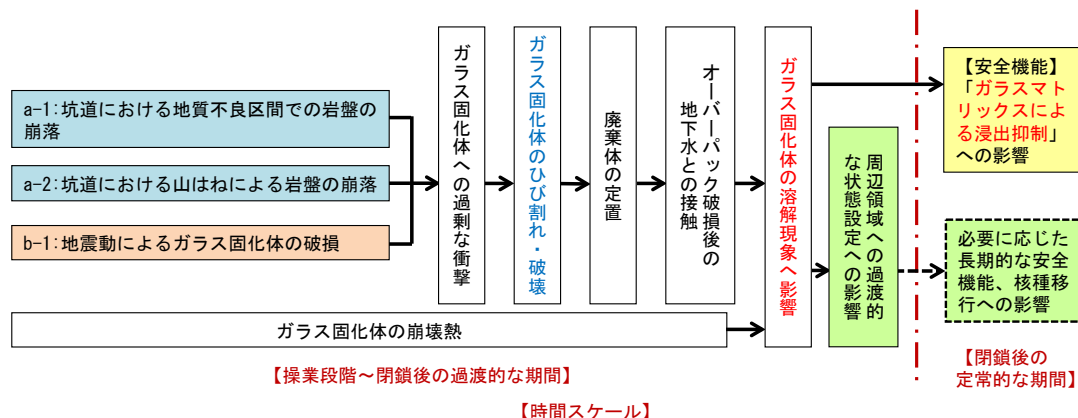


図 2-4 地震による逸脱事象の整理結果 (ガラス固化体のひび割れ・破壊)

(左色枠は地震による影響要因 (色は地震発生時の各事業段階に対応 (表 2-2 を参照))、青字は逸脱事象、赤字はバリア特性への影響、黄枠は安全機能への影響を表す。)

3. 検討結果

3.1 地震による影響要因

前章に示した実施手順に従い、人工バリア・天然バリアに影響を及ぼす可能性のある地震による影響要因を検討した結果を、以下に示す。

(1) 地震によるトンネルへの被害事例の調査結果

2.2 の実施方法に従い、地震によるトンネルへの被害事例の調査を行った。その結果、1923 年の関東大地震から 2011 年の東北地方太平洋沖地震までに発生した地震の内、トンネルに被害を与え、その被害について文献に残されている地震は 19 個あり、全て M6.8 以上の大きさの地震であった。

地震によるトンネルへの被害事例の主な調査結果を、表 3-1 に示す。19 個全ての地震に対する詳細な調査結果は、付録を参照されたい。

表 3-1 地震によるトンネルへの被害事例の主な調査結果
(地震による被害パターン：Ⅰ．小土被り区間、Ⅱ．地質不良区間)

地震	規模	震央からの距離	トンネル	被害形態(分類)	土被り	特殊条件	被害パターン
1923年 関東大地震	M7.9	9km	箱根3号トンネル(鉄道)	地表の斜面崩壊に伴う坑口部(延長3.6km)の崩落	坑口	—	Ⅰ
1978年 伊豆大島近海地震	M7.0	18km	大川トンネル(鉄道)	約60m区間にわたり、側壁が内空側に変位し、アーチ部が圧ざ	50m	破碎帯(安山岩角礫と断層粘土からなる)	Ⅱ
1993年 能登半島沖地震	M6.9	16km	木の浦トンネル(道路)	坑口から21m付近よりトンネルアーチ部で落盤(延長4.5m、幅4.5m、高さ約7m)が生じトンネル閉塞	15m	軟質な泥岩、凝灰岩、風化により粘土化進行	Ⅱ
1993年 北海道南西沖地震	M7.8	58km	第2白系トンネル(道路)	岩石斜面の崩壊による岩石の直撃により坑門が破壊	坑門	斜面崩壊	Ⅰ
1995年 兵庫県南部地震	M7.3	29km	六甲トンネル(鉄道)	アーチクラウン部の覆工コンクリートのせん断ひび割れ、アーチ・側壁の打ち継ぎ目部での剥落	100m ～ 460m	花崗岩 被害箇所は粘土を伴う 破碎帯や施工時の大量 湧水箇所一致する	Ⅱ
2004年 新潟県中越地震	M6.8	10km	魚沼トンネル(鉄道)	覆工コンクリートアーチ部の崩落(延長5m)(地山の崩落は生じなかった)、インバートコンクリートのひび割れ、軌道隆起(約250mm)	70m	被害箇所は鮮新世の軟質なシルト岩層、泥岩・砂岩互層	Ⅱ
2007年 新潟県中越沖地震	M6.8	36km	第一米山トンネル(鉄道)	アーチ肩部せん断ひび割れ、側壁コンクリート損傷、アーチ肩部圧ざ	58m	軟質砂岩と破碎状安山岩の境界部	Ⅱ
2011年 東北地方太平洋沖地震	M9.0	153km	福島トンネル(鉄道)	中央通路部の損傷、路盤部隆起に伴う軌道変状	—	褶曲構造を示す泥岩、凝灰岩	Ⅱ

各被害パターン（Ⅰ．小土被り区間およびⅡ．地質不良区間）に対する被害事例は、以下のよう
に整理される。

「Ⅰ．小土被り区間」では、斜面崩壊、地すべり、落石、小土被りなどの地形・地質性状を示す箇所において、地震被害が確認されている。被害事例調査結果より、被害の形態は、坑口部で岩盤が崩落したタイプと岩盤の崩落には至らないものの覆工コンクリートが破損するタイプ（覆工コンクリートの圧ざ、押し出し、剥離）に区分される。

「Ⅱ．地質不良区間」では、破碎帯、褶曲じょう乱帯、未固結部、膨潤性地山、熱水変質帯、高間隙水圧区間などの地質性状を示す箇所において、地震被害が確認されている。被害事例調査結果より、被害の形態は、これら地質不良区間で岩盤が崩落したタイプと岩盤の崩落までには至らないものの覆工コンクリートや路盤が破損するタイプ（覆工コンクリートの圧ざ、押し出し、剥離、打

ち継ぎ目部の剥落、食い違い、路盤隆起)に区分される。表 3-2 に、地震による被害事例を被害パターンによって分類した結果を示す。

表 3-2 被害パターンによって分類した地震による被害事例

被害パターン	地形・地質の性状	被害事例
Ⅰ．小土被り区間	斜面崩壊、地すべり、落石、小土被り	【事例－①】 地震動に起因した応力状態の変化による坑口部での岩盤の崩落、坑口の閉塞
		【事例－②】 地震動に起因した応力状態の変化による坑口部での覆工コンクリートの破損、抗門の破損
Ⅱ．地質不良区間	破碎帯、褶曲じょう乱帯、未固結部、膨潤性地山、熱水変質帯、高間隙水圧区間	【事例－③】 地震動に起因した応力状態の変化による地質不良区間での坑道の岩盤の崩落
		【事例－④】 地震動に起因した応力状態の変化による地質不良区間での坑道の覆工コンクリートや路盤の破損

(2) FEP データベースにおける地震に関する影響の整理結果

地質・気候関連事象に関する FEP データベース⁽⁷⁾に記載されている、地震に関する処分場への影響は、以下の 8 つであった。

- 【FEP－①】 地震活動によるサイトの直接破壊、応力変化
- 【FEP－②】 地震活動による断層内の亀裂形成に伴う地下水水理、化学の変化（地表水流入等）
- 【FEP－③】 地震活動による岩盤内の亀裂形成に伴う地下水水理の変化
- 【FEP－④】 地震活動による岩盤内の水圧変化に伴う地下水水理変化（過剰間隙水圧の発生）
- 【FEP－⑤】 地震活動による断層に沿った深部からの熱水の流入に伴う地下水水理、化学、熱の変化
- 【FEP－⑥】 地震活動による断層変位に伴う地質構造の変化による地下水水理の変化
- 【FEP－⑦】 地震活動による侵食に伴うサイトの対地深度の変化による地下水水理、熱、化学、力学の変化
- 【FEP－⑧】 地震活動による侵食に伴う地形変化による地下水水理の変化

このうち、サイト選定時の法定要件で回避される断層沿いに限って発生する事象、および、処分場の建設・操業・閉鎖段階の百数十年間ではサイトに影響を及ぼさないと考えられる侵食に関連する事象を除くと、地震による考慮すべき影響要因は【FEP－①】・【FEP－③】・【FEP－④】の 3 つである。ただし FEP－①に関しては、断層によるサイトの直接破壊は回避されているとして考慮せず、応力変化による影響（処分場内に生じるゆれ、および、圧力解放による山はねの発生）について考慮することとした。

以上を踏まえて、地震による影響要因を影響を受ける対象ごと（a. 天然バリア、b. 人工バリア、c. バリア以外の地層処分に関係する構造物）に整理した結果を、表 3-3 に示す。

表 3-3 地震による影響要因の特定結果

影響を受ける対象	地震による影響要因	根拠
a.天然バリア	a-1: 坑道における地質不良区間での岩盤の崩落	事例－③
	a-2: 坑道における山はねによる岩盤の崩落	FEP－①
	a-3: 坑道周辺岩盤における亀裂形成	FEP－③
	a-4: 坑道周辺岩盤における水圧変化	FEP－④
b.人工バリア	b-1: 地震動によるガラス固化体の破損	FEP－①
	b-2: 地震動によるオーバパックの破損	
	b-3: 地震動による緩衝材の破損	
	b-4: 地震動による粘土プラグの破損	
	b-5: 地震動による埋め戻し材の破損	
	b-6: 地震動による力学プラグの破損	
c.バリア以外の地層処分 に 関係する構造物	c-1: 坑口における地盤の崩落、坑口の閉塞	事例－①
	c-2: 坑口における覆工コンクリートの破損	事例－②
	c-3: 坑道における地質不良区間での覆工コンクリートや路盤の破損	事例－④

以下に、表 3-3 に示した地震による影響要因の選定理由を示す。

a-1: 坑道における地質不良区間での岩盤の崩落

この地震による影響要因は、地震による被害事例の調査結果【事例-③】から特定したものである。坑道の岩盤が崩落した場合、坑道周辺母岩への影響や、崩落物が人工バリアに直撃することによる人工バリアのバリア特性や安全機能への影響が想定される。

a-2: 坑道における山はねによる岩盤の崩落

この地震による影響要因は、FEP データベースの収録情報【FEP-①】から特定したものである。山はねは、土被りが大きく地殻応力が卓越した場所でトンネル掘削時などにおいて応力開放により発生する現象であり、地震による応力解放によっても発生する可能性がある。山はねが発生した場合、坑道周辺母岩への影響や、山はねによる崩落物が人工バリアに直撃することによる人工バリアのバリア特性や安全機能への影響が想定される。

a-3: 坑道周辺岩盤における亀裂形成

この地震による影響要因は、FEP データベースの収録情報【FEP-③】から特定したものである。坑道周辺岩盤の亀裂形成により、坑道周辺母岩の掘削影響領域の拡大や、それに伴う緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材のバリア特性や安全機能への影響が想定される。

a-4: 坑道周辺岩盤における水圧変化

この地震による影響要因は、FEP データベースの収録情報【FEP-④】から特定したものである。坑道周辺岩盤の水圧が上昇することにより、緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材のバリア特性や安全機能への影響が想定される。

b-1：地震動によるガラス固化体の破損

この地震による影響要因は、FEP データベースの収録情報【FEP-①】から特定したものである。

廃棄体運搬・積替え作業時、定置作業時に地震動が発生した場合、取り扱い装置からの廃棄体の落下などにより、ガラス固化体が損傷することが考えられる。さらに、損傷したガラス固化体をそのまま定置した場合、処分場閉鎖後にガラス固化体のバリア特性や安全機能に影響することが想定される。

b-2：地震動によるオーバーパックスの破損

この地震による影響要因は、FEP データベースの収録情報【FEP-①】から特定したものである。

廃棄体運搬・積替え作業時、定置作業時に地震動が発生した場合、取り扱い装置からの廃棄体の落下などにより、オーバーパックスが損傷することが考えられる。さらに、損傷したオーバーパックスをそのまま定置した場合、処分場閉鎖後にオーバーパックスのバリア特性や安全機能に影響することが想定される。

b-3：地震動による緩衝材の破損

この地震による影響要因は、FEP データベースの収録情報【FEP-①】から特定したものである。

緩衝材ブロック運搬・積替え作業時、定置作業時に地震動が発生した場合、取り扱い装置からの緩衝材ブロックの落下などにより、緩衝材ブロックが損傷することが考えられる。また、緩衝材定置作業時に地震動が発生した場合、既に定置済みの緩衝材が地震動によりひび割れ・剥離等の損傷を受けることが考えられる。さらに、損傷した部分をそのままにして、緩衝材を定置すると、処分場閉鎖後に緩衝材のバリア特性や安全機能に影響することが想定される。

b-4：地震動による粘土プラグの破損

この地震による影響要因は、FEP データベースの収録情報【FEP-①】から特定したものである。

粘土プラグの運搬・積替え作業時、定置作業時に地震動が発生した場合、取り扱い装置からの粘土プラグの落下などにより、粘土プラグが損傷することが考えられる。また、粘土プラグ設置作業時に地震動が発生した場合、既に設置済みの粘土プラグが地震動によりひび割れ・剥離等の損傷を受けることが考えられる。さらに、損傷した部分をそのままにして、粘土プラグの設置作業を続けた場合、処分場閉鎖後に粘土プラグのバリア特性や安全機能に影響することが想定される。

b-5：地震動による埋め戻し材の破損

この地震による影響要因は、FEP データベースの収録情報【FEP-①】から特定したものである。

坑道埋め戻し作業時に地震動が発生した場合、既に埋め戻し済みまたは転圧途中の埋め戻し材が地震動によりひび割れ・剥離等の損傷を受けることが考えられる。さらに、損傷した部分をそのままにして、坑道の埋め戻しを続けた場合、処分場閉鎖後に埋め戻し材のバリア特性や安全機能に影響することが想定される。

b-6：地震動による力学プラグの破損

この地震による影響要因は、FEP データベースの収録情報【FEP-①】から特定したものである。

力学プラグ設置作業時に地震動が発生した場合、まだ所定の強度が発現していない養生中のコンクリートに地震動が作用することによって、コンクリートのひび割れ、剥離などが生じ、力学プラグの強度や耐久性に影響することが考えられる。さらに、損傷をそのままにした場合、処分場閉鎖後に緩衝材や埋め戻し材の膨潤圧により力学プラグが破壊し、緩衝材や埋め戻し材のバリア特性や安全機能に影響することが想定される。

c-1：坑口における地盤の崩落、坑口の閉塞

この地震による逸脱事象は、地震によるトンネルの被害事例結果【事例-①】から抽出したものである。坑口部の岩盤が崩落することによって、坑道への電源供給や坑道からの地下水の排出に支障がきたすことが考えられる。それに伴って坑道が冠水することにより、緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材の流出のバリア特性や安全機能に影響することが想定される。

c-2：坑口における覆工コンクリートの破損

この地震による逸脱事象は、地震によるトンネルの被害事例結果【事例-②】から抽出したものである。坑口部の覆工コンクリートが破損し、落下することで、坑道への電源供給や坑道からの地下水の排出に支障がきたすことが考えられる。それに伴って坑道が冠水することにより、緩衝材、粘土プラグ、埋め戻し材の流出のバリア特性や安全機能に影響することが想定される。

c-3：坑道における地質不良区間での覆工コンクリートや路盤の破損

この地震による逸脱事象は、地震によるトンネルの被害事例結果【事例-④】から抽出したものである。処分坑道で覆工コンクリートが破損し崩落したり、路盤が損傷することによって、坑道周辺母岩のバリア特性や安全機能に影響することが想定される。

3.2 地震による逸脱事象および安全機能への影響の連鎖

2.2 に示した方法に基づき、3.1 で特定した地震による影響要因によって人工バリア・天然バリアに起こる可能性のある逸脱事象を整理した結果、各構成要素に対して表 3-4 に示す計 31 通りの逸脱事象を導出した。

