

# 高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性 セメントの適用性に関する研究 (その1)

—セメント系材料の適用部位と要求機能—  
(共同研究)

Application Study on Low Alkaline Cementitious Materials for Deep Geological  
Repository of High Level Radioactive Wastes (Phase I)  
- Requirements for Use of Cementitious Materials in Deep Geological  
Repository System -  
(Joint Research)

小林 保之 山田 勉 内藤 守正 油井 三和  
中山 雅 佐藤 治夫 西田 孝弘\* 廣永 道彦\*  
山本 武志\* 杉山 大輔\* 西内 達雄\*

Yasushi KOBAYASHI, Tsutomu YAMADA, Morimasa NAITO, Mikazu YUI  
Masashi NAKAYAMA, Haruo SATO, Takahiro NISHIDA\*, Michihiko HIRONAGA\*  
Takeshi YAMAMOTO\*, Daisuke SUGIYAMA\* and Tatsuo NISHIUCHI\*

地層処分研究開発部門  
ニアフィールド研究グループ  
Near-Field Research Group  
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2009

本レポートは独立行政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。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2009

高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性セメントの適用性に関する研究（その1）  
—セメント系材料の適用部位と要求機能—  
（共同研究）

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

小林 保之, 山田 勉\*, 内藤 守正, 油井 三和, 中山 雅+, 佐藤 治夫+  
西田 孝弘\*1, 廣永 道彦\*1, 山本 武志\*1, 杉山 大輔\*1, 西内 達雄\*1

（2008年12月18日 受理）

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設は地下300m以深の地下深部に建設され、坑道の空洞安定性、湧水の抑制、あるいは操業における作業性の確保の観点から、支保工、グラウト、覆工等にセメント系材料の使用が想定されている。セメント系材料が、地下水と接触することで地下水のpHが12~13程度に上昇することが考えられ、結果的に人工バリアであるオーバーパック材の腐食形態への影響やベントナイトの変質に加え、天然バリアである岩盤の変質等を生じさせ、処分システムの長期性能に不確実性を与える可能性がある。

このような背景から、低アルカリ性セメントに関する研究開発が、国内外で進められており、日本原子力研究開発機構においてもこれまでに支保工や覆工への適用性検討を重ね、幌延地下研究施設において原位置施工試験を行う計画である。一方、(財)電力中央研究所においては、高レベル放射性廃棄物を含む放射性廃棄物処分全般に係るセメント系材料の研究開発を実施してきている。

このように、原子力機構ならびに電力中央研究所にて蓄積したセメント系材料に関する技術やノウハウを統合し、これらを原位置施工試験へ適用するとともに、低アルカリ性セメントの高度化に向けて検討事項を抽出することを目的に二機関での共同研究を実施している。

本報告は、共同研究の成果のひとつとして、高レベル放射性廃棄物処分施設において使用することが想定されるセメント系材料について、その適用性を評価する上で必要となる処分場とその周辺の地球化学的環境条件について整理したうえで、セメント系材料が適用可能となる部位と処分計画の各段階で要求される機能や性能を抽出・整理し、今後の低アルカリ性セメント開発に資するようとりまとめを行った。

---

本報告書は、日本原子力研究開発機構と(財)電力中央研究所との共同研究により実施した研究成果に関するものである。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※ 技術開発協力員（現、特定課題推進員）

+ 幌延深地層研究ユニット

\*1 (財)電力中央研究所

Application Study on Low Alkaline Cementitious Materials for Deep Geological Repository of  
High Level Radioactive Wastes (Phase I)  
- Requirements for Use of Cementitious Materials in Deep Geological Repository System -  
(Joint Research)

Yasushi KOBAYASHI, Tsutomu YAMADA\*, Morimasa NAITO, Mikazu YUI,  
Masashi NAKAYAMA+, Haruo SATO+,  
Takahiro NISHIDA\*1, Michihiko HIRONAGA\*1, Takeshi YAMAMOTO\*1,  
Daisuke SUGIYAMA\*1 and Tatsuo NISHIUCHI\*1

Geological Isolation Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 18, 2008)

Deep geological repository of high level radioactive wastes (HLW) will be constructed at the depth of more than 300m below the surface. Use of cementitious material for rock support, tunnel lining, and grouting is essential for the repository system and possibly causes increase of surrounding groundwater pH due to cement hydrates leaching from the materials. Since this hyperalkaline condition may lead to degradation of engineered barrier materials such as a metal overpack and also the surrounding host rock as natural barrier, there is concern that it gives significant impact on long-term safety performance of the repository system.

Because of these backgrounds, developments of low alkaline cementitious materials have been conducted both at home and abroad. Through studies on application of the low alkaline cementitious materials into rock support and tunnel lining so far, JAEA is now planning to conduct an in-situ test for shotcreting at the tunnel of the Horonobe Underground Research Laboratory. On the other hand, CRIEPI has studied and developed cementitious materials for disposal of radioactive wastes including HLW.

The JAEA-CRIEPI joint research project on low alkaline cementitious materials for deep geological repository is aiming to identify key issues for further improvement of performance and technologies of the low alkaline cementitious materials by integrating experience and expertise in this area, which are accumulated in both organizations.

This report summarizes requirements and their expected performance for use of cementitious materials in repository system taking account of surrounding conditions in each stage of repository program in order to reflect them to further development of the low alkaline cementitious materials.

Keywords: Low Alkaline Cement, High Level Radioactive Waste, Deep Geological Repository

This work has been performed in JAEA as a joint research with Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI).