表 3-4 地震による逸脱事象の整理結果

構成要素	逸脱事象	地震による影響要因
ガラス固化体	(a) ガラス固化体のひび割れ・破壊	a-1, a-2, b-1
	(b) 火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生	a-1, a-2
	(c) 火災発生に伴うガラス固化体の変質	a-1, a-2
オーバーパック	(a) オーバーパック表面へのキズ形成	a-1, a-2, b-2
	(b) 火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成	a-1, a-2
	(c) 火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解	a-1, a-2
緩衝材	(a) 緩衝材のひび割れ・剥離	a-1, a-2, b-3
	(b) 掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出	a-1, a-2, a-3
	(c) 処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出	a-1, a-2
	(d) 力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出	a-1, a-2, b-6
	(e) 火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生	a-1, a-2
	(f) 火災発生に伴う緩衝材の変質	a-1, a-2
	(g) 坑道内の水圧上昇に伴う緩衝材の流出	a-4
	(h) 坑道からの排水不良に伴う緩衝材の流出	c-1, c-2
粘土プラグ	(a) 粘土プラグのひび割れ・剥離	a-1, a-2, b-4
	(b) 掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出	a-1, a-2, a-3
	(c) 火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生	a-1, a-2
	(d) 火災発生に伴う粘土プラグの変質	a-1, a-2
	(e) 坑道内の水圧上昇に伴う粘土プラグの流出	a-4
	(f) 坑道からの排水不良に伴う粘土プラグの流出	c-1, c-2
埋め戻し材	(a) 埋め戻し材のひび割れ・剥離	a-1, a-2, b-5
	(b) 掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出	a-1, a-2, a-3
	(c) 力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出	a-1, a-2, b-6
	(d) 火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生	a-1, a-2
	(e) 火災発生に伴う埋め戻し材の変質	a-1, a-2
	(f) 坑道内の水圧上昇に伴う埋め戻し材の流出	a-4
	(g) 坑道からの排水不良に伴う埋め戻し材の流出	c-1, c-2
母岩 (掘削影響領域を含む)	(a) 坑道周辺の掘削影響領域の拡大	a-1, a-2, a-3, c-3
	(b) 処分孔周辺の掘削影響領域の拡大	a-1, a-2, a-3
	(c) 火災発生に伴う母岩への亀裂の発生	a-1, a-2
	(d) 火災発生に伴う母岩の変質	a-1, a-2

逸脱事象の検討の詳細、および、2.2 の方法に基づく逸脱事象から安全機能への影響の連鎖の想定結果を、以下に示す。なお図 3-1～図 3-31 において、左色枠は地震による影響要因（色は地震発生時の各事業段階に対応（表 2-2 を参照））、青字は逸脱事象、赤字はバリア特性への影響、黄枠は安全機能への影響を表す。

(1) ガラス固化体

ガラス固化体の地震による逸脱事象は、(a) ガラス固化体のひび割れ・破壊、(b) 火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生、および、(c) 火災発生に伴うガラス固化体の変質が考えられる。

(a) ガラス固化体のひび割れ・破壊

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1)、坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2)、および、地震動によるガラス固化体の破損 (廃棄体運搬・積み替え・定置作業時の落下による破損) (b-1) 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。その結果、ガラス固化体の表面積が増加し、オーバーパック破損後にガラス固化体と地下水が接触し、ガラス固化体の変質・溶解へ影響を及ぼす可能性がある。

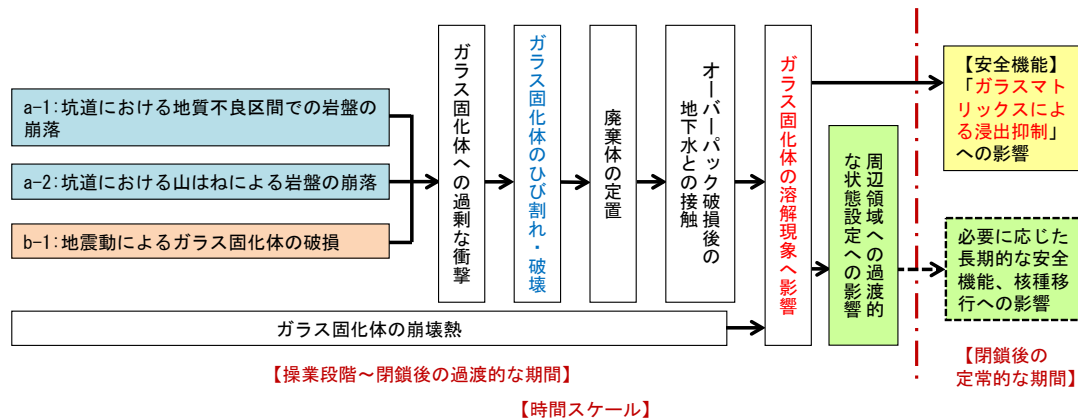


図 3-1 ガラス固化体のひび割れ・破壊による影響

(b) 火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) による機器への岩盤の直撃により火災が発生し、熱応力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。その結果、ガラス固化体の表面積が増加し、オーバーパック破損後にガラス固化体と地下水が接触し、ガラス固化体の変質・溶解へ影響を及ぼす可能性がある。

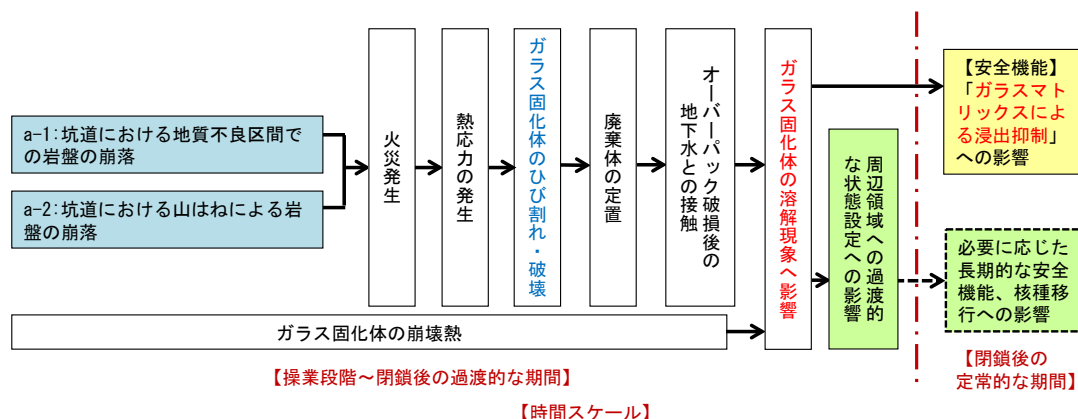


図 3-2 火災発生に伴うガラス固化体への亀裂の発生による影響

(c) 火災発生に伴うガラス固化体の変質

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) による機器への岩盤の直撃により火災が発生し、温度上昇によりガラス固化体の変質が起こる可能性がある。その結果、オーバーパック破損後にガラス固化体と地下水が接触し、ガラス固化体の変質・溶解へ影響を及ぼす可能性がある。

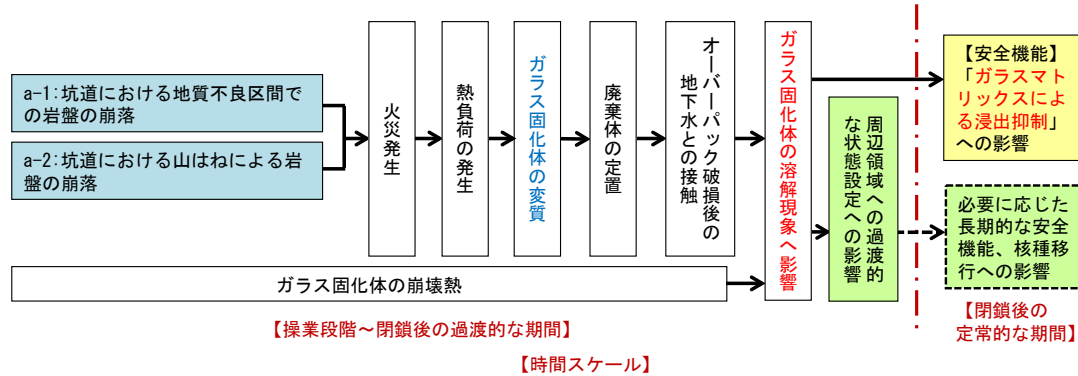


図 3-3 火災発生に伴うガラス固化体の変質による影響

(2) オーバーパック

オーバーパックの地震による逸脱事象は、(a) オーバーパック表面へのキズ形成、(b) 火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成、および、(c) 火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解が考えられる。

(a) オーバーパック表面へのキズ形成

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1)、坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2)、および、地震動によるオーバーパックの破損 (廃棄体運搬・積み替え・定置作業時の落下による破損) (b-2) 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。その結果、廃棄体定置後オーバーパック周囲の地下水化学や外力およびガラス固化体からの崩壊熱の影響を受け、オーバーパックの腐食の進展・腐食形態へ影響を及ぼす可能性がある。

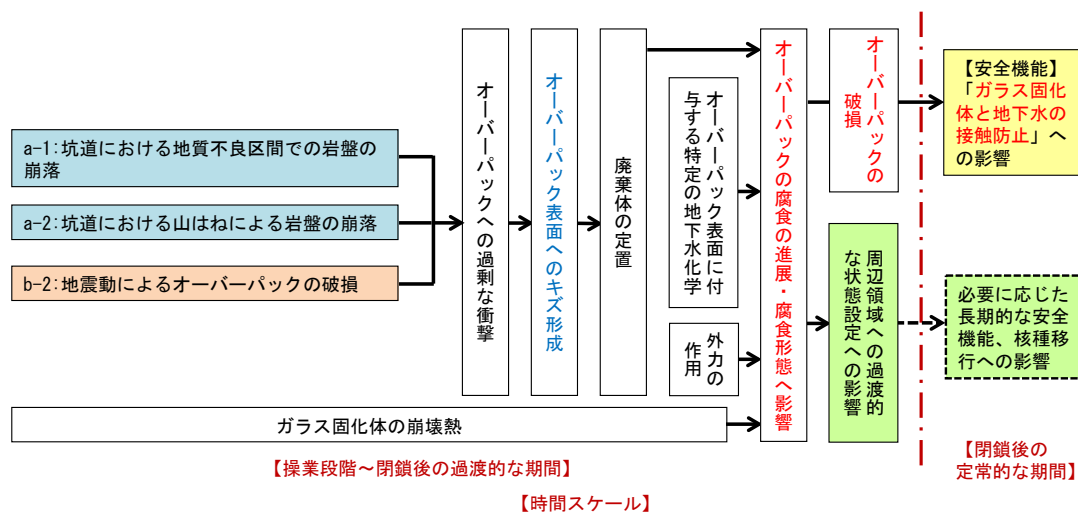


図 3-4 オーバーパック表面へのキズ形成による影響

(b) 火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落（a-1）や坑道における山はねによる岩盤の崩落（a-2）による機器への岩盤の直撃により火災が発生し、熱応力によりオーバーパック表面へのキズ形成が起こる可能性がある。その結果、廃棄体定置後、オーバーパック周囲の地下水化学や外力およびガラス固化体からの崩壊熱の影響を受け、オーバーパックの腐食の進展・腐食形態へ影響を及ぼす可能性がある。

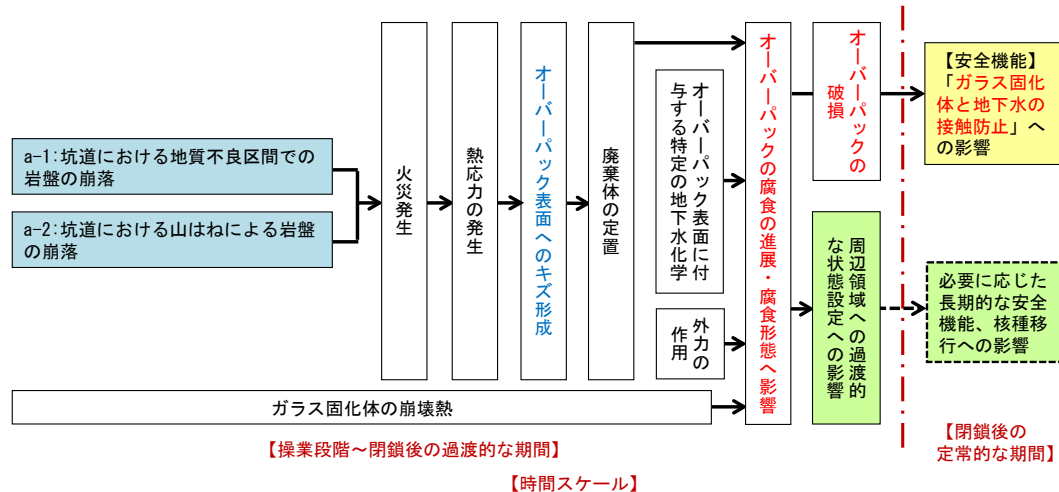


図 3-5 火災発生に伴うオーバーパック表面へのキズ形成による影響

(c) 火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落（a-1）や坑道における山はねによる岩盤の崩落（a-2）による機器への岩盤の直撃により火災が発生し、温度上昇によりオーバーパックの変質・融解が起こる可能性がある。その結果、廃棄体定置後、オーバーパック周囲の地下水化学や外力およびガラス固化体からの崩壊熱の影響を受け、オーバーパックの腐食の進展・腐食形態へ影響を及ぼす可能性がある。

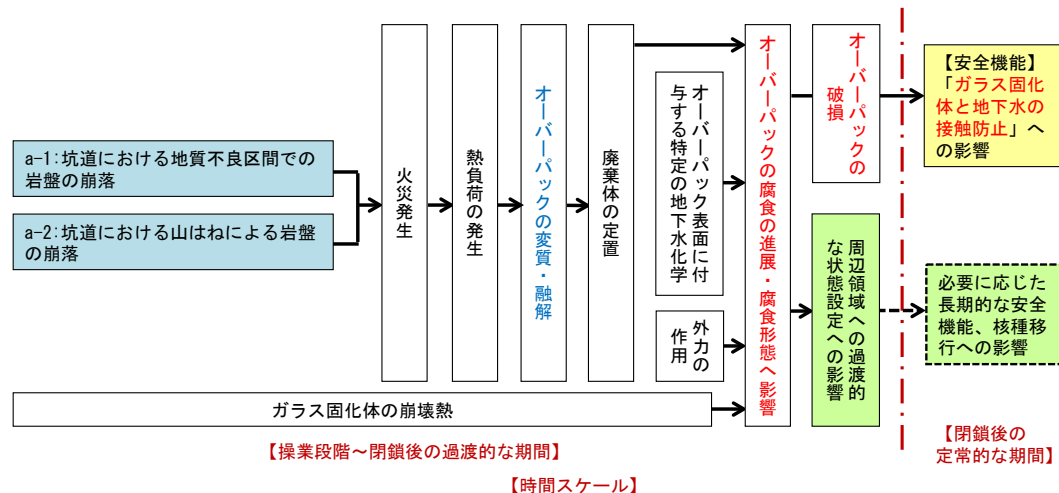


図 3-6 火災発生に伴うオーバーパックの変質・融解による影響

(3) 緩衝材

緩衝材の地震による逸脱事象は、(a) 緩衝材ブロックのひび割れ・剥離、(b) 掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出、(c) 処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出、(d) 力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出、(e) 火災発生に伴う緩衝材への亀裂発生、(f) 火災発生に伴う緩衝材の変質、および、(g) 坑道内の水圧上昇に伴う緩衝材の流出が考えられる。

(a) 緩衝材ブロックのひび割れ・剥離

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1)、坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2)、および、地震動による緩衝材の破損 (緩衝材運搬・積み替え・定置作業時の落下による破損、および、定置後の地震動による破損) (b-3) により、緩衝材ブロックのひび割れ・剥離が起こる可能性がある。その結果、ブロック定置作業時において積み上げ誤差が生じ、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化することで、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

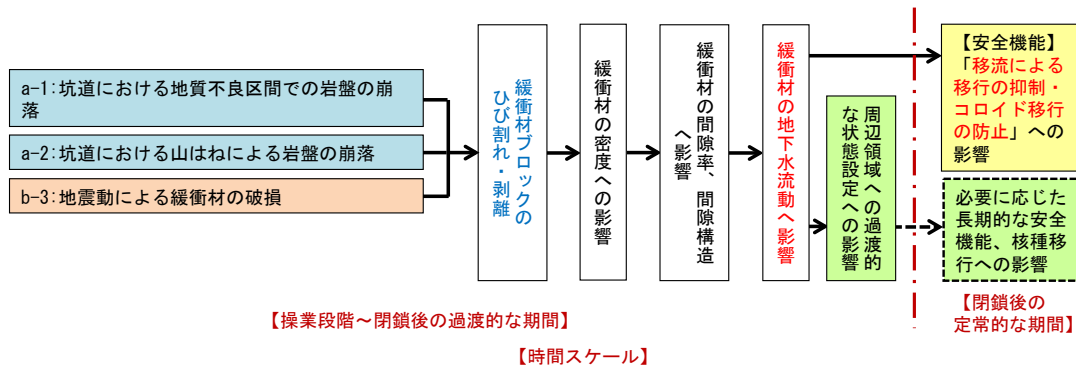


図 3-7 緩衝材ブロックのひび割れ・剥離による影響

(b) 掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1)、坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) および坑道周辺岩盤における亀裂形成 (a-3) 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。その結果、母岩の間隙率・間隙構造の変化が生じ、母岩と接する緩衝材が流出することが考えられる。ただし以下において流出とは、空隙側への膨潤による想定領域外への流出、および、浸食による流出の両方を指すものとする。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