※ Cooperative Staff

+ Horonobe Underground Research Unit

\*1 CRIEPI

## 目 次

1.はじめに.....	1
2. 共同研究の概要.....	1
2.1 検討項目.....	1
2.2 役割分担.....	4
3. 本報告の目的および範囲.....	5
4. HLW 処分におけるセメント系材料を使用する場合の留意点の抽出.....	5
4.1 検討の背景と必要性.....	5
4.2 LLW の余裕深度処分におけるセメント系材料の検討状況の整理.....	7
4.2.1 LLW の余裕深度処分施設におけるセメント系材料の要求機能.....	7
4.2.2 LLW の余裕深度処分施設におけるセメント系材料の長期耐久性評価の考え方.....	9
4.3 TRU 廃棄物の地層処分におけるセメント系材料の取扱い.....	11
4.3.1 TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの構成.....	11
4.3.2 TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの設計要件の整理.....	13
4.4 LLW およびTRU の廃棄物処分における検討状況等を踏まえた HLW 処分におけるセメント系材料を使用する場合の留意点の抽出.....	14
4.4.1 HLW 処分施設の概要.....	14
4.4.2 HLW 処分施設に使用されるセメント系材料に対する要求機能および留意点.....	16
5. 地質環境条件, 廃棄体条件の抽出・整理.....	29
5.1 地質環境条件 (天然バリア).....	29
5.1.1 岩盤の各種物性.....	31
5.1.2 水理条件.....	32
5.1.3 地下水質.....	32
5.2 廃棄体条件.....	34
6. セメント系材料の適用部位, 要求機能および求められる性能の整理.....	35
6.1 HLW 処分施設のセメント系材料に求められる性能の抽出.....	35
6.1.1 セメント系材料の状態変化の設定および検討項目の抽出方法.....	35
6.1.2 建設段階.....	35
6.1.3 操業段階.....	36
6.1.4 閉鎖後(地下水冠水後).....	37
6.2 HLW 処分施設に供するセメント系材料の挙動.....	37
7. まとめ.....	41
8. おわりに.....	41
参考文献.....	42



## Contents

1. Introduction .....	1
2. Outline of joint research .....	1
2.1 Joint research contents.....	1
2.2 Distribution role between JAEA and CRIEPI .....	4
3. Aim and coverage of the report.....	5
4. Issues of cementitious material used for HLW repository.....	5
4.1 Background and needs of the study .....	5
4.2 Current status of cementitious material studies for sub-surface disposal of LLW.....	7
4.2.1 Required function of cementitious materials in sub-surface disposal of LLW .....	7
4.2.2 Long term durability of cementitious materials in sub-surface disposal of LLW ...	9
4.3 Usage of cementitious materials in deep geological repository of TRU wastes .....	11
4.3.1 Engineered barrier components of deep geological repository of TRU wastes .....	11
4.3.2 Design requirement of engineered barrier of deep geological repository of TRU wastes .....	13
4.4 Pick out issues of cementitious materials in HLW repository taken in consideration of studies of LLW disposal and TRU waste repository .....	14
4.4.1 Outline of HLW repository .....	14
4.4.2 Requirements of cementitious materials in HLW repository .....	16
5. Arrangement of geological condition and heat from wastes .....	29
5.1 Geological condition .....	29
5.1.1 Rock properties .....	31
5.1.2 Hydrological condition .....	32
5.1.3 Groundwater constituent .....	32
5.2 Heat assumption from wastes .....	34
6. Applied parts and requirement of cementitious materials in deep geological repository of HLW .....	35
6.1 Required performance of cementitious material in deep geological repository .....	35
6.1.1 Setting of statement change of cementitious material and studied issues.....	35
6.1.2 Deterioration in construction period .....	35
6.1.3 Deterioration in operation period .....	36
6.1.4 Degradation after enclosure.....	37
6.2 Degradation behavior of cementitious material used for HLW repository.....	37
7. Summary. ....	41
8. Afterword .....	41
References .....	42

## 表目次

表 2- 1	共同研究の役割分担 .....	4
表 4- 1	余裕深度処分施設の低透水層および低拡散層の要求性能 .....	8
表 4- 2	TRU 廃棄物の地層処分システムの構築において考慮する要件 .....	13
表 4- 3	各人工バリアの設計上考慮すべき機能の整理 .....	13
表 4- 4	吹付けコンクリートの機能と効果 .....	17
表 4- 5	支保工に対する要件 .....	19
表 4- 6	ロックボルトの作用効果の概念 .....	20
表 4- 7	各坑道と予想される支保工 .....	22
表 4- 8	HLW 処分施設にセメント系材料を使用する場合の留意点 .....	27
表 5- 1	堆積岩系岩盤での設計用力学物性値 .....	31
表 5- 2	初期応力の設定例 .....	31
表 5- 3	岩盤の熱特性の設定値 .....	32
表 5- 4	地下水質の推定値 .....	33
表 6- 1	HLW 処分施設に供するセメント系材料の要求機能およびそれを満足するために求められる性能の整理（堅置き，軟岩） .....	39

## 図目次

図 2- 1	本共同研究の検討フロー .....	3
図 4- 1	余裕深度処分施設の概念と人工バリア構成（検討例） .....	7
図 4- 2	余裕深度処分施設を構成する人工バリアの要求機能設定の考え方 .....	8
図 4- 3	長期耐久性を考慮した設計・施工を実施するための留意点の抽出フロー .....	11
図 4- 4	TRU 廃棄物処分における人工バリアの基本構成 .....	12
図 4- 5	放射性廃棄物種類と処分深度 .....	15
図 4- 6	HLW 処分施設における廃棄体定置方式の例 .....	15
図 4- 7	HLW 処分施設に用いられるセメント系材料の適用部位 .....	16
図 4- 8	HLW 放射性廃棄物（ガラス固化体）の放射能の推移 .....	19
図 5- 1	処分場の全体設計フロー .....	30
図 5- 2	検討対象地点の深度と動水勾配の関係 .....	32

This is a blank page.



## 1.はじめに

核燃料サイクルで発生する放射性廃棄物処分のうち、低レベル放射性廃棄物（以下、LLW）の余裕深度処分、TRU 廃棄物および高レベル放射性廃棄物（以下、HLW）の地層処分それぞれの処分施設には、システムの構成要素としてセメント系やベントナイト系の材料が用いられる。これらの材料に要求される機能や使用されるシステムの構成部位はそれぞれの処分施設で異なるが、いずれも処分場閉鎖後は地下水位以下となる位置に建設される。現在国内で市販されているセメント系材料の pH は約 12.5～13.0 の高アルカリ性を示すことから、セメント系材料を使用した場合、地下水へのアルカリ成分の溶出により地下水の pH を上昇させることが想定される。地下水 pH の上昇は、結果的に人工バリアの緩衝材（ベントナイト系材料）や天然の岩盤の変質を引き起こすことや、オーバーパックなど金属材料の腐食プロセスあるいは廃棄物からの放射性核種に対して作用することが期待される溶解度などの物質移動特性に有意な影響を与える可能性がある。そのため、セメント系材料の使用は処分施設の閉鎖後の長期性能に対する不確実性を増大させる要因として考えられている。このような理由から、緩衝材や岩盤の性質に及ぼす可能性がある高アルカリ性のセメント系材料からの影響が様々な研究機関で検討されている<sup>例えば 1), 2), 3)</sup>。

一方、セメント系材料からの pH を 11.0 程度にすることができれば、このようなアルカリ性に対する影響は低減できることが従来より指摘されている<sup>4)</sup>。

低アルカリ性セメントは、以上の背景から開発が進められており、処分施設の閉鎖後の長期安全性に対する不確実性を低減するための一手段として、その活用が検討されている。

## 2. 共同研究の概要

### 2.1 検討項目

これまで、(財)電力中央研究所(以下「電中研」と記す)と日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」と記す)では、それぞれ長年にわたって低アルカリ性セメント材料の開発を含む放射性廃棄物処分の研究開発を実施してきており、これまで両機関に蓄積されてきた地層処分に必要な多くの技術、ノウハウを活用することを通じて「高レベル放射性廃棄物処分施設への低アルカリ性セメントの適用性に関する共同研究」を平成 18 年度より開始した。

本共同研究では、JAEA が実施を予定している幌延深地層研究施設での低アルカリ性セメントの原位置施工試験計画に電中研も参加することにより、双方の機関が所有する低アルカリ性セメントに関する技術や施工方法などを最大限活用し、実際の地質環境の場を対象とした低アルカリ性セメントの適用性を実証するとともに、その実用化に向けた今後の検討事項を抽出・整理することに主眼を置いている。以下に本共同研究の検討項目を示す。

**(1) HLW 処分施設に供する低アルカリ性セメントの要求機能の整理と既往の知見整理**

HLW 処分施設に供するセメント系材料の要求機能を、これまでに公開されている文献等に基づいて調査し、本共同研究で検討対象とする部位を設定するとともに、それらの部位に必要な要求機能を部位ごとに整理する。

また、各種低アルカリ性セメントを用いた硬化体の諸物性値の取得・評価の現状を調査し、現状における低アルカリ性セメントの検討事項の抽出・整理を行う。

検討項目は以下の通りである。

- ①セメント系材料の適用部位とその要求機能の調査・整理
- ②低アルカリ性セメントを用いた硬化体の諸物性値の取得・評価の現状調査
- ③現状の低アルカリ性セメントの検討事項の抽出・整理

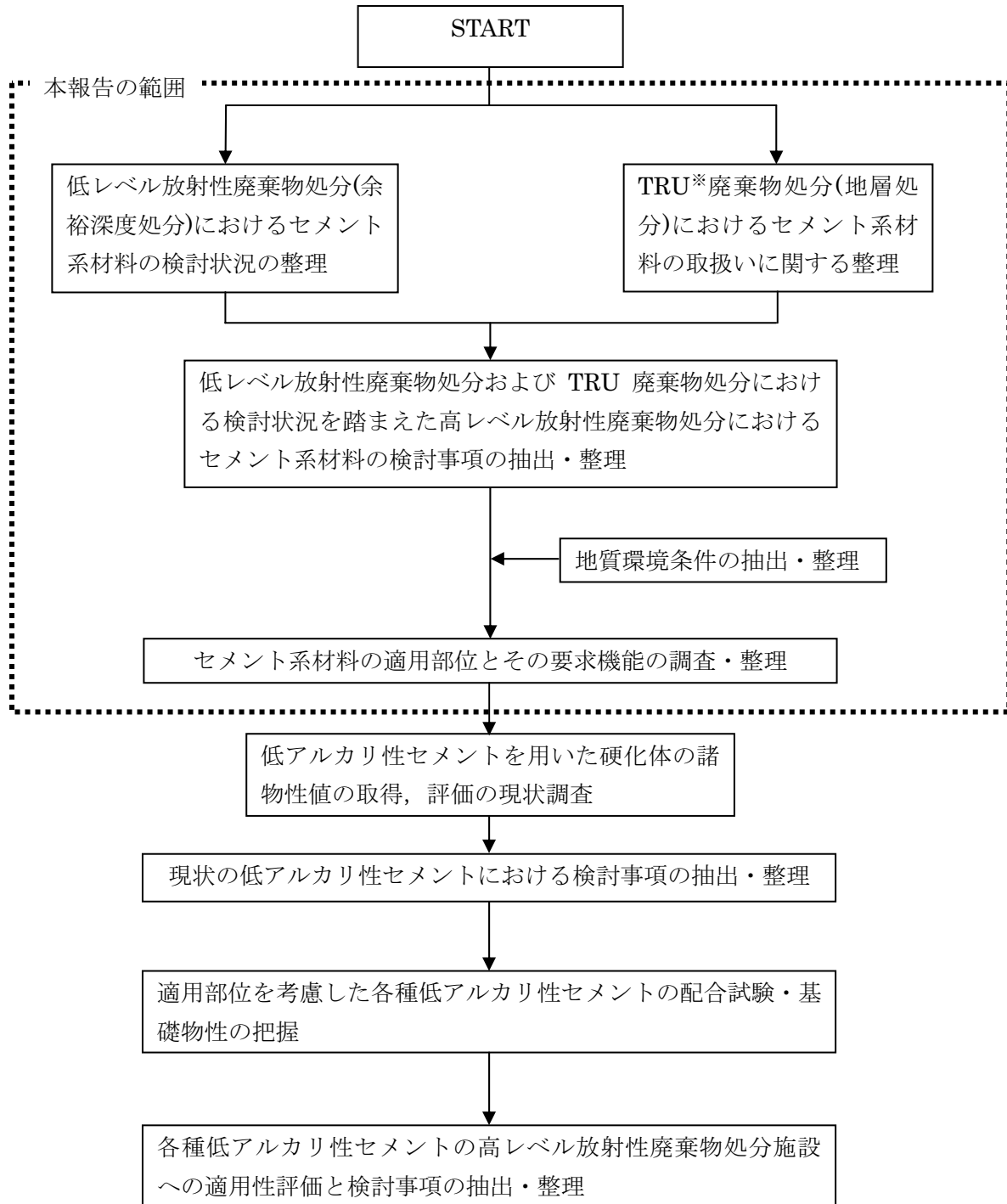
**(2) 適用部位を考慮した各種低アルカリ性セメントの配合試験・基礎物性の把握**