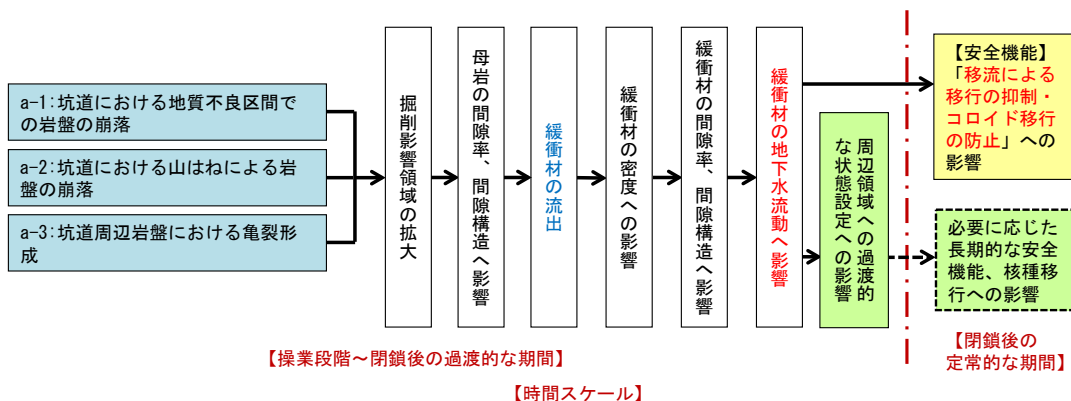


図 3-8 掘削影響領域の拡大に伴う緩衝材の流出による影響

(c) 処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出

操業時に坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) が発生し、コンクリート製の処分孔上部キャップに直撃した場合、コンクリートの強度・耐久性の低下が起こる可能性がある。それにより、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、緩衝材が流出することが考えられる。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

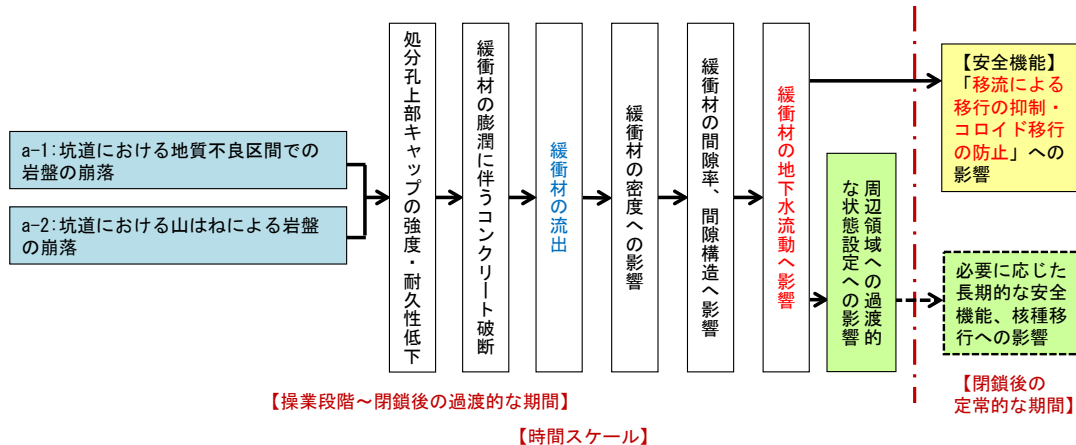


図 3-9 処分孔上部キャップの破損に伴う緩衝材の流出による影響

(d) 力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) により、養生中のコンクリートに岩盤が直撃した場合、コンクリートに衝撃が加わることで力学プラグの強度・耐久性の低下が起こる可能性がある。また、地震動により力学プラグの破損 (力学プラグ運搬・積み替え・定置作業時の落下による破損、および、定置後の地震動による破損) (b-3) が起こる可能性がある。これらにより、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、緩衝材が流出することが考えられる。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

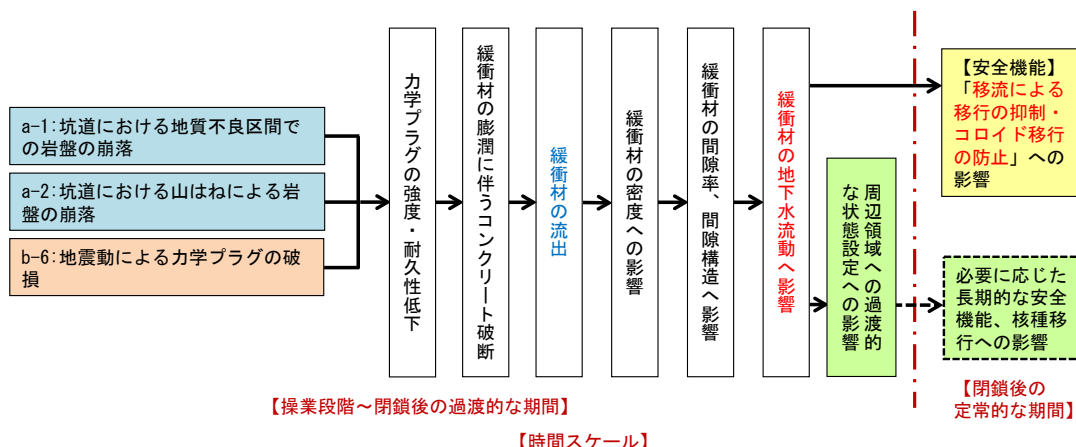


図 3-10 力学プラグの破損に伴う緩衝材の流出による影響

(e) 火災発生に伴う緩衝材への亀裂の発生

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) による機器への岩盤の直撃により火災が発生し、緩衝材が高温にさらされ、亀裂の進展が起こる可能性がある。その結果、ブロック定置作業時においてブロックの積み上げ誤差が生じ、緩衝材の密度、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、および、定置された緩衝材が高温にさらされた場合は、定置された緩衝材に亀裂が発生し、緩衝材の間隙率・間隙構造に影響を及ぼし、地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

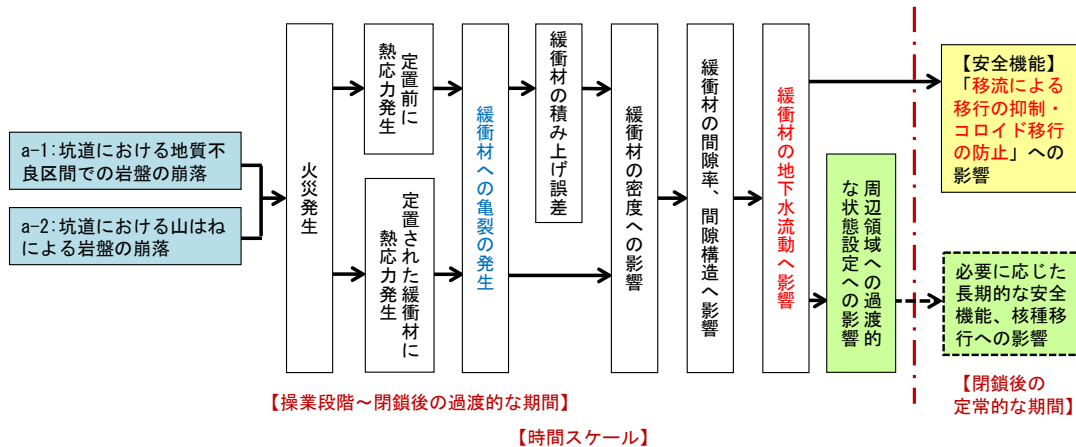


図 3-11 火災発生に伴う緩衝材への亀裂発生による影響

(f) 火災発生に伴う緩衝材の変質

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) による機器への岩盤の直撃により火災発生の際の温度上昇によって、緩衝材の変質が起こる可能性がある。その結果、緩衝材の鉱物組成や膨潤特性が変化することで、緩衝材の収着特性および地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

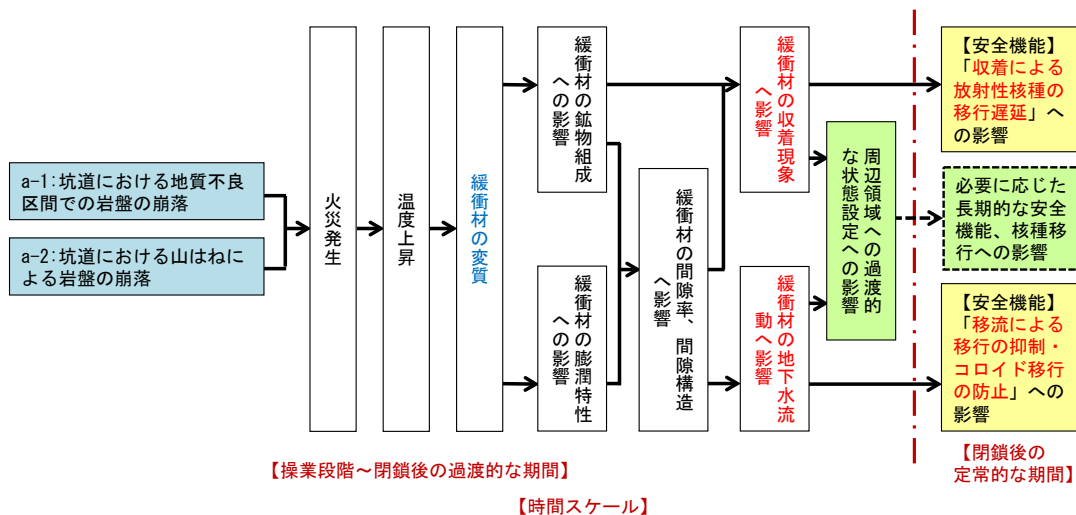


図 3-12 火災発生に伴う緩衝材の変質による影響

(g) 坑道内の水圧上昇に伴う緩衝材の流出

地震動に伴い処分坑道周辺母岩の応力状態が一時的に変化し、坑道周辺岩盤における水圧が変化すること (a-4) により、処分坑道内の湧水量が増加する可能性がある。それにより、定置済みの緩衝材が冠水し、空隙側へ膨潤することが考えられる。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

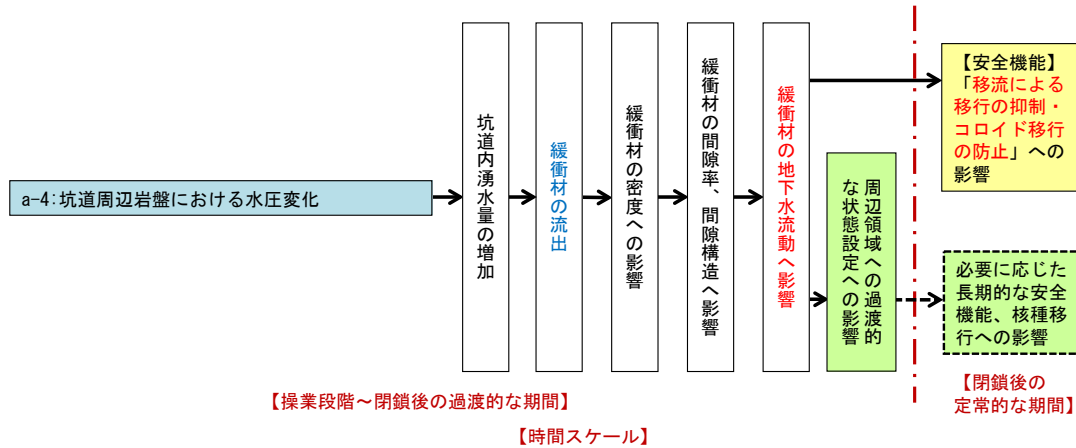


図 3-13 坑道内の水圧上昇に伴う緩衝材の流出

(h) 坑道からの排水不良に伴う緩衝材の流出

地下施設入口における地盤の崩落、閉塞 (c-1) や地下施設入口における覆工コンクリートの破損 (c-2) により、排水管の破損や坑道内への電源供給が停止する可能性がある。それにより、坑道内が排水不良となることで、定置済みの緩衝材が冠水し、空隙側へ膨潤することが考えられる。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、緩衝材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

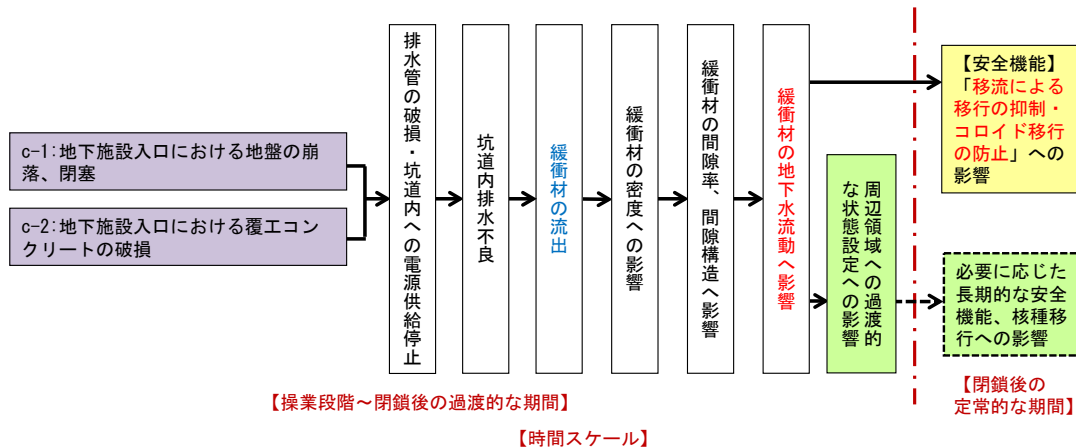


図 3-14 坑道からの排水不良に伴う緩衝材の流出

(4) 粘土プラグ

粘土プラグの地震による逸脱事象は、(a) 粘土プラグのひび割れ・剥離、(b) 掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出、(c) 火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生、(d) 火災発生に伴う粘土プラグの変質、(e) 坑道内の水圧上昇に伴う粘土プラグの流出、および、(f) 坑道からの排水不良に伴う粘土プラグの流出が考えられる。

(a) 粘土プラグのひび割れ・剥離

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1)、坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2)、および、地震動による粘土プラグの破損 (粘土プラグ運搬・積み替え・定置作業時の落下による破損、および、定置後の地震動による破損) (b-4) により、粘土プラグのひび割れ・剥離が生じる可能性がある。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化することで、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

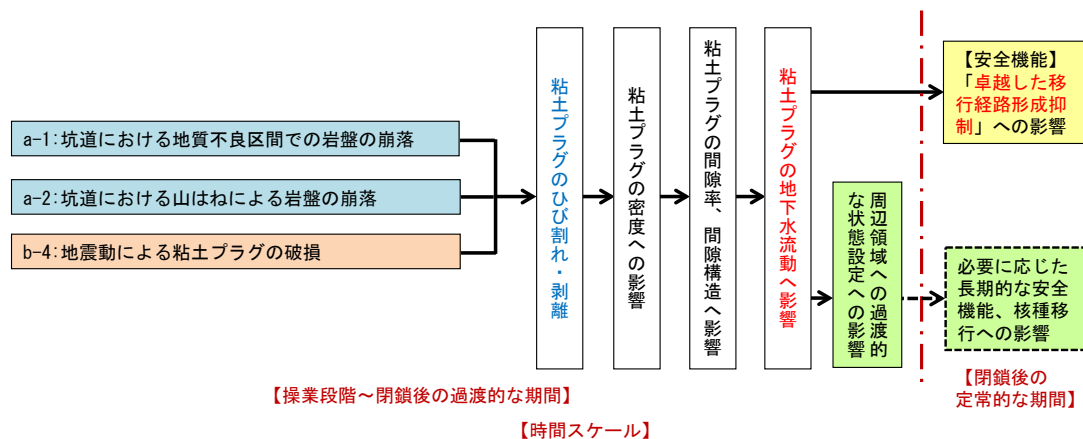


図 3-15 粘土プラグのひび割れ・剥離による影響

(b) 掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1)、坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) および坑道周辺岩盤における亀裂形成 (a-3) により、粘土プラグ周辺の掘削影響領域が拡大することで、岩盤との境界付近に流れが発生し粘土プラグが流出する可能性がある。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

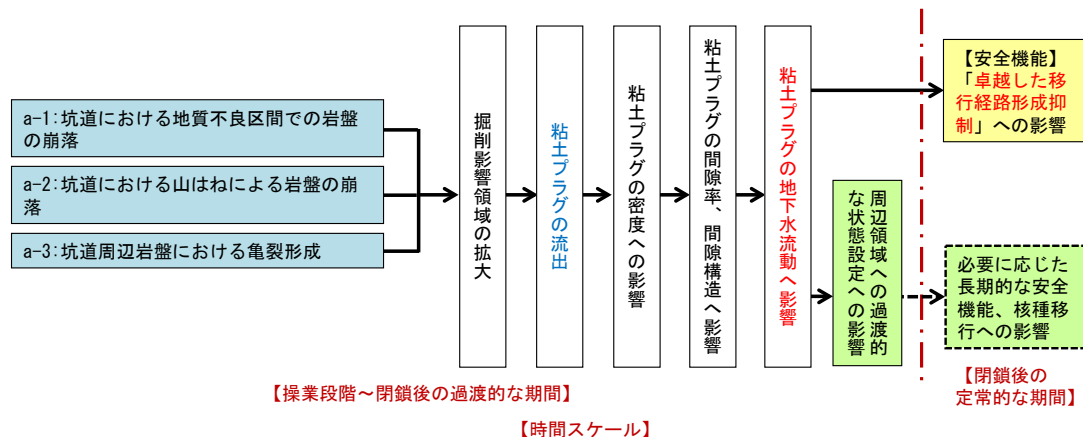


図 3-16 掘削影響領域の拡大に伴う粘土プラグの流出による影響

(c) 火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂の発生

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) による機器への岩盤の直撃により火災が発生し、粘土プラグに熱応力が発生し、亀裂が発生する可能性がある。その結果、粘土プラグの密度、間隙率・間隙構造が変化し、地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

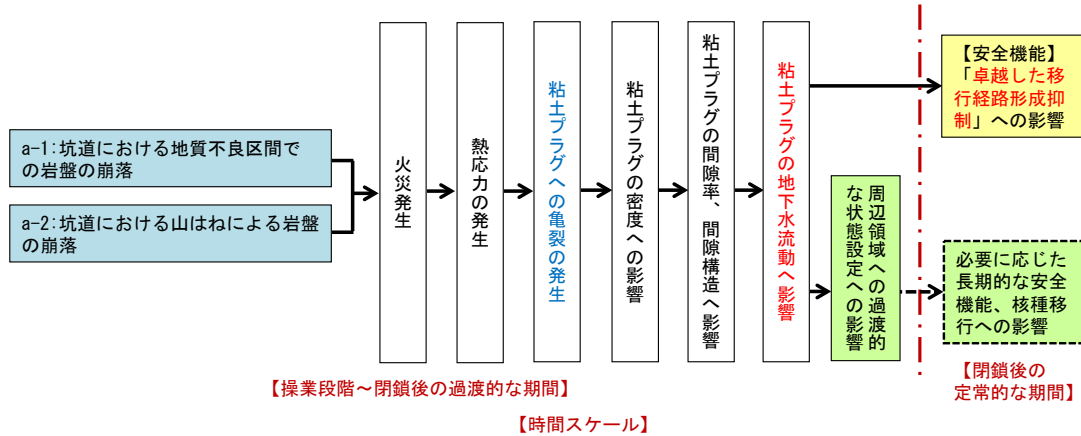


図 3-17 火災発生に伴う粘土プラグへの亀裂発生による影響

(d) 火災発生に伴う粘土プラグの変質

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) による機器への岩盤の直撃により火災発生の際の温度上昇によって、粘土プラグの変質が起こる可能性がある。その結果、粘土プラグの鉱物組成や膨潤特性が変化することで、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

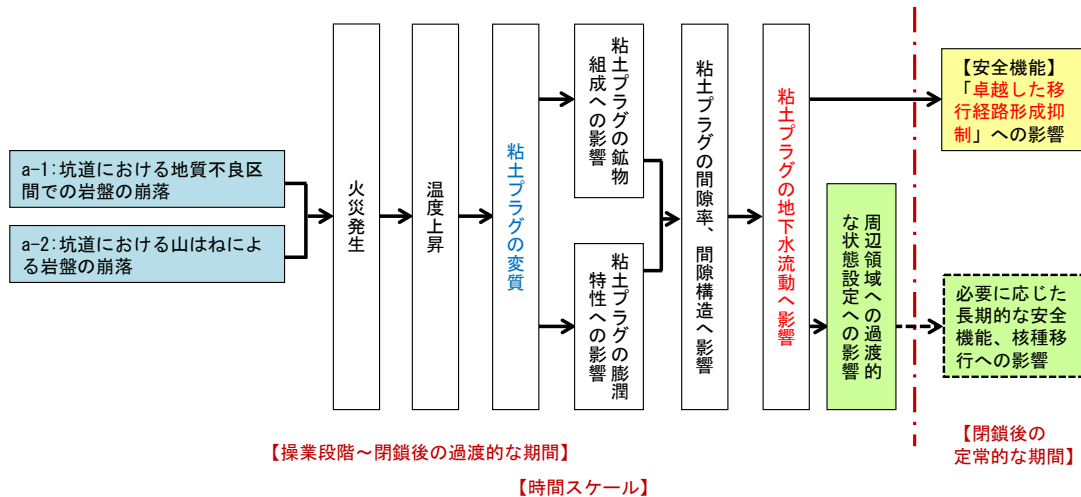


図 3-18 火災発生に伴う粘土プラグの変質による影響

(e) 坑道内の水圧上昇に伴う粘土プラグの流出

地震動に伴い処分坑道周辺母岩の応力状態が一時的に変化し、坑道周辺岩盤における水圧が変化すること (a-4) により、処分坑道内の湧水量が増加する可能性がある。それにより、浸潤に伴い粘土プラグが空隙側へ膨潤し、流出することが考えられる。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

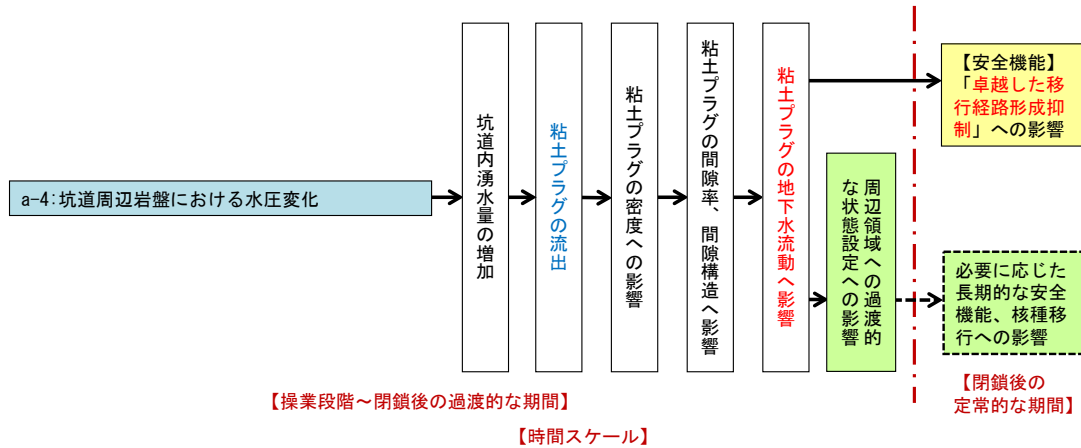


図 3-19 坑道内の水圧上昇に伴う粘土プラグの流出

(f) 坑道からの排水不良に伴う粘土プラグの流出

地下施設入口における地盤の崩落、閉塞 (c-1) や地下施設入口における覆工コンクリートの破損 (c-2) により、排水管の破損や坑道内への電源供給が停止する可能性がある。それにより、坑道内が排水不良となることで、粘土プラグが浸潤に伴って空隙側へ膨潤することが考えられる。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、粘土プラグの地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

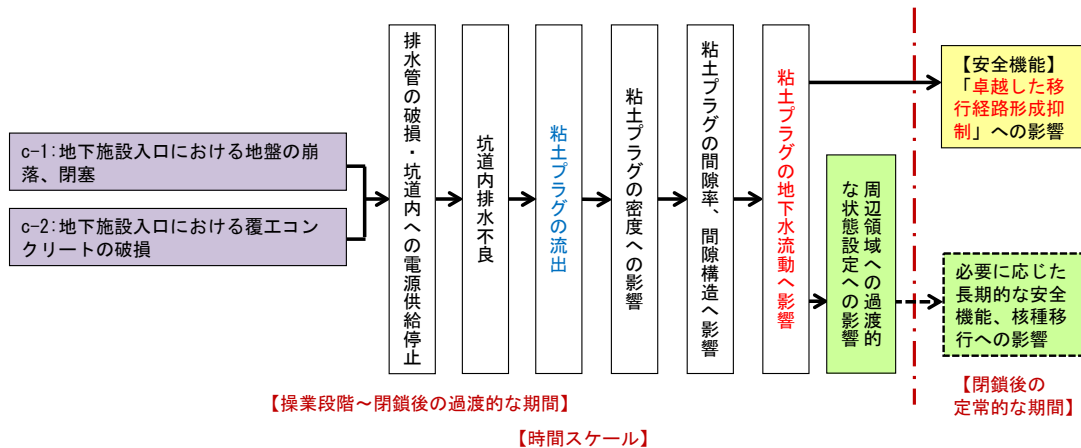


図 3-20 坑道からの排水不良に伴う粘土プラグの流出

(5) 埋め戻し材

埋め戻し材の地震による逸脱事象は、(a) 埋め戻し材のひび割れ・剥離、(b) 掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出、(c) 力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出、(d) 火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生、(e) 火災発生に伴う埋め戻し材の変質、(f) 坑道内の水圧上昇に伴う埋め戻し材の流出、(g) 坑道からの排水不良に伴う埋め戻し材の流出が考えられる。

(a) 埋め戻し材のひび割れ・剥離

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1)、坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2)、および、地震動による埋め戻し材の破損（埋め戻し材定置作業時の落下による破損、および、定置後の地震動による破損）(b-5) により、埋め戻し材のひび割れ・剥離が生じる可能性がある。その結果、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化することで、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

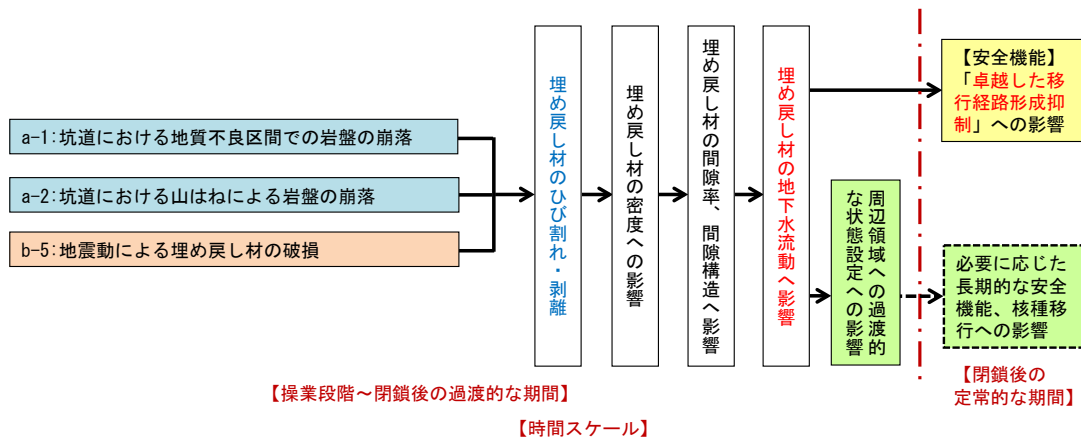


図 3-21 埋め戻し材のひび割れ・剥離による影響

(b) 掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1)、坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) および坑道周辺岩盤における亀裂形成 (a-3) 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。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。

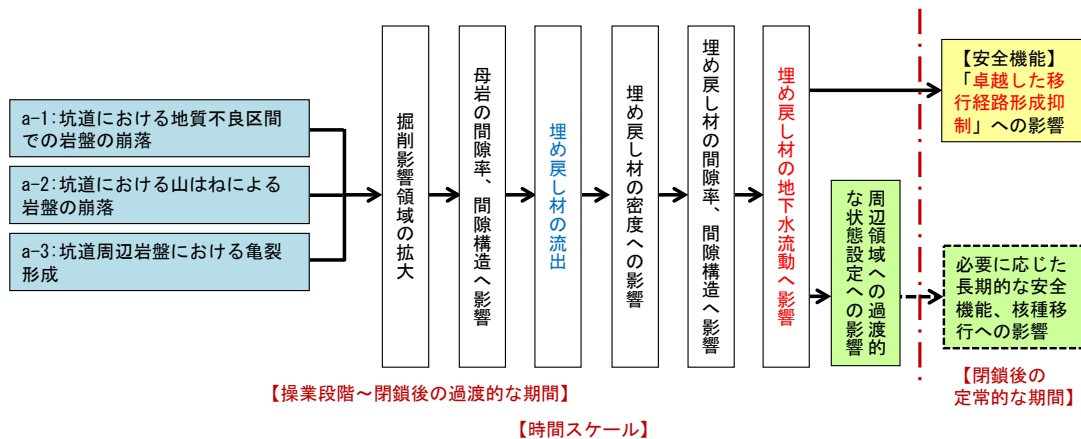


図 3-22 掘削影響領域の拡大に伴う埋め戻し材の流出による影響

(c) 力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) により、養生中のコンクリートに岩盤が直撃した場合、コンクリートに衝撃が加わることで力学プラグの強度・耐久性の低下が起こる可能性がある。また、地震動により力学プラグの破損 (力学プラグ運搬・積み替え・定置作業時の落下による破損、および、定置後の地震動による破損) (b-3) が起こる可能性がある。これらにより、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、埋め戻し材が流出することが考えられる。その結果、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

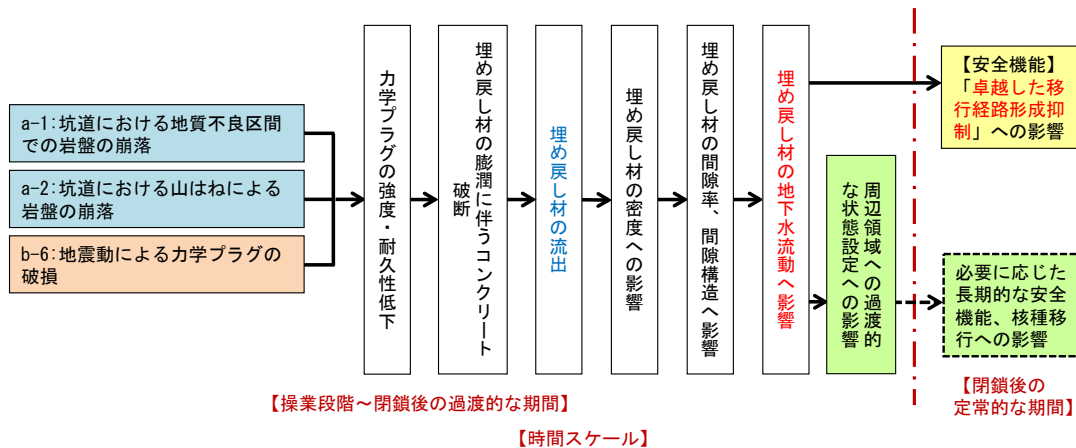


図 3-23 力学プラグの破損に伴う埋め戻し材の流出による影響

(d) 火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂の発生

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) による機器への岩盤の直撃により火災が発生し、埋め戻し材が高温にさらされ、亀裂が発生する可能性がある。その結果、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

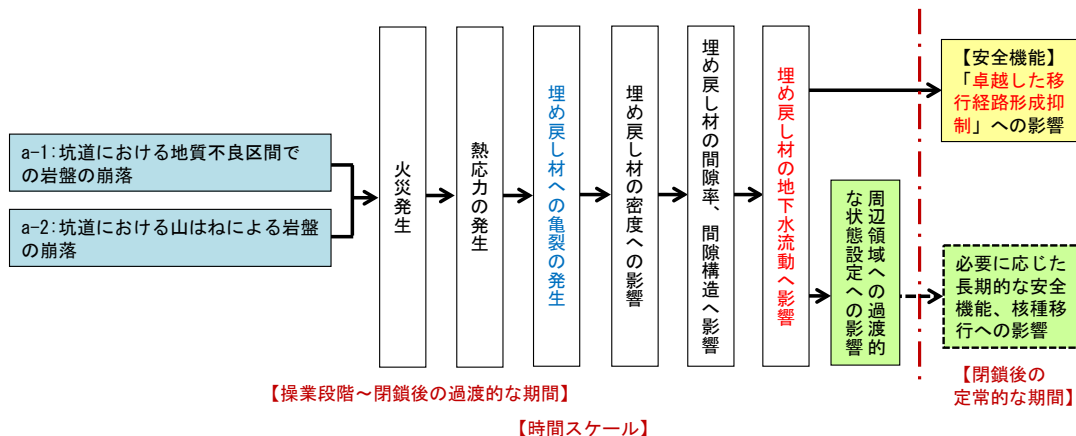


図 3-24 火災発生に伴う埋め戻し材への亀裂発生による影響

(e) 火災発生に伴う埋め戻し材の変質

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) による機器への岩盤の直撃により、火災発生の際の温度上昇によって、埋め戻し材の変質が起こる可能性がある。その結果、埋め戻し材の鉱物組成や膨潤特性が変化することで、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