上記(1)の成果に基づいて、各種低アルカリ性セメントの基礎物性取得試験、および適用部位を考慮した配合試験を行う。

**(3) 各種低アルカリ性セメントの HLW 処分施設への適用性評価と検討事項の抽出・整理**

上記(2)で取得した各種データに基づく各種低アルカリ性セメントの特性を、(1)で整理した各部位の要求機能に照らして、適用性を評価するとともに、検討事項を抽出・整理する。

本共同研究の検討フローを図 2-1 に示す。



※TRU 廃棄物：超ウラン核種を含む放射性廃棄物

図 2-1 本共同研究の検討フロー



### 3. 本報告の目的および範囲

本報告は、図 2-1 の破線で示した範囲（2.1 で示した（1）の①）を対象とし、HLW 処分施設でのセメント系材料の適用部位とその要求機能を整理し、低アルカリ性セメントを適用する際に求められる性能を抽出する。

上記の目的を達成するため、4 章において、HLW 以外の放射性廃棄物処分におけるセメント系材料の検討状況や取扱いについてまとめ、これらを考慮して HLW 処分施設にセメント系材料を使用する場合の留意点を抽出した。次に、5 章において、地質環境条件の整理および廃棄体条件の整理を行った。以上を踏まえて、6 章において、HLW 処分施設でのセメント系材料の適用部位とその要求機能を明らかにし、低アルカリ性セメントを適用する際に求められる性能を抽出した。

#### 4. HLW 処分におけるセメント系材料を使用する場合の留意点の抽出

##### 4.1 検討の背景と必要性

HLW 処分施設の建設・操業が将来実施される頃には、LLW の余裕深度処分施設の操業は開始されていると考えられる。HLW と LLW では、放射能レベルや発熱特性など対象となる廃棄物の性質が異なるため、主に前者は隔離型、後者は管理型とその処分概念も大きく異なる。このため、バリアシステムの基本的考え方も異なっている。セメント系材料の役割がその一つであり、LLW の余裕深度処分ではセメント系材料が人工バリアのシステム構成要素の一つとして核種移行抑制機能を担っているが、HLW 処分施設ではバリア材としては考えられていない。この違いの理由は、社会一般には解りづらい部分があり、今後両者の相違点を明確に説明していくことが重要と考えられる。

現在日本原燃株（以下「JNFL」と記す）と電気事業者によって鋭意検討が行われている LLW の余裕深度処分の施設の検討では、国による線量基準に関する検討において、様々な安全評価シナリオが検討される一方、原子力学会・土木学会による規格の検討も実施されている。LLW の余裕深度処分施設を構成する人工バリア材としてのセメント系やベントナイト系いずれの材料に対しても、核種移行に対する抑制機能とその長期耐久性が期待されている。LLW の余裕深度処分の検討状況や規格基準類が HLW に先立ち社会に公開されることを勘案すると、今後 HLW 処分に用いられるセメント系材料に要求される機能を明確に示し、社会一般に対しても説明していく必要性が高まることも容易に想像される。

このため、本検討では、現在までの LLW の余裕深度処分におけるセメント系材料への要求機能の設定方法および長期耐久性に関する議論を整理し、更に TRU 廃棄物の地層処分におけるセメント系材料の取扱いも整理した上で、HLW 処分施設に供されるセメント系材料に対する要求機能を調査・整理することとする。検討項目は以下の通りである。

- ① LLW の余裕深度処分におけるセメント系材料の検討状況の整理
  - ・ LLW の余裕深度処分施設におけるセメント系材料の要求機能
  - ・ LLW の余裕深度処分施設におけるセメント系材料の長期耐久性評価の考え方
- ② TRU 廃棄物の地層処分におけるセメント系材料の取扱い
- ③ LLW, TRU の廃棄物処分の検討状況等を踏まえた HLW 処分施設にセメント系材料を使用する場合の留意点の抽出・整理

- ・ **HLW** 処分施設に供するセメント系材料の部位とその要求機能
- ・ 上記を踏まえた **HLW** 処分施設にセメント系材料を使用する場合の留意点の抽出

## 4.2 LLW の余裕深度処分におけるセメント系材料の検討状況の整理

### 4.2.1 LLW の余裕深度処分施設におけるセメント系材料の要求機能

余裕深度処分施設の概念図および人工バリア構成は図 4-1 に示すとおりである。図に示すような余裕深度処分施設は地下 50m 以深に建設される予定であり、余裕深度処分施設の構成は以下の通りである。

- ① 支保工
- ② 埋め戻し材
- ③ 低透水層（ベントナイト材料）
- ④ 低拡散層（セメント系材料）
- ⑤ コンクリートピット
- ⑥ 充てん材（セメント系材料）
- ⑦ 廃棄体

これらの材料の要求機能は図 4-2 のような考え方にに基づき整理されている。

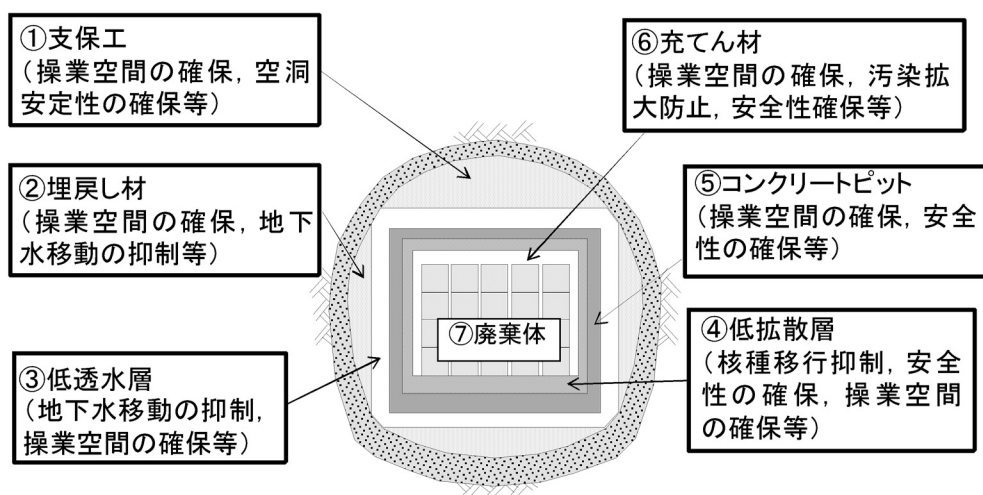


図 4-1 余裕深度処分施設の概念と人工バリア構成（検討例）  
 （京谷 2005<sup>5)</sup>，土木学会エネルギー委員会 2008<sup>6)</sup>を参考に作成）