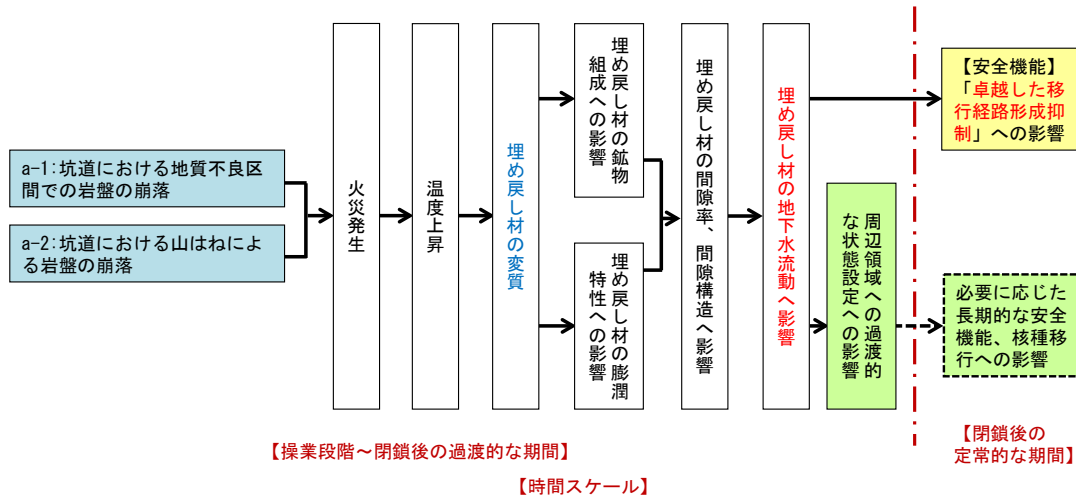


図 3-25 火災発生に伴う埋め戻し材の変質による影響

(f) 坑道内の水圧上昇に伴う埋め戻し材の流出

地震動に伴い処分坑道周辺母岩の応力状態が一時的に変化し、坑道周辺岩盤における水圧が変化すること (a-4) により、処分坑道内の湧水量が増加する可能性がある。それにより、埋め戻し材が浸潤に伴い、空隙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、間隙率、間隙構造が変化し、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

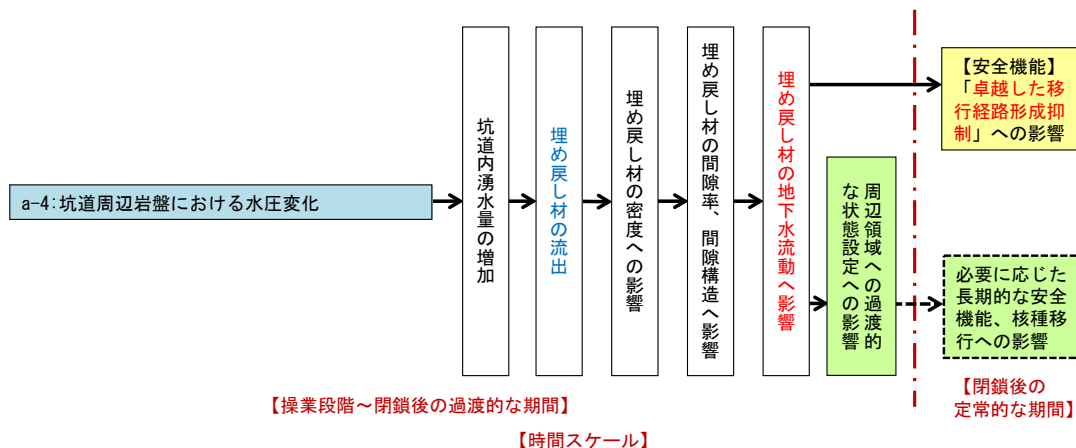


図 3-26 坑道内の水圧上昇に伴う埋め戻し材の流出による影響

(g) 坑道からの排水不良に伴う埋め戻し材の流出

地下施設入口における地盤の崩落、閉塞 (c-1) や地下施設入口における覆工コンクリートの破損 (c-2) により、排水管の破損や坑道内への電源供給が停止する可能性がある。それにより、坑道内が排水不良となることで、埋め戻し材が浸潤に伴い、空隙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、間隙率、間隙構造が変化し、埋め戻し材の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

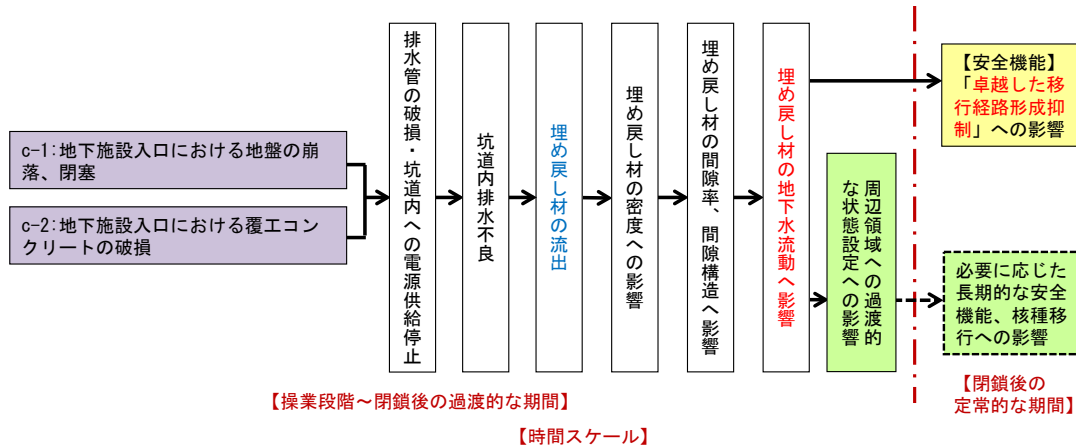


図 3-27 坑道からの排水不良に伴う埋め戻し材の流出による影響

(6) 母岩（掘削影響領域を含む）

母岩の地震による逸脱事象は、(a) 坑道周辺の掘削影響領域の拡大、(b) 処分孔周辺の掘削影響領域の拡大、(c) 火災発生に伴う母岩への亀裂の発生、および、(d) 火災発生に伴う母岩の変質が考えられる。

(a) 坑道周辺の掘削影響領域の拡大

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1)、坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) および坑道周辺岩盤における亀裂形成 (a-3)、坑道における地質不良区間での覆工コンクリートや路盤の破損 (c-3) 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。その結果、母岩の間隙率、間隙構造が変化し、母岩の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

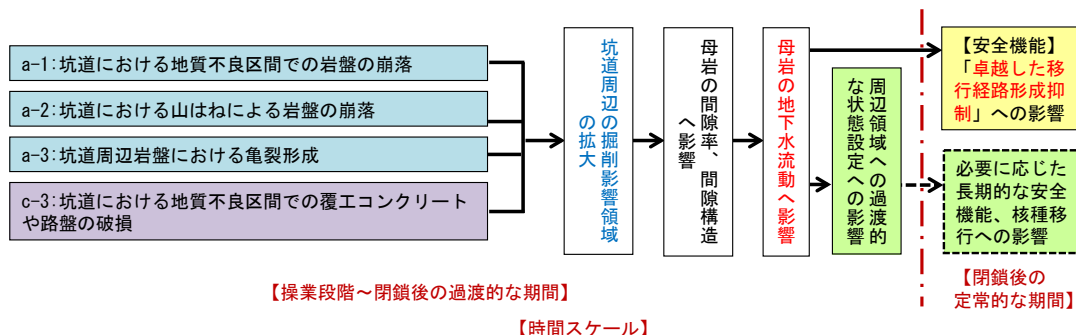


図 3-28 坑道周辺の掘削影響領域の拡大による影響

(b) 処分孔周辺の掘削影響領域の拡大

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1)、坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) および坑道周辺岩盤における亀裂形成 (a-3) 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。その結果、母岩の間隙率、間隙構造が変化し、母岩の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

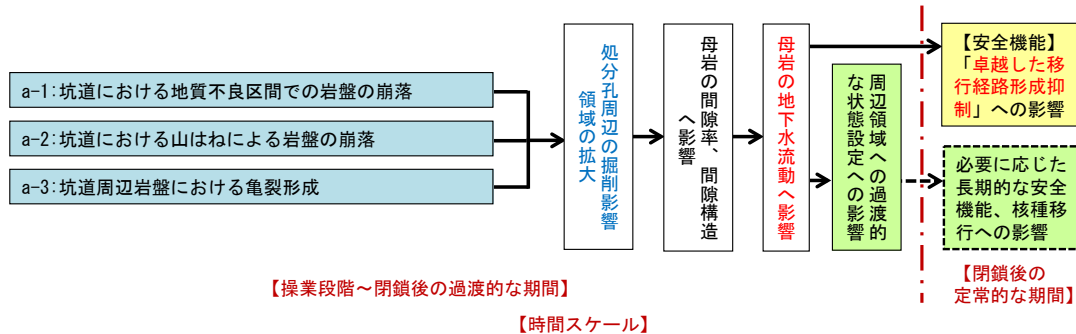


図 3-29 処分孔周辺の掘削影響領域の拡大による影響

(c) 火災発生に伴う母岩への亀裂の発生

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) による機器への岩盤の直撃により火災が発生し、母岩が高温にさらされ、熱膨張により応力が発生し、母岩に亀裂が発生する可能性がある。その結果、母岩の間隙率、間隙構造が変化し、母岩の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

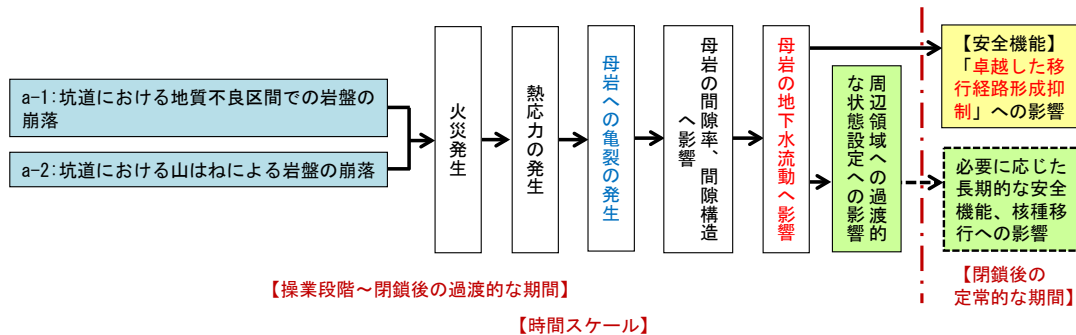


図 3-30 火災発生に伴う母岩への亀裂発生による影響

(d) 火災発生に伴う母岩の変質

坑道における地質不良区間での岩盤の崩落 (a-1) や坑道における山はねによる岩盤の崩落 (a-2) による機器への岩盤の直撃により、火災発生の際の温度上昇によって、母岩の変質が起こる可能性がある。その結果、母岩の鉱物組成が変化することで、母岩の地下水流動へ影響を及ぼす可能性がある。

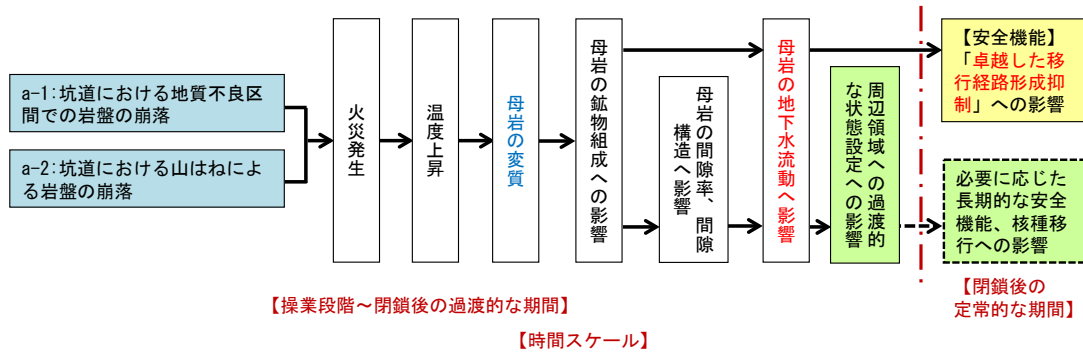


図 3-31 火災発生に伴う母岩の変質による影響

4. まとめ

原子力機構では、将来のシナリオ設定の妥当性を判断するために、処分の工学技術の適用に関連したシナリオを、①工学技術の適用に伴いヒューマンエラー等の事故・人的要因が発生する場合と②工学技術を適用する際に地質・気候関連事象が発生する場合の2つに区分して、その設定手法について検討している。本研究では、②の地質・気候関連事象を起因事象としたシナリオの検討を行い、地震の発生による長期安全性への影響に関する評価を行った。

まず、地震による地下施設への影響事例を整理し、被害とその要因との関係について分析することで、地震発生により起こりうる影響要因を特定した。その情報を基に、処分場の建設・操業・閉鎖段階の期間に地震が発生した場合に起こる可能性がある逸脱事象を特定した。そして、地層処分のシナリオ構築のためのFEPデータベースに記載されている科学的知見情報をもとに、特定した逸脱事象により起こる可能性のあるバリア特性や安全機能への影響の連鎖を想定し、一連の影響の連鎖をシナリオとして整理した。

その結果、地震による影響要因は13個、地震による逸脱事象は31事象に特定された（表 3-3 および表 3-4）。さらに、地震による逸脱事象により連鎖的に発生すると考えられる人工バリア・天然バリアの特性および安全機能までの影響の連鎖を整理し、全72通りのシナリオを作成した。作成したシナリオを、地震による影響要因ごとに整理した結果を、表 4-1 に示す。

表 4-1 地震発生を起因事象としたシナリオの検討結果 (1/6)

地震による 影響要因	構成要素	シナリオ
坑道における 地質不良区間 での岩盤の崩 落【a-1】	ガラス固化 体	a-1-G1: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械への崩落物の直撃などによりガラス固化体に過剰な衝撃が加わり、ガラス固化体のひび割れ・破壊が起こる。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバックが破損し、地下水と接触したときに、ガラス固化体の化学的変質・溶解へ影響を与える。そして、ガラス固化体の安全機能である「ガラスマトリックスによる浸出抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-G2: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、ガラス固化体が高温にさらされ、熱応力によりガラス固化体に亀裂が発生する。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバックが破損し、地下水と接触したときに、ガラス固化体の化学的変質・溶解へ影響を与える。そして、ガラス固化体の安全機能である「ガラスマトリックスによる浸出抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-G3: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、ガラス固化体が高温にさらされ、ガラス固化体の結晶構造などの化学特性に影響を及ぼす。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバックが破損し、地下水と接触したときに、ガラス固化体の化学的変質・溶解へ影響を与える。そして、ガラス固化体の安全機能である「ガラスマトリックスによる浸出抑制」に影響を及ぼす。
	オーバーパ ック	a-1-OP1: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械への崩落物の直撃などによりオーバーバックに過剰な衝撃が加わり、オーバーバック表面にキズが形成する。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバック周囲の地下水組成や応力状態、温度条件に依存して、オーバーバックの腐食形態や腐食の進展に影響を与える。そして、オーバーバックの安全機能である「ガラス固化体と地下水の接触防止」に影響を及ぼす。
		a-1-OP2: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、オーバーバックが高温にさらされ、熱応力によりオーバーバックが変形する。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバック周囲の地下水組成や応力状態、温度条件に依存して、オーバーバックの腐食形態や腐食の進展に影響を与える。そして、オーバーバックの安全機能である「ガラス固化体と地下水の接触防止」に影響を及ぼす。
		a-1-OP3: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、オーバーバックが高温にさらされ、オーバーバックが変質・融解する。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバック周囲の地下水組成や応力状態、温度条件に依存して、オーバーバックの腐食形態や腐食の進展に影響を与える。そして、オーバーバックの安全機能である「ガラス固化体と地下水の接触防止」に影響を及ぼす。
	緩衝材	a-1-B1: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械への崩落物の直撃などにより緩衝材に過剰な衝撃が加わり、緩衝材のひび割れ・剥離が起こる。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
		a-1-B2: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、処分孔周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、母岩と接する緩衝材が流出することで、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
		a-1-B3: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生し、コンクリート製の処分孔上部キャップに直撃すると、コンクリートの強度・耐久性の低下が起こる。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、緩衝材が流出することで、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
		a-1-B4: 力学プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生し、養生中のコンクリートに岩盤が直撃すると、力学プラグの強度・耐久性の低下が起こる。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、緩衝材が流出することで、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
		a-1-B5: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、緩衝材が高温にさらされ、熱応力により緩衝材に亀裂が発生する。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
		a-1-B6: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、緩衝材が高温にさらされ、緩衝材が変質する。その結果、緩衝材の鉱物組成や膨潤特性が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の収着現象および地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「収着による放射性核種の移行遅延」、「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。