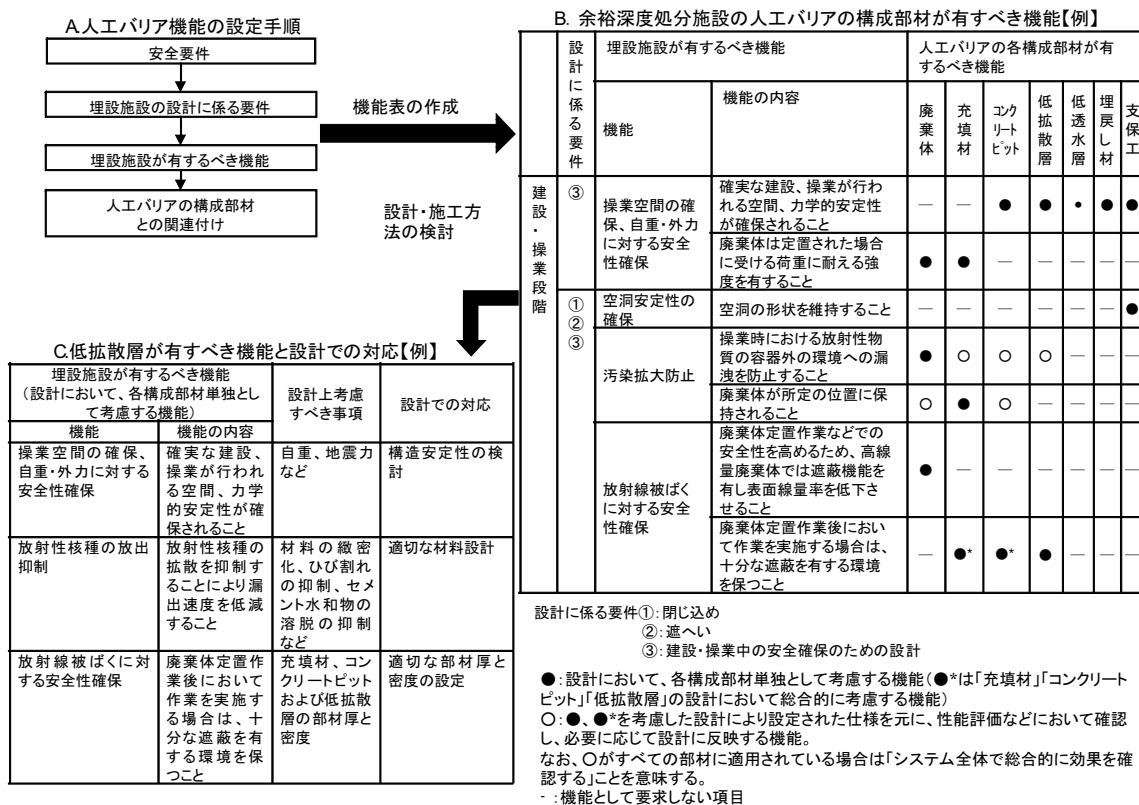


図 4-2 余裕深度処分施設を構成する人工バリアの要求機能設定の考え方  
(土木学会エネルギー委員会 2008<sup>6)</sup>、河西 2007<sup>7)</sup> を参考に作成)

図 4-2 では、人工バリアの機能設定について、埋設施設の安全要件に基づき埋設施設の設計に係る要件を設定し、人工バリアの各構成部材が有すべき機能を設定している<sup>6)</sup>。具体的には、「低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について(案)」<sup>8)</sup>の基本的機能(安全要件)などを参考に、埋設施設の設計に係る要件、埋設施設が有すべき機能を設定し、人工バリア部材との関連付けを行っている(図中 A)。次に、要件ごとに機能を整理し、対応する構成部材と結びつけた整理を行い、人工バリアの各構成部材が有すべき機能を設定している(図中 B)。その後、各構成部材が有すべき機能と設計での対応を設定している(図中 C)。

以上のような考え方にに基づき各構成部材の要求機能を設定し、そのために必要な性能を設定している。余裕深度処分施設を構成する人工バリア部材は低透水層と低拡散層であり、表 4-1 に示すような機能が要求されている。これらの人工バリアは廃棄体からの核種の移行を抑制すること(核種移行抑制機能)が期待されている。また、埋戻し材、支保工、充てん材には空洞安定性や自重や外力に対する安定性などが主に求められている。

表 4-1 余裕深度処分施設の低透水層および低拡散層の要求性能

部材名	材料	主な要求性能(核種移行抑制機能)
低透水層	ベントナイト系材料	低透水性
低拡散層	セメント系材料	低拡散性

原子力安全委員会が、平成10年10月に取りまとめた「現行の政令濃度上限値を超えるLLW処分の基本的考え方について」<sup>9)</sup>（以下「基本的考え方」という。）では、海外の事例等を調査したうえで、処分概念として、軟岩系の地山に対してはトンネル型、硬岩系の地山に対してはサイロ型の空洞内部にコンクリート構造物（ピット）を設置し、廃棄物を収納し埋戻す施設が考えられるとしている。また、余裕深度処分の埋設対象廃棄物を安全かつ合理的に処分するとともに、数百年の管理期間が経過した後の処分場跡地について一般的な土地利用が制約されないようにするためには、以下の対策を講じることが必要であるとしている。

- ① 一般的な地下利用に十分余裕を持った深度（例えば地表から50m以深）に処分
- ② 放射性核種の移行抑制機能の高い地中を選定
- ③ コンクリートピットと同等以上の閉じこめ機能を持った処分施設を設置
- ④ 放射性核種の濃度の減少を考慮して数百年間処分場を管理

このため、余裕深度処分施設に供される人工バリアには長期の核種移行抑制機能の維持が期待されている。

また、原子力安全委員会が平成19年7月に「低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方(中間報告)」<sup>10)</sup>（以下「安全規制の基本的考え方」という。）を策定した。「安全規制の基本的考え方」では、想定するシナリオを、基本シナリオ、変動シナリオ、人為・稀頻度事象シナリオに分類し、それぞれに対応する評価結果の判断のめやすについて、国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告<sup>11)</sup>等を参考に、 $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ 、 $300\mu\text{Sv}/\text{年}$ 、 $10\text{mSv}/\text{年}$ から $100\text{mSv}/\text{年}$ と設定することが適当であるとしている。また、この中では、将来的に新たな知見が明らかになったとしても、それが、評価結果から導かれるべき安全性の判断に出来るだけ影響が及ばないように、処分システム性能の頑健性（Robustness）に配慮しておくことに言及している。