表 4-1 地震発生を起因事象としたシナリオの検討結果 (2/6)

地震による 影響要因	構成要素	シナリオ
坑道における 地質不良区間 での岩盤の崩 落【a-1】	粘土プラグ	a-1-D1: 粘土プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械への崩落物の直撃などにより粘土プラグに過剰な衝撃が加わり、粘土プラグのひび割れ・剥離が起こる。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-D2: 粘土プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、母岩と接する粘土プラグが流出することで、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-D3: 粘土プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、粘土プラグが高温にさらされ、熱応力により粘土プラグに亀裂が発生する。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-D4: 粘土プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、粘土プラグが高温にさらされ、粘土プラグが変質する。その結果、粘土プラグの鉱物組成や膨潤特性が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
	埋め戻し材	a-1-B' 1: 埋め戻し材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、既に定置した埋め戻し材への崩落物の直撃などにより、埋め戻し材に過剰な衝撃が加わることで、埋め戻し材のひび割れ・剥離が起こる。その結果、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-B' 2: 埋め戻し材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、母岩と接する埋め戻し材が流出することで、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-B' 3: 力学プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生し、養生中のコンクリートに岩盤が直撃すると、力学プラグの強度・耐久性の低下が起こる。その結果、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、埋め戻し材が流出することで、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-B' 4: 埋め戻し材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、熱応力により埋め戻し材に亀裂が発生する。その結果、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-B' 5: 埋め戻し材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、埋め戻し材が変質する。その結果、埋め戻し材の鉱物組成や膨潤特性が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
	母岩	a-1-H1: 操業時に岩盤の崩落が発生すると、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-H2: 操業時に岩盤の崩落が発生すると、処分孔周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-H3: 操業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、母岩が高温にさらされ、熱応力により母岩に亀裂が発生する。その結果、母岩の間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-1-H4: 操業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、母岩が高温にさらされ、母岩が変質する。その結果、母岩の鉱物組成が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。

表 4-1 地震発生を起因事象としたシナリオの検討結果 (3/6)

地震による 影響要因	構成要素	シナリオ
坑道における 山はねによる 岩盤の崩落 【a-2】	ガラス固化 体	a-2-G1: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械への崩落物の直撃などによりガラス固化体に過剰な衝撃が加わり、ガラス固化体のひび割れ・破壊が起こる。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバックが破損し、地下水と接触したときに、ガラス固化体の化学的変質・溶解へ影響を与える。そして、ガラス固化体の安全機能である「ガラスマトリックスによる浸出抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-G2: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、ガラス固化体が高温にさらされ、熱応力によりガラス固化体に亀裂が発生する。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバックが破損し、地下水と接触したときに、ガラス固化体の化学的変質・溶解へ影響を与える。そして、ガラス固化体の安全機能である「ガラスマトリックスによる浸出抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-G3: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、ガラス固化体が高温にさらされ、ガラス固化体の結晶構造などの化学特性に影響を及ぼす。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバックが破損し、地下水と接触したときに、ガラス固化体の化学的変質・溶解へ影響を与える。そして、ガラス固化体の安全機能である「ガラスマトリックスによる浸出抑制」に影響を及ぼす。
	オーバーパ ック	a-2-OP1: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械への崩落物の直撃などによりオーバーバックに過剰な衝撃が加わり、オーバーバック表面にキズが形成する。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバック周囲の地下水組成や応力状態、温度条件に依存して、オーバーバックの腐食形態や腐食の進展に影響を与える。そして、オーバーバックの安全機能である「ガラス固化体と地下水の接触防止」に影響を及ぼす。
		a-2-OP2: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、オーバーバックが高温にさらされ、熱応力によりオーバーバックが変形する。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバック周囲の地下水組成や応力状態、温度条件に依存して、オーバーバックの腐食形態や腐食の進展に影響を与える。そして、オーバーバックの安全機能である「ガラス固化体と地下水の接触防止」に影響を及ぼす。
		a-2-OP3: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、オーバーバックが高温にさらされ、オーバーバックが変質・融解する。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバック周囲の地下水組成や応力状態、温度条件に依存して、オーバーバックの腐食形態や腐食の進展に影響を与える。そして、オーバーバックの安全機能である「ガラス固化体と地下水の接触防止」に影響を及ぼす。
	緩衝材	a-2-B1: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械への崩落物の直撃などにより緩衝材に過剰な衝撃が加わり、緩衝材のひび割れ・剥離が起こる。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
		a-2-B2: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、処分孔周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、母岩と接する緩衝材が流出することで、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
		a-2-B3: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生し、コンクリート製の処分孔上部キャップに直撃すると、コンクリートの強度・耐久性の低下が起こる。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、緩衝材が流出することで、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
		a-2-B4: 力学プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生し、養生中のコンクリートに岩盤が直撃すると、力学プラグの強度・耐久性の低下が起こる。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、緩衝材が流出することで、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
		a-2-B5: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、緩衝材が高温にさらされ、熱応力により緩衝材に亀裂が発生する。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
		a-2-B6: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、緩衝材が高温にさらされ、緩衝材が変質する。その結果、緩衝材の鉱物組成や膨潤特性が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の収着現象および地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「収着による放射性核種の移行遅延」、「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。

表 4-1 地震発生を起因事象としたシナリオの検討結果 (4/6)

地震による 影響要因	構成要素	シナリオ
坑道における 山はねによる 岩盤の崩落 【a-2】	粘土プラグ	a-2-D1: 粘土プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械への崩落物の直撃などにより粘土プラグに過剰な衝撃が加わり、粘土プラグのひび割れ・剥離が起こる。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-D2: 粘土プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、母岩と接する粘土プラグが流出することで、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-D3: 粘土プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、粘土プラグが高温にさらされ、熱応力により粘土プラグに亀裂が発生する。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-D4: 粘土プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、粘土プラグが高温にさらされ、粘土プラグが変質する。その結果、粘土プラグの鉱物組成や膨潤特性が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
	埋め戻し材	a-2-B' 1: 埋め戻し材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、既に定置した埋め戻し材への崩落物の直撃などにより、埋め戻し材に過剰な衝撃が加わることで、埋め戻し材のひび割れ・剥離が起こる。その結果、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-B' 2: 埋め戻し材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、母岩と接する埋め戻し材が流出することで、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-B' 3: 力学プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生し、養生中のコンクリートに岩盤が直撃すると、力学プラグの強度・耐久性の低下が起こる。その結果、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、埋め戻し材が流出することで、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-B' 4: 埋め戻し材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、熱応力により埋め戻し材に亀裂が発生する。その結果、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-B' 5: 埋め戻し材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、埋め戻し材が高温にさらされ、埋め戻し材が変質する。その結果、埋め戻し材の鉱物組成や膨潤特性が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
	母岩	a-2-H1: 操業時に岩盤の崩落が発生すると、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-H2: 操業時に岩盤の崩落が発生すると、処分孔周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-H3: 操業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、母岩が高温にさらされ、熱応力により母岩に亀裂が発生する。その結果、母岩の間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-2-H4: 操業時に岩盤の崩落が発生すると、周辺にある機械に崩落物が直撃し、燃料漏れが発生し、火災が発生する。その結果、母岩が高温にさらされ、母岩が変質する。その結果、母岩の鉱物組成が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。

表 4-1 地震発生を起因事象としたシナリオの検討結果 (5/6)

地震による 影響要因	構成要素	シナリオ
坑道周辺岩盤 における亀裂 形成【a-3】	緩衝材	a-3-B1: 緩衝材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、処分孔周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、母岩と接する緩衝材が流出することで、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
	粘土プラグ	a-3-D1: 粘土プラグの運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、母岩と接する粘土プラグが流出することで、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
	埋め戻し材	a-3-B'1: 埋め戻し材の運搬・積み替え・定置作業時に岩盤の崩落が発生すると、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、母岩と接する埋め戻し材が流出することで、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
	母岩	a-3-H1: 操業時に岩盤の崩落が発生すると、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
		a-3-H2: 操業時に岩盤の崩落が発生すると、処分孔周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
坑道周辺岩盤 における水圧 変化【a-4】	緩衝材	a-4-B1: 地震動に伴い、処分坑道周辺岩盤の応力状態が一時的に変化し、周辺岩盤の水圧が上昇する。その結果、処分坑道内の湧水量が増加し、緩衝材の定置作業時に再冠水により緩衝材が空隙側へ膨潤することで、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
	粘土プラグ	a-4-D1: 地震動に伴い、処分坑道周辺岩盤の応力状態が一時的に変化し、周辺岩盤の水圧が上昇する。その結果、処分坑道内の湧水量が増加し、粘土プラグの定置作業時に再冠水により粘土プラグが空隙側へ膨潤することで、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
	埋め戻し材	a-4-B'1: 地震動に伴い、処分坑道周辺岩盤の応力状態が一時的に変化し、周辺岩盤の水圧が上昇する。その結果、処分坑道内の湧水量が増加し、埋め戻し材の定置作業時に再冠水により埋め戻し材が空隙側へ膨潤することで、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
地震動による ガラス固化体 の破損【b-1】	ガラス固化体	b-1-G1: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に地震動が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械からの廃棄体の落下などによりガラス固化体に過剰な衝撃が加わり、ガラス固化体のひび割れ・破壊が起こる。その後、処分場閉鎖後にオーバーバックが破損し、地下水と接触したときに、ガラス固化体の化学的変質・溶解へ影響を与える。そして、ガラス固化体の安全機能である「ガラスマトリックスによる浸出抑制」に影響を及ぼす。
地震動による オーバーバック の破損【b-2】	オーバーバック	b-2-OP1: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に地震動が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械からの廃棄体の落下などによりオーバーバックに過剰な衝撃が加わり、オーバーバック表面にキズが形成する。その後廃棄体を定置し、処分場閉鎖後にオーバーバック周囲の地下水組成や応力状態、温度条件に依存して、オーバーバックの腐食形態や腐食の進展に影響を与える。そして、オーバーバックの安全機能である「ガラス固化体と地下水の接触防止」に影響を及ぼす。
地震動による 緩衝材の破 損【b-3】	緩衝材	b-3-B1: 緩衝材の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に地震動が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械からの緩衝材ブロックの落下などにより緩衝材に過剰な衝撃が加わり、緩衝材のひび割れ・剥離が起こる。また、定置後に地震動が発生すると、定置した緩衝材に過剰な衝撃が加わり、緩衝材のひび割れ・剥離が起こる。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
地震動による 埋め戻し材の 破損【b-4】	粘土プラグ	b-4-D1: 廃棄体の地下施設への運搬・積み替え・定置作業時に地震動が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械からの粘土プラグの落下などにより粘土プラグに過剰な衝撃が加わり、粘土プラグのひび割れ・剥離が起こる。また、定置後に地震動が発生すると、定置した粘土プラグに過剰な衝撃が加わり、粘土プラグのひび割れ・剥離が起こる。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
地震動による 埋め戻し材の 破損【b-5】	埋め戻し材	b-5-B'1: 埋め戻し材定置作業時に地震動が発生すると、定置した埋め戻し材や転圧途中の埋め戻し材に過剰な衝撃が加わり、埋め戻し材のひび割れ・剥離が起こる。その結果、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。

表 4-1 地震発生を起因事象としたシナリオの検討結果 (6/6)

地震による影響要因	構成要素	シナリオ
地震動による力学プラグの破損【b-6】	緩衝材	a-6-B1: 力学プラグの運搬・積み替え・定置作業時に地震動が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械が養生中のコンクリートへ落下することなどにより力学プラグに過剰な衝撃が加わり、力学プラグが破損する。また、定置後に地震動が発生すると、定置した力学プラグに過剰な衝撃が加わり、力学プラグが破損する。それに伴って緩衝材が流出すると、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
	埋め戻し材	a-6-B'1: 力学プラグの運搬・積み替え・定置作業時に地震動が発生すると、運搬作業や定置作業に用いる機械が養生中のコンクリートへ落下することなどにより力学プラグに過剰な衝撃が加わり、力学プラグが破損する。また、定置後に地震動が発生すると、定置した力学プラグに過剰な衝撃が加わり、力学プラグが破損する。それに伴って埋め戻し材が流出すると、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
坑口における地盤の崩落、坑口の閉塞【c-1】	緩衝材	c-1-B1: 地下施設入口において地盤の崩落、閉塞が発生することで、排水管の破損や坑道内への電源供給の停止が発生する。それにより、坑道内が排水不良となることで、定置済みの緩衝材が冠水し、空隙側へ膨潤する。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
	粘土プラグ	c-1-D1: 地下施設入口において地盤の崩落、閉塞が発生することで、排水管の破損や坑道内への電源供給の停止が発生する。それにより、坑道内が排水不良となることで、定置済みの粘土プラグが冠水し、空隙側へ膨潤する。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
	埋め戻し材	c-1-B'1: 地下施設入口において地盤の崩落、閉塞が発生することで、排水管の破損や坑道内への電源供給の停止が発生する。それにより、坑道内が排水不良となることで、定置済みの埋め戻し材が冠水し、空隙側へ膨潤する。その結果、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
坑口における覆工コンクリートの破損【c-2】	緩衝材	c-2-B1: 地下施設入口において覆工コンクリートが破損することで、破損したコンクリートの落下などにより、排水管の破損や坑道内への電源供給の停止が発生する。それにより、坑道内が排水不良となることで、定置済みの緩衝材が冠水し、空隙側へ膨潤する。その結果、緩衝材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に緩衝材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、緩衝材の安全機能である「移流による移行の抑制」、「コロイド移行の防止」に影響を及ぼす。
	粘土プラグ	c-2-D1: 地下施設入口において覆工コンクリートが破損することで、破損したコンクリートの落下などにより、排水管の破損や坑道内への電源供給の停止が発生する。それにより、坑道内が排水不良となることで、定置済みの粘土プラグが冠水し、空隙側へ膨潤する。その結果、粘土プラグの密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に粘土プラグ領域の地下水流動へ影響を与える。そして、粘土プラグの安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
	埋め戻し材	c-2-B'1: 地下施設入口において覆工コンクリートが破損することで、破損したコンクリートの落下などにより、排水管の破損や坑道内への電源供給の停止が発生する。それにより、坑道内が排水不良となることで、定置済みの埋め戻し材が冠水し、空隙側へ膨潤する。その結果、埋め戻し材の密度、間隙率、間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に埋め戻し材領域の地下水流動へ影響を与える。そして、埋め戻し材の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。
坑道における地質不良区間での覆工コンクリートや路盤の破損【c-3】	母岩	c-3-H1: 操業時に坑道内の地質不良区間で覆工コンクリートや路盤の破損が発生すると、坑道周辺の掘削影響領域が拡大する。その結果、母岩の間隙率・間隙構造が変化し、処分場閉鎖後に母岩領域の地下水流動へ影響を与える。そして、母岩の安全機能である「卓越した移行経路形成抑制」に影響を及ぼす。

本研究の検討結果である、地震によるトンネルの被害事例の調査結果、地震による影響要因・逸脱事象の特定結果、および、それらにより起こる可能性のあるバリア特性や安全機能への影響の連鎖を、これまで JAEA-Data/Code 2014-026 および JAEA-Data/Code 2015-018⁽⁹⁾において整備してきた「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（図 4-1）。このデータベースはこれらの情報に加え、工学技術適用上の事故・人的要因を起因事象としたシナリオに関する情報やそれに対する工学的対策に関する情報から構成されている。

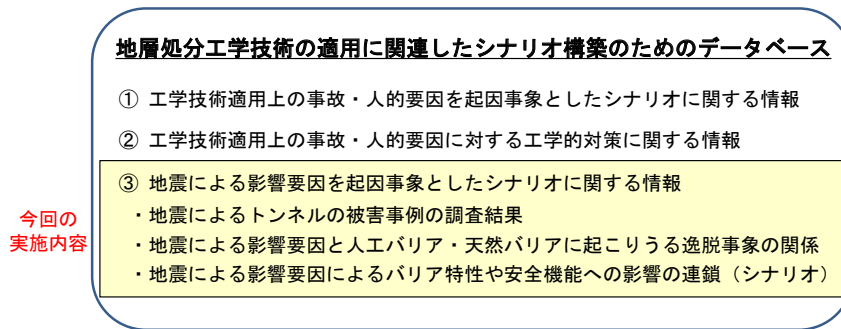


図 4-1 地層処分工学技術の適用に関連したシナリオ構築のためのデータベースの構成

本研究で特定した地震による影響要因の発生確率、および、地震による影響要因を起因事象としたバリア特性や安全機能への影響の程度は、サイトの地質条件、処分場の設計条件および工学的対策などによって異なる。そのため、処分サイトや地質条件、処分場の設計条件が未定である現状では、工学技術の信頼性を踏まえた上で、網羅性・現実性のあるシナリオを作成することは困難である。そこで、本研究では地震によるトンネルの被害事例の調査、既往の人工バリアの変遷に関するシーケンスの情報および地震による影響に関する FEP の情報をもとに、発生の可能性を必ずしも否定できないシナリオを整理した。今後、地層処分の工学技術適用時の事故及び人的要因に対する工学的対策⁽⁹⁾や NUMO によって検討される地震動に対する影響要因の発生防止対策を参考に、地震による影響要因に対する工学的対策を整理した上で、現実的で規制側として着目すべきシナリオを選定する必要がある。さらにそれらのシナリオに対して、今後、安全機能の喪失・低下が処分場閉鎖後の長期的な放射性核種の移行に与える影響を評価するための手法を整備する必要がある（図 4-2）。また、本評価で対象としなかった津波や洪水による影響についても、今後同様に検討を進める必要がある。

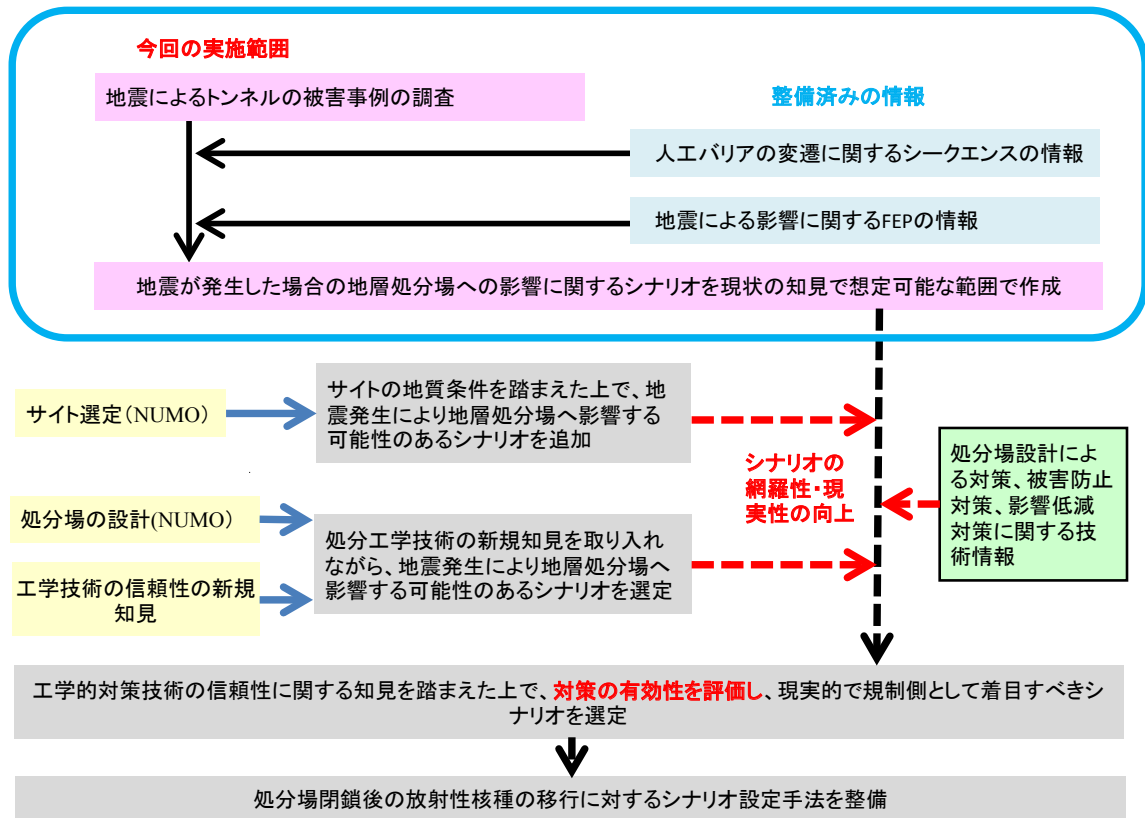


図 4-2 地震による影響要因を起因事象としたシナリオ設定手法整備に関する今後の展望

謝 辞

本報作成にあたって、原子力機構の田中忠夫氏、木村英雄氏には御指導・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) OECD/NEA, Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories: An International Database of Features, Events and Processes, 1999.
- (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) 原子力規制委員会, 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の制定について(平成 25 年 11 月 27 日制定), 原管廃発第 1311277 号, 2013.
- (4) 朝倉俊弘, 志波由紀夫, 松岡茂, 大矢敏雄, 野城一栄, 山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.27-38, 2000.
- (5) 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)－確かな技術による完全な地層処分の実現のために－, NUMO-TR-11-01, 2011.
- (6) 産業技術総合研究所 深部地質環境研究コア, 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料－立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性－, 地質調査総合センター研究資料集, no.560, 2012.
- (7) 酒井隆太郎, 武田聖司, 木村英雄, 松葉久, 地質・気候関連事象に関する FEP データベースの整備－隆起・沈降・地震活動・気候変動－(受託研究), JAEA-Data/Code 2011-005, 2011, 107p.
- (8) 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.
- (9) 高井静霞, 高山秀樹, 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－事故及び人的要因に対する工学的対策の整理－(受託研究), JAEA-Data/Code 2015-018, 2015, 96p.
- (10) 野城一栄, 小島芳之, 朝倉俊弘, 深沢成年, 山岳トンネルの地震被害発生メカニズムと耐震性能の評価, 鉄道総研報告, vol. 23, no. 12, pp.17-22, 2009.

付録

地震によるトンネルへの影響事例調査結果

Table I-1. 地震によるトンネルへの影響事例調査結果

地震名	発生日	大きさ	震源	地下施設	被害
関東大地震 ^{1,2)}	1923 年 9 月 1 日	M7.9	北緯 35°19.6' 東経 139°08.3'	国有鉄道の 93 トンネル	・震央から 120km 圏内に国有鉄道のトンネルだけで建設中のものも含めて 149 トンネルがあったが、そのうち 93 トンネルが補修を要する被害を受けた。 ・被害の形態は落盤、坑門の崩壊、地表の地すべりや斜面崩壊に伴う坑口部の崩落、覆工のひび割れ、覆工の崩落、横断面の変形
				箱根 3 号トンネル (鉄道)	・地表の斜面崩壊に伴う坑口部 (崩落部の延長 3.6m) の崩落
				箱根 4 号トンネル (鉄道)	・斜面崩壊に伴う坑口部の崩落
				寒ノ目山トンネル (鉄道)	・斜面崩壊に伴う坑口部の崩落
				与瀬トンネル (鉄道)	・トンネル中央部の落盤 (崩落部の延長 60m、崩落箇所は建設時に大雨による崩落事故があった場所、地質は未固結の土砂)
				土気トンネル (鉄道)	・トンネル中央部の落盤 (崩落部の延長 5m、土被りは小さい)
				南無谷トンネル (鉄道)	・トンネル中央部の落盤 (崩落部の延長 22m、地質は泥岩が主体) ・地すべりに伴った土被りが薄いトンネル中央部の落盤 (崩落部の延長 44m、建設時に大雨による崩落事故があった箇所、地質は泥岩が主体)
北但後地震 ^{1,2)}	1927 年 3 月 7 日	M7.3	北緯 35°37.7' 東経 134°56.0'	宮津線 (鉄道) の 2 トンネル	・軽微な被害
北伊豆地震 ^{1,2)}	1930 年 11 月 26 日	M7.3	北緯 35°02.4' 東経 138°58.9'	丹那トンネル (鉄道)	・トンネル中央部での崩落 (崩落部の延長 55m、崩落箇所は丹那盆地の直下、地質は火山砕屑岩で厚さ 3cm の粘土を挟む亀裂が存在していた箇所、土被り 160m)。 ・覆工のひび割れ。 ・断層によるズレ (ズレの長さ 2.4m、断層は鏡肌を示し、幅 5 mm～15 cm の黒色粘土を挟む、土被り 160m)
福井地震 ^{1,2)}	1948 年 6 月 28 日	M7.1	北緯 36°10.0' 東経 136°17.8'	北陸線 (鉄道)、三国線 (鉄道)	・地表の斜面崩壊に伴う坑門の崩壊、
十勝沖地震 ^{1,2)}	1952 年 3 月 4 日	M8.2	北緯 41°48' 東経 144°08'	根室線、網走線、広尾線、根津線、函館線の 10 トンネル	・軽微な被害
北美濃地震 ^{1,2)}	1961 年 8 月 19 日	M7.0	北緯 36°06.5' 東経 136°42.2'	水力発電所導水路トンネル	・大きな被害
新潟地震 ^{1,2)}	1964 年 6 月 16 日	M7.5	北緯 38°22.0' 東経 139°12.9'	信越線、羽越線、米坂線の約 20 トンネル、道路トンネル 1 本	・約 20 本の鉄道トンネルに被害がでた。坑門の変形が確認された箇所もあるが、多くは軽微な被害
				寺坂トンネル (鉄道)	・坑口部から 75m にわたり天端に覆工のひび割れ (トンネル軸方向) トンネルは地すべり頻発地帯に位置しており、建設時には偏圧による被害が確認された。
				鼠ヶ関トンネル (鉄道)	・坑口部から 50m にわたり天端に覆工のひび割れ (トンネル軸方向)、側壁のはらみだし、トンネルは地すべり頻発地帯に位置しており、建設時には偏圧による被害が確認された。
				国道 7 号線葡萄トンネル (道路)	・坑口から 80m の地点から約 25m 区間で、トンネル中心線のズレが生じ、鋼製支保工が被害。建設中での被害。地質は弾性波速度が 3km/s 程度の流紋岩であるが、被害箇所には黒色のガラス質粘土層 (パーライト)

地震名	発生日	大きさ	震源	地下施設	被害
					が確認されている。
十勝沖地震 ^{1,2)}	1968 年 5 月 16 日	M7.9	北緯 40°44' 東経 143°35'	北海道内の広 範囲わたる 23 本の鉄道 トンネル	・軽微な被害
伊豆大島 近海地震 ^{1,2)}	1978 年 1 月 14 日	M7.0	北緯 34°46' 東経 139°15'	稲取トンネル (鉄道)	・断層によるズレ（水平方向に約 70cm、鉛直方向に 約 20cm の変位が確認、土盛り約 90m、地質は脆弱な 泥流堆積物や火山灰からなる。断層破砕帯は幅 11m 以 上で、数mmの安山岩角礫と断層粘土からなり、指圧で つぶせる程度に軟質である） ・トンネル断面の変形（断層によるズレが発生した近 傍の変形が特に著しい、側壁が内空に押し出し、アー チが天端に突き上げられる方向に変形、土盛りは最大 で 105m 程度） ・覆工コンクリートの変状（天端の圧挫と剥落、SL 部付近の引っ張り亀裂と内空への押し出し、インバー ト打ち継ぎ目での圧挫） ・坑門の面壁の打ち継ぎ目より破断
				大川トンネル (鉄道)	・土盛り約 50m の箇所、約 60m 区間にわたり、側 壁が内空側に変位し、アーチ部が圧挫乖離現象を生じ る（被害箇所の地質は断層破砕帯であり、角礫状の安 山岩と断層粘土からなる性状である）
				熱川トンネル (鉄道)	・土盛りが約 90m の箇所、約 400m 区間にわたり、 側壁が内空側に押し出された（最大 7.5cm）。 ・天端に圧挫によるクラック剥離を生じている（被害 箇所の地質は熱水により変質した安山岩からなる）
				黒根トンネル (鉄道)	・軽微な被害。約 30m にわたる覆工のひび割れおよ び剥離。
				今井浜トンネ ル（鉄道）	・坑門面壁の打ち継ぎ目から面壁の一部が欠落
				城山トンネル (鉄道)	・地表からの 800t の大石の落石により、トンネル坑門 面壁、トンネル躯体の一部が破壊。
				黒根トンネル (道路)	・道路舗装および土留め壁に亀裂、地盤の沈下、斜面 の滑落に伴う坑門の崩落、覆工のひび割れ、打ち継ぎ 目の開口
				トモロトンネ ル（道路）	・覆工コンクリートのひび割れ・剥離（特に、坑口付 近 60m 間において著しかった。地表部の土塊の移動 に関係しているものと思われる）。 ・打ち継ぎ目の開口・圧挫、側壁の押し出し、アーチ 部覆工コンクリートの一部脱落、
				白田トンネル (道路)	・斜面崩壊に伴った坑門の崩落、覆工コンクリートの ひび割れ、覆工コンクリート打ち継ぎ目の開口、土盛 りが薄い側の側壁が沈下（最大落差 2cm）、無巻き区 間での落石
				城東トンネル (道路)	・斜面崩壊による坑口付近の落盤、坑門上部の吹き付 けコンクリートに多数の亀裂、坑口から 30m の地点 より約 13m 間での落盤（落盤の高さ最大 3m）、アー チ天端の圧挫、側壁コンクリートの押し出し、側壁コ ンクリートの脱落
				河津トンネル (道路)	・坑口付近山側の側壁コンクリートとアーチコンクリ ートの継目が多少動いた形跡がある。
				黒根トンネル (道路)	・坑門の崩落
宮城県沖 地震 ^{1,2)}	1978 年 6 月 12 日	M7.4	北緯 38°09' 東経 142°10'	宮城県を中心 とした鉄道ト ンネル 6 本	・軽微な被害
浦河沖地 震 ^{1,2)}	1982 年 3 月 21 日	M7.1	北緯 42°04' 東経 142°36'	日高線の 6 ト ンネル(鉄道)	・軽微な被害
日本海中部地震 ^{1,2)}	1983 年 5 月 26 日	M7.7	北緯 40°21.4' 東経 139°04.6'	秋田県を中心 とした鉄道ト ンネル 8 本	・軽微な被害