上記に示したLLWの余裕深度処分施設の安全規制を巡る考え方の全てが、HLWにも適用されるとは限らないが、これらの考え方を整理して、廃棄物の特性、処分方法、バリア構成およびその機能の相違に基づいて十分応えられるようにすることが必要である。特に、いずれの処分施設においても、埋戻し後の要求機能や施設の状態の変化を適切に評価する必要があり、長期的なセメント系材料の安定性（長期耐久性）の評価が重要となる。そのため、次節においてはLLWの余裕深度処分施設におけるセメント系材料の長期耐久性評価の考え方をまとめる。

#### 4.2.2 LLWの余裕深度処分施設におけるセメント系材料の長期耐久性評価の考え方

余裕深度処分施設に供される人工バリア材料の核種移行抑制機能の評価においては、施設の施工から、埋め戻し、その後の処分環境条件を踏まえた上で、①人工バリアに生じる各種変質現象を適切に抽出し、②その「変質状態」を踏まえた上での要求性能に対する評価が必要とされる。

このため、土木学会エネルギー委員会では、想定される処分環境条件で、余裕深度処分施設の施工段階までに生じると思われる初期欠陥等のひび割れ要因を抽出・整理し、さらに埋め戻し段階、および地下水冠水後までに余裕深度処分施設に生じる状態変化の抽出・整理を行い、その「状態」における既往技術の評価手法の調査および検討事項の整理を行っている<sup>6), 7)</sup>。

このような検討を行った技術的背景および理由を以下に示す。

余裕深度処分施設的设计・性能評価では、従前の浅地中設処分施設とは異なり、人工バリア材

料に核種移行抑制機能を要求し、その機能を長期に亘って期待している。一方、人工バリア材料のうち、セメント系材料の長期耐久性は100年程度のデータ・記録しかないのが現状であり、また100年程度の期間を外挿評価できる範囲内での研究しか実施されていなかった。また、現在広く用いられている水硬性セメントは200年程度の歴史しかなく、その長期耐久性を定量的に評価することが困難である。

加えて、余裕深度処分施設的设计・性能評価を複雑にしているものに、処分される廃棄物に含まれる長半減期の放射性核種の存在がある。有意な量の長半減期核種が含まれている場合には、評価シナリオに基づく被ばく線量評価の中で、線量が最大値を示す期間が各種バリア材料の評価期間を大きく支配する。従前の浅地中埋設処分でも、性能評価上、長半減期核種が検討対象にはなかったが、廃棄物に含まれる放射性核種濃度が現行の政令濃度上限値以下であることから、セメント系材料に要求されるバリア機能のうち低透水性の機能が低下しても基準線量を十分満足することが確認されている。安全評価を実施する場合には、廃棄物からの放射性核種が移行することによる周辺公衆への被ばく線量の評価が行われる。この評価は、「地下水移行シナリオ」、「掘り返しシナリオ」等、核種の移行経路として想定されるあらゆるものを想定したシナリオに基づいて行われた。このようなシナリオの中には、それが生じる可能性の頻度が非常に小さいものもあり、実際には起こることはないのではないかとされるものもある(たとえば、セメント系材料は建設後30年程度で透水係数が砂程度のものになるといった想定)。このような過度に安全側になるように設定した評価においても、浅地中埋設処分施設は安全であるとの結果が得られ、安全審査を終了し、許認可が得られた。しかしながら、過度に安全側の評価は、安全性の確保がより確実なものとなることを示すうえで有効であるものの、設計・建設の面では過剰仕様の設計やコスト増を招くだけでなく、今後のLLWの余裕深度処分を鑑みた場合、放射能レベルがより高いことから、ますます過度に安全側のシナリオが設定される可能性がある。

以上のことから、余裕深度処分施設的设计では、安全評価を実施する上で適切なシナリオを設定するために、①その環境条件を踏まえ、各バリア材の核種移行抑制機能を適切に設定し、②その人工バリアとしての特性を正しく評価し、③その結果を十分考慮した性能評価を実施することが必要となる。このため、余裕深度処分施設的设计・性能評価を合理的に実施していくにあたっては、(1) 処分環境条件を踏まえた上で、処分施設を構成するバリア材料の長期的な挙動を考慮した設計を行うとともに、(2) その結果を踏まえ、実際に生じる可能性の高い現象を抽出・整理し、適切な「状態設定」をした上で性能評価を行い、(3) 適切な核種移行経路を表現した安全評価シナリオの設定が必要となった。

上記(1)～(3)を実施する手順として、図4-3に示す検討フローに従って行った。すなわち、図4-3では施工段階～埋め戻し段階、地下水による冠水後までに生じる各種現象と、その程度を既存技術で極力精度よく予測し、検討・評価すべき現象の抽出を行い、できるだけ長期に亘って機能を維持するために必要な材料仕様の選定、設計・施工方法の検討、バリア機能の評価を実施した。このような抽出フローに従った検討を行うことにより、施工段階での影響要因及び状態や埋め戻し後までに想定される余裕深度処分の人工バリア状態に対する影響要因及び状態を抽出し、各段階における想定される施設の状態を設定している。

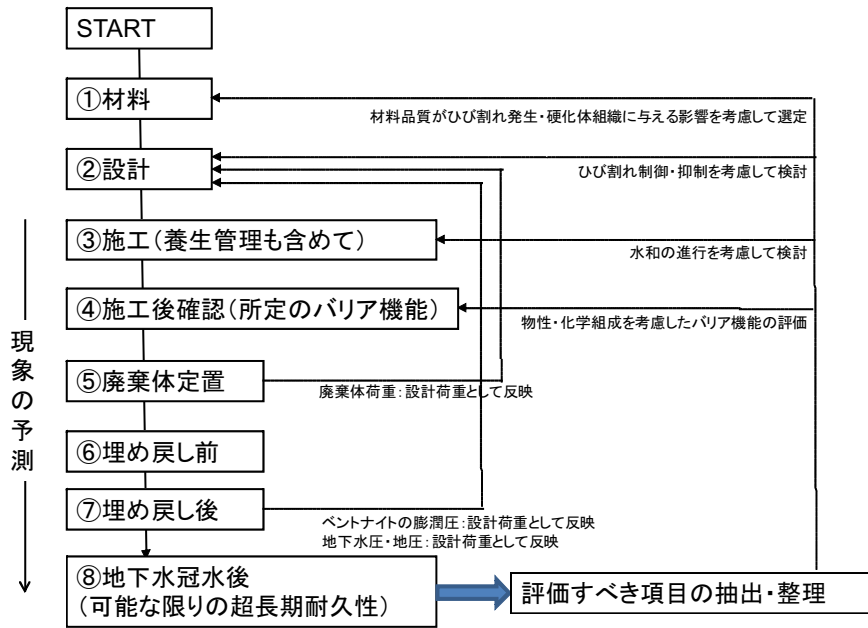


図 4-3 長期耐久性を考慮した設計・施工を実施するための留意点の抽出フロー

### 4.3 TRU 廃棄物の地層処分におけるセメント系材料の取扱い

TRU 廃棄物は、主に再処理施設や MOX 燃料加工施設における操業および解体等によって発生し、これに含まれる放射性物質濃度は、低いものから比較的高いものまで広範囲にわたっている。第 2 次 TRU レポート<sup>12)</sup>では、放射性物質濃度や核種組成などに応じて、コンクリートピット処分、余裕深度処分、地層処分の 3 つに廃棄体を区分している。更に地層処分対象の廃棄体については核種の種類・濃度、発熱特性、含有化学物質の観点から 4 つのグループ分類している。

ここでは、TRU 廃棄物の地層処分の概要を示すとともに、人工バリアの設計要件について整理することとした。

#### 4.3.1 TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの構成

TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの基本構成を図 4-4 に示す。これらのうち、セメント系材料の使用が考えられている部位は、廃棄体を構成する固化材と廃棄体パッケージ（廃棄体を収納する容器）、廃棄体と構造躯体間の充てん材、構造躯体、支保工であり、後述する HLW の地層処分と比較すると、セメント系材料が多用されている。

また、先に示した廃棄体のグルーピングによって人工バリアの構成が異なっており、半減期や地下水への移行の観点からグループ 3、4 に分類される廃棄体の場合については緩衝材を省略することが考えられている。

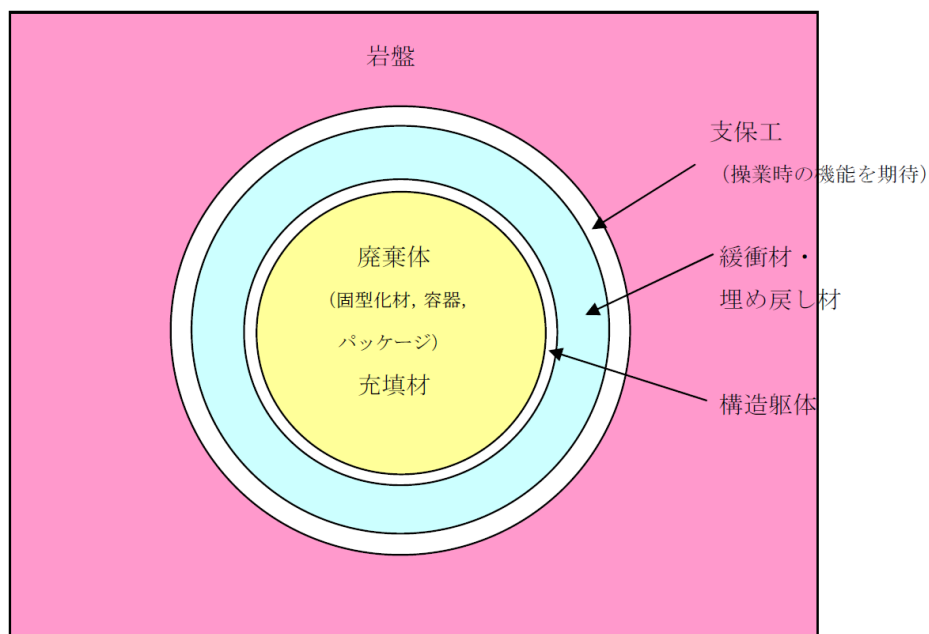


図 4-4 TRU 廃棄物処分における人工バリアの基本構成<sup>12)</sup>



### 4.3.2 TRU 廃棄物の地層処分における人工バリアの設計要件の整理

第2次 TRU レポート<sup>12)</sup>では、処分システムの構築において考慮する要件を表 4-2 に示すように設定し、これらの要件を確保するため、それぞれの人工バリアに要求される機能を表 4-3 に示すように整理している。

表 4-2 TRU 廃棄物の地層処分システムの構築において考慮する要件<sup>12)</sup>

- |   |
|---|
| ① 多重の安全機能を有する受動的人工バリアシステムの設計            |
| ② 低流速、拡散・分散・希釈・遅延等の有用なプロセスを有する処分システムの設計 |
| ③ 適切な定置、構造物の配置、レイアウトのための設計              |
| ④ 有害な現象や擾乱を緩和する特性を有する設計                 |
| ⑤ バリアの相互作用・補完性を考慮した設計                   |
| ⑥ 人間侵入の影響を最小化するための設計                    |
| ⑦ 作業期間中等の安全を確保するための設計                   |