地震名	発生日	大きさ	震源	地下施設	被害
長野県西部地震 ¹⁾	1984 年 9 月 14 日	M6.8	北緯 35°49.3' 東経 137°33.6'	発電所導水路 トンネル	・震央域の導水路トンネルに地震断層横断によると思われる被害
能登半島沖地震 ⁵⁾	1993 年 2 月 7 日	M6.9	北緯 37°39.4' 東経 137°17.8'	木の浦トンネル (道路)	・坑口から 21m 付近 (土被り約 15m) よりトンネルアーチ部で落盤 (延長 4.5m、幅 4.5m、高さ約 7m) が生じトンネル閉塞。(被害箇所地質は軟質な泥岩や細流凝灰岩で割れ目が発達しており、一部では風化が進行し粘土化していた) ・覆工コンクリートのひび割れ、覆工コンクリートの剥離
北海道南西部地震 ⁴⁾	1993 年 7 月 12 日	M7.8	北緯 42°46.8' 東経 139°11.0'	第 2 白糸トンネル (道路)	岩石斜面の崩壊による岩石の直撃により坑門が破壊。崩積土がトンネル内に流入し交通不能となった。
兵庫県南部地震 ^{1,3,6,7)}	1995 年 1 月 17 日	M7.3	北緯 34°35.7' 東経 135°02.2'	六甲トンネル (鉄道)	・アーチクラウン部の覆工コンクリートのせん断ひび割れとその先端部の剥落。 ・アーチ・側壁の打ち継ぎ目部での圧縮性のひび割れに伴う剥落。 ・トンネル横断方向のリング状の打ち継ぎ目部の剥落。 被害箇所の地質は花崗岩からなる。これらの被害箇所は施工時に遭遇した被圧水あるいは、断層粘土を伴う断層破碎帯の位置に一致している。被害箇所の土被りは、100m～最大 460m 程度である。
				盤滝トンネル (道路)	・アーチから側壁にかけて 3m の幅で覆工コンクリートが破壊し、落下 (地質は花崗岩、断層粘土部)。 ・側壁部覆工が圧壊し鉄筋が座屈、さらに舗装盤が持ち上がった (地質は花崗岩、断層粘土部)。土被りは 20～250m
				東山トンネル (鉄道)	・坑口部壁面の既往クラックの開口。 ・アーチ肩部に微細な剥離を伴うトンネル軸方向のクラックが発生。 ・土被りは上部地山を切り込んでいるため 4～8m となっている。地質は泥岩。
				塩屋谷川放水路トンネル (放水路)	・塩屋谷川放水路トンネルは下流方坑口付近で須磨断層と近接し、中間部で横尾山断層と交差している。 ・須磨断層付近ではリンク状のひび割れが生じた。 ・横尾山断層との交差位置では、トンネルの北西側の覆工が相対的に右に 8cm、上に 5cm ズレ、アーチ、側壁、インバートにひび割れが 10.5m 間に生じた。吹き付けコンクリートにも覆工コンクリートと同様の破損が生じていた。断層を境に花崗岩と砂岩泥岩互層が接している。土被り 4～80m。
				舞子トンネル (道路)	・天端の沈下、吹き付けコンクリートの剥落、仮インバートにクラック、切羽吹き付け一部剥離。被害箇所は土被りが浅く、未固結の礫相が分布している。
				神戸トンネル (鉄道)	・アーチ肩部のクラック。湧水量増加。打ち継ぎ目の軽微な剥落。地質は花崗閃緑岩や神戸層群。土被り 272m。
				長坂トンネル (鉄道)	・打ち継ぎ目の軽微な剥落。大阪層群の砂岩、泥岩、礫岩。土被り 20m。
				会下山トンネル (鉄道)	・坑口上部道路面にクラック。大阪層群の砂岩、泥岩、礫岩。土被り 2～13m。
				有馬トンネル (鉄道)	・既往クラック (引張クラック) の伸び。流紋岩。土被り 6～43.5m。
				五社トンネル (鉄道)	・覆工コンクリートのひび割れ。土被り 40m。
				北神トンネル (鉄道)	・覆工コンクリートが圧縮破壊により剥離。クラック幅増大。花崗岩。土被り 350m。
				布引トンネル (道路)	・SL 付近の覆工コンクリートの剥離、輪切り状ひび割れ。破碎花崗岩。土被り 260m。
				第 2 布引トンネル (道路)	・一部の両側監督路が沈下。花崗岩。土被り 240m。
				鴨越第 2 トンネル (道路)	・目地の浮き、剥離。花崗岩。土被り 40m。
				新神戸トンネル (道路)	・目地の浮き、剥離。花崗岩。土被り 330m。
				第 2 新神戸トンネル (道路)	・目地の浮き、剥離、リング状のひび割れ。花崗岩。土被り 330m。

地震名	発生日	大きさ	震源	地下施設	被害
				唐櫃トンネル (道路)	・目地の浮き、剥離、ひび割れ。流紋岩、凝灰岩。土被り 145m。
				六甲山トンネル (道路)	・目地の浮き、剥離、リング状のひび割れ。花崗岩。土被り 280m。
				ひよどりトンネル (道路)	・目地の浮き、剥離。花崗岩。土被り 67m。
				宝塚東トンネル (道路)	・打ち継ぎ目に剥落。チャート。土被り 60m。
				宝塚西トンネル (道路)	・打ち継ぎ目に段差、剥落。花崗岩。土被り 42m。
				高倉山第二トンネル (道路)	・打ち継ぎ目に剥落、肩部にひび割れ。花崗岩。土被り 86m。
				高倉山トンネル (道路)	・剥落、ひび割れ。花崗岩。土被り 87m。
				月見山トンネル (道路)	・左右肩部に軸方向ひび割れ。土被り 34m、43m。
				会下山トンネル (河川)	・レンガの剥離、剥落、亀裂、坑口崩壊。花崗岩。土被り 37m。
				本山横坑 (共同坑)	・天端、側壁、肩部の損傷。花崗岩。土被り 96m。
				千苅導水路 (水道)	・剥落、亀裂、天端圧迫。花崗岩、神戸層群、埋め戻し土。土被り 2～25m。
				越木岩送水トンネル (水道)	・FEP 管の変形 (円形かた卵形への変形)、約 6m 間の覆工コンクリートの崩壊。 ・被害箇所土被りは約 55m。地質は大阪層群の固結火山灰、固結粘土層、砂質土層からなり、断層粘土を伴う破碎帯が被災箇所付近に存在していた。
				大開駅、高速長田駅、新長田駅、上沢駅、三宮駅	・RC ボックス型断面の中間柱の破壊。鋼管柱より鉄筋コンクリートの柱に被害が集中。開削工法により施工された地下鉄の駅。土被りは 5m 程度以下。被害が発生した地下鉄の駅の地質は沖積粘土層と洪積層にまたがって位置している。
新潟県中越地震 ^{8,9)}	2004 年 10 月 23 日	M6.8	北緯 37°17'30" 東経 138°52'0"	浦佐トンネル (鉄道)	・中央通路側壁ひび割れ。地質は砂礫、凝灰角礫岩、礫岩。土被り 15m。
				堀之内トンネル (鉄道)	・打ち継ぎ目部の剥落、ひび割れ、側壁食い違い。地質は礫岩、砂岩。土被り 100m。
				魚沼トンネル (鉄道)	・覆工コンクリートアーチ部の崩落 (延長 5m) (地山の崩落は生じなかった) ・打ち継ぎ目部の剥落、ひび割れ、 ・インバートコンクリートのひび割れ、 ・側壁の押し出し、 ・軌道隆起 (約 250mm) ・被害箇所はシルト岩層、泥岩・砂岩互層。矢板工法。土被り 70m。
				妙見トンネル (鉄道)	・アーチクラウン部の圧迫 (延長約 50m)、打ち継ぎ目の剥落、ひび割れ ・軌道隆起 ・土被り 65m。地質はシルト岩。
				滝谷トンネル (鉄道)	・アーチクラウン部の圧迫、打ち継ぎ目の剥落、ひび割れ ・土被り 55m。地質はシルト岩、砂岩、礫岩。
				福山トンネル (鉄道)	・ひび割れ、剥落。 ・土被り 75m。地質は軟岩。
				新福山トンネル (鉄道)	・アーチクラウン部の圧迫およびせん断ズレ、ひび割れ ・土被り 7m。地質は軟岩。
				和南津トンネル (鉄道)	・アーチクラウン部の圧迫 (延長約 40m)、土被り 29m。砂岩。 ・アーチ部の崩落、打ち継ぎ目部の剥落、ひび割れ。土被り 41m。砂岩。 ・トンネル坑口部のズレ (約 40cm)
				中山トンネル (鉄道)	・打継目部の剥落、アーチ肩部のひび割れ。 ・土被り 71m、92m。地質は頁岩、砂岩。
				牛ヶ島トンネル (鉄道)	・打継目部の剥落、トンネル坑口部のズレおよび面壁の亀裂。 ・土被り 14m。砂岩、頁岩。
				天王トンネル (鉄道)	・トンネル上部斜面崩壊に伴う側壁の亀裂、打継目部の開口 (5～6cm)、ひび割れ、トンネル坑口部面壁のひび割れ。 ・地質は砂岩、頁岩。土被りは 4m、11m。

地震名	発生日	大きさ	震源	地下施設	被害
				新複峠トンネル (鉄道)	・アーチクラウン部の圧さ、ひび割れ、側壁部の押し出し。 ・地質は頁岩、砂岩。土被り 75m
				複峠トンネル (鉄道)	・斜面崩壊に伴うトンネル坑口部の損傷、ひび割れ、剥離 ・地質は頁岩、砂岩。土被り 70m
				鼻田トンネル (鉄道)	・剥離。 ・地質は頁岩、砂岩。土被り 23m
				塚山トンネル (鉄道)	・アーチクラウン部の圧さ、打継目部の剥落、ひび割れ ・地質は頁岩、砂岩。土被り 150m
				東山トンネル (鉄道)	・打継目部の剥離、ひび割れ ・地質は泥岩、細砂。土被り 22m
				岩山トンネル (鉄道)	・剥離 ・地質は砂岩、土被り 50m、54m
				岩沢トンネル (鉄道)	・アーチ肩部の軽微な圧さ、補修用吹き付けコンクリートの剥落 ・土被り 29m、38m。シルト岩。
				新妙高トンネル (鉄道)	・アーチクラウン部の軽微な圧さ、剥落。 ・土被り 151m。
				高揚山トンネル (鉄道)	・アーチクラウン部の圧さ、ひび割れ、打継目部の剥離、トンネル坑口部のズレ。 ・土被り 36m、67m。軟岩。
				内ヶ巻トンネル (鉄道)	・アーチ肩部の軽微な圧さ、ひび割れ。 ・土被り 18m、30m。泥岩。
				和南津トンネル (道路)	・最大土被り 40m 程度のトンネル。覆工コンクリート (天端部分) の一部崩落、覆工コンクリートの剥落・ひび割れ、覆工コンクリート (側壁部) のはらみだし、側溝の変状。 ・矢板工法。砂岩。
				小千谷第2トンネル (道路)	・覆工コンクリート (側壁～アーチ下部) に横断方向のひび割れ、横断目地付近で覆工コンクリート片剥離。 ・トンネルの最大土被りは 62m。砂岩。矢板工法。
				山中トンネル (道路)	・アーチ部に横断方向ひび割れ。 ・土被り 100m。砂岩、泥岩。矢板工法。
				竹沢トンネル (道路)	・側壁・アーチ部に貫通ひび割れ、路盤にひび割れ。 ・土被り 6m。矢板工法。
				中山トンネル (道路)	・横断目地部付近でコンクリート剥離。 ・土被り 100m。砂岩、泥岩。NATM。
				東山トンネル (道路)	・アーチ部施工目地に開き。 ・土被り 25m。矢板工法。
				小平尾トンネル (道路)	・全周に輪切りひび割れ、目地に圧縮剥離、路肩側溝と車道に開口 ・土被り 45m。NATM。
				折中トンネル (道路)	・側壁、アーチ部にひび割れ。 ・土被り 50m。NATM。
				城山トンネル (道路)	・側壁の縦断方向にひび割れ。 ・NATM。
				渋海トンネル (道路)	・アーチ肩部の目地にコンクリート剥離。 ・NATM。
				羽黒トンネル (道路)	・アーチ天端に圧さ、歩道路盤の浮き上がり、アーチ部・側壁部に貫通したひび割れ ・土被り 50m。矢板工法。
				羽黒トンネル (歩道)	・素掘りの区間の吹き付けコンクリート剥落 ・土被り 50m。NATM。
				十二平トンネル (道路)	・アーチ肩部の圧さ、盤膨れ。 ・土被り 35m。矢板工法。
				蘭木トンネル (道路)	・アーチ肩部に縦断方向ひび割れ、歩道の隆起 ・土被り 100m。矢板工法。
				塩谷トンネル (道路)	・アーチ天端に縦断方向ひび割れ、アーチ部全周に輪切りひび割れ ・土被り 50m。矢板工法。
				木沢トンネル (道路)	・側壁に押しだし変形、側壁・アーチ肩部に圧さ、トンネル軸方向に伸び、覆工・路盤の目地に開き (最大 150mm) ・土被り 25m。NATM。
				荒谷トンネル (道路)	・側壁・アーチ肩部に水平に圧さ、アーチ部に斜めにひび割れ、側壁に押し出しによるせん断ひび割れ、歩道路盤の浮き上がり、車道路盤の開き・段差 ・土被り最大 45m、被害箇所土被り 20m。矢板工法。

地震名	発生日	大きさ	震源	地下施設	被害
				山本山トンネル (道路)	・ひび割れ ・土被り 50m。泥岩、砂岩、礫岩。矢板工法
				沖見峠トンネル (道路)	・側壁部に横断方向ひび割れ ・NATM
				武石トンネル (道路)	・側壁に縦亀裂 ・土被り 100m。砂岩、礫岩。矢板工法
				枳尾トンネル (道路)	・継ぎ目から漏水 ・新第三紀西山層。NATM。
新潟県中越沖地震 ^{10,11,12)}	2007 年 7 月 16 日	M6.8	北緯 37°38'24" 東経 138°30'30"	第一米山トンネル (鉄道)	・天端部の圧さ、 ・土被り約 31m。軟質砂岩。被害区間のトンネル上部では大規模な地すべりが発生。導坑先進上部判断面工法。 ・アーチ肩部せん断ひび割れ、側壁コンクリート損傷、アーチ肩部圧さ ・土被り約 58m。軟質砂岩と破碎状安山岩の境界部。導坑先進上部判断面工法。
				第二米山トンネル (鉄道)	・アーチ肩部軸方向ひび割れ、 ・土被り約 55m。砂混じり泥岩と礫岩の地層境界付近。導坑先進上部判断面工法。 ・側壁コンクリート上部剥落 ・土被り約 30m。泥岩。
				第三笠島トンネル (鉄道)	・坑門コンクリート既補修箇所目開き、食い違い、側壁折れ込み、コンクリートの浮きおよびひび割れ ・地質は集塊岩。
				米山トンネル (道路)	・天端部覆工コンクリートの剥落 (横断方向に 1m 大、最大厚さ 15~20cm 程度)、 ・覆工コンクリートの表面剥落、 ・円形水路開口部の閉じ ・被害位置は土被り約 190m。泥岩。 ・損傷箇所は地震前から路盤の隆起減少が確認されていた。
東北地方太平洋沖地震 ¹²⁾	2011 年 3 月 11 日	M9.0	北緯 38°6'12" 東経 142°51'36"	福島トンネル (鉄道)	・中央通路部の損傷 (側壁傾斜、底版損傷、中央通路と路盤コンクリートの間に 120mm の開口)、路盤部隆起に伴う軌道変状 ・被害箇所は褶曲構造を示す泥岩、凝灰岩。掘削工法は上部半断面先進レール工法、底設導坑先進上部半断面工法。 ・地震動により地盤が動く中で、被害を生じなかった区間と比較し弱い層にひずみがたまり、トンネル構造上の弱部となっている路盤部に被害が生じた。
				志賀トンネル (鉄道)	・路盤部隆起に伴う軌道変状 ・泥岩、凝灰角礫岩など。被害箇所は複雑な地質構造であり、膨張性粘土鉱物を含む軟弱そうであり、湧水の多い箇所であった。掘削工法は 2 段サイロットやスプリングサイロットなどの特殊工法を用いたが、工事が非常に難航した箇所である。

参考文献

- (1) 朝倉俊弘, 志波由紀夫, 松岡茂, 大矢敏雄, 野城一栄, 山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.27-38, 2000.
- (2) 吉川恵也, 鉄道トンネルの震災と地震対策, トンネルと地下, vol. 15, no. 8, pp.621-630, 1984.
- (3) 国田雅人, 竹俣隆一, 役田徹, 能登半島沖地震による被災トンネルを復旧一大谷狼煙飯田線 木の浦トンネル, トンネルと地下, vol. 24, no. 11, pp.847-853, 1993.
- (4) 西川純一, 高橋光昭, 山下彰司, 1993 年北海道南西沖地震における道路・鉄道・河川定道の被害, 土と基礎, vol. 41, no. 11, pp.11-16, 1993.
- (5) 小山幸則, 朝倉俊弘, 佐藤豊, 兵庫県南部地震による山岳トンネルの被害と復旧, トンネルと地下, vol. 27, no. 3, pp.235-245, 1996.

- (6) 中田欽也, 斉藤伸治, 小川幸樹, 森哲夫, 兵庫県南部地震による被災送水トンネルの復旧, トンネルと地下, vol. 28, no. 11, pp.935-943, 1997.
- (7) 廣戸敏夫, 飯田廣臣, 中村晋, 小向将介, 神戸高速鉄道・大開駅の地震被害, 土と基礎, vol. 44, no. 3, pp.40-42, 1996.
- (8) 清水満, 栗栖基彰, 加藤正二, 新潟県中越地震における鉄道トンネルの被害, トンネルと地下, vol.36, no. 5, pp.421-428, 2005.
- (9) 真下英人, 新潟県中越地震における道路トンネルの被害, トンネルと地下, vol.36, no. 11, pp.951-959, 2005.
- (10) 齋藤貴, 向山路一, 田口芳範, 新潟県中越沖地震における鉄道トンネルの被害, トンネルと地下, vol.38, no. 12, pp.891-900, 2007.
- (11) 中野清人, 小川清, 中越沖地震による高速道路トンネルの被災事例分析, トンネルと地下, vol. 43, no. 4, pp.289-294, 2012.
- (12) 清水満, JR 東日本におけるトンネル地震被害の事例, トンネルと地下, vol. 43, no. 4, pp.277-288, 2012.

This is a blank page.

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	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	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 ^(c)	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	ジーメンズ	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
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(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
粘着力のモーメント	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	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 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	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm 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=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4 π) 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=1 cGy=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=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