表 4-3 各人工バリアの設計上考慮すべき機能の整理<sup>12)</sup>

区分	安全要件との対応	機能	機能の内容	廃棄体		充填材	構造躯体	緩衝材	埋戻し材	支保工	
				固化材	容器 バネージ						
作業期間	作業中の安全確保	③, ⑦	空洞安定性	坑道の形状維持及び壁面剥離防止	—	—	—	—	—	●	
		③, ⑦	廃棄体の定置	廃棄体定置及び充填材施工の効率化	—	●	—	●	—	—	
		③, ⑦	廃棄体の強度	廃棄体の耐埋設荷重強度	○	○	●	—	—	—	
		③, ⑦	汚染拡大防止	放射性核種の漏出防止	●	●	●	—	—	—	
閉鎖後	溶出・移動の抑制	②	地下水移動の抑制	地下水浸入量の抑制	—	—	○	○	●	○	
		②, ⑥	放射性核種の溶出制限	放射性核種の物理的な閉じ込め	○	○	○	○	○	—	—
				化学的緩衝性	○	—	○	○	○	—	—
		②	放射性核種の取着	放射性核種の人工バリア材への取着	○	—	○	○	○	—	—
		②	自己シール性	発生空隙の充填	—	—	—	—	○	○	—
	力学的安定性	①	応力緩衝性	外力に対する緩衝性	—	—	—	—	○	○	○
		①	力学的支持性	廃棄体/構造躯体の支持	—	—	○	—	●	—	—
		①	坑道の安定性	処分坑道の力学的安定性	—	—	○	○	○	○	○
	化学的安定性	⑤	化学変質に対するバリア機能維持	長期的変質の考慮	○	○	○	○	●	—	○
	その他	④	熱伝導性	廃棄体発熱の放散	○	○	○	○	○	○	—
		④	透気性	ガス透過性/自己修復性	—	○	○	○	○	○	—
		④	コロイドの移動抑制	コロイドのろ過	—	—	—	—	○	—	—

●設計上考慮すべき機能

○設計上考慮せずに、設定された仕様によりその効果を確認する機能

表 4-3 より、セメント系材料の使用が想定される廃棄体、充填材、構造躯体、支保工については、作業中の安全性確保が設計上考慮すべき機能となっている。また、閉鎖後に関してセメント系材料は、建設・作業中の要求機能を満足する仕様をもって核種の溶出・移動の抑制や力学的・化学的安定性などに対する効果（影響）を確認することとなっている。一方、緩衝材（ベントナイト系材料）については、閉鎖後の長期挙動を設計上考慮すべきとしており、第2次 TRU レポート<sup>12)</sup>では、長期圧密挙動、セメント影響などを考慮して厚さや乾燥密度などが設定されている。

#### 4.4 LLW および TRU の廃棄物処分における検討状況等を踏まえた HLW 処分におけるセメント系材料を使用する場合の留意点の抽出

4.2 に示したような考え方に基づいて、余裕深度処分施設の人工バリア材料に関する検討が実施されており、現在学会等でも議論が進められている。余裕深度処分施設は管理型処分であり、隔離型処分である HLW や TRU 廃棄物の地層処分とは、その処分に対する基本概念は異なる。このため、セメント系材料の要求機能は各処分方式で異なるが、建設や操業の各段階において、部位に要求される機能を抽出し、それぞれの施工から埋め戻しまでの方法を検討するという方法は参考になる。そこで、HLW 処分方式の特徴を踏まえて、セメント系材料の適用部位および設計・施工方法を個々に検討し、セメント系材料を使用する場合の留意点を整理することとした。

##### 4.4.1 HLW 処分施設の概要

HLW の地層処分施設と余裕深度処分施設の異なる点は処分深度、坑道規模はもとより、最も大きな違いは、人工バリアのシステム構成である。また深度については、余裕深度処分の 50m 以深に対し、地層処分では 300m 以深となっている（図 4-5 参照）。坑道径については、LLW の余裕深度処分施設が十数 m に対し、HLW 処分施設では、数 m 程度である。従って、地層処分施設の方が坑道径は小さいものの地下深部の高地圧下に置かれるため、地質環境条件によっては空洞安定性のための支保工の要否の検討が重要となる。

人工バリアのシステム構成については、余裕深度処分ではモルタルなどのセメント系材料とベントナイト系材料であるのに対し、HLW 処分では金属材料（オーバーパック）、ベントナイト系材料（緩衝材）で構成されており、セメント系材料は用いていない。

地層処分研究開発の第 2 次取りまとめ<sup>4)</sup>では、廃棄体（ガラス固化体＋オーバーパック）の定置方式として縦置き方式と横置き方式が示されており、図 4-6 に示すとおりである。同図は、硬岩系岩盤および軟岩系岩盤における両定置方式を示しており、それぞれの処分深度を 1000m、500m と想定し、坑道の空洞安定性（岩盤の局所安全率 1.5 以上の領域を坑道間に確保）および廃棄体からの熱影響（緩衝材の制限温度として 100℃未満を設定）の双方の制約から廃棄体の定置間隔を求めている。



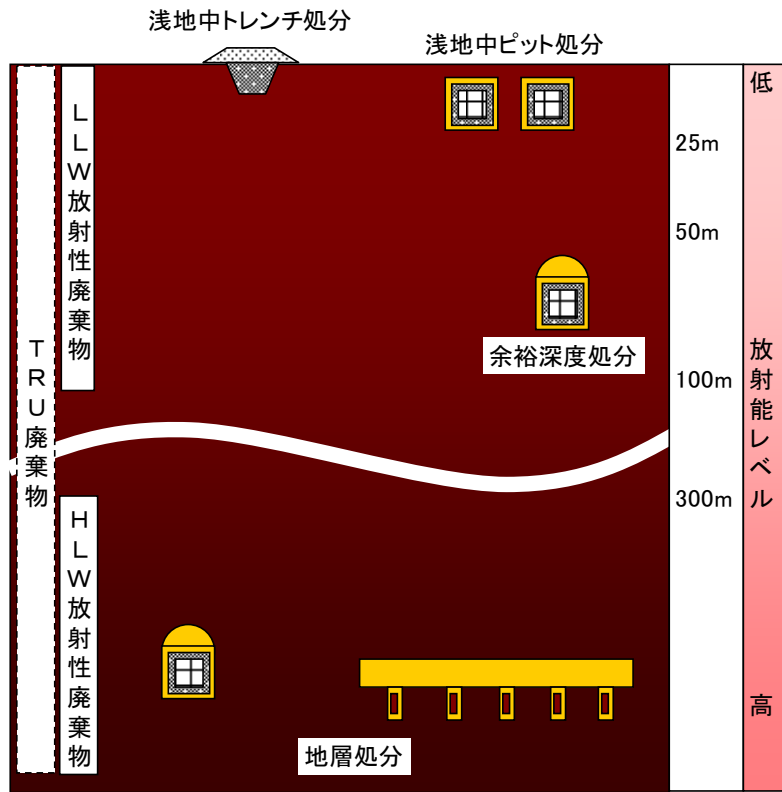


図 4-5 放射性廃棄物種類と処分深度 (資源エネルギー庁<sup>13)</sup>を参考に作成)

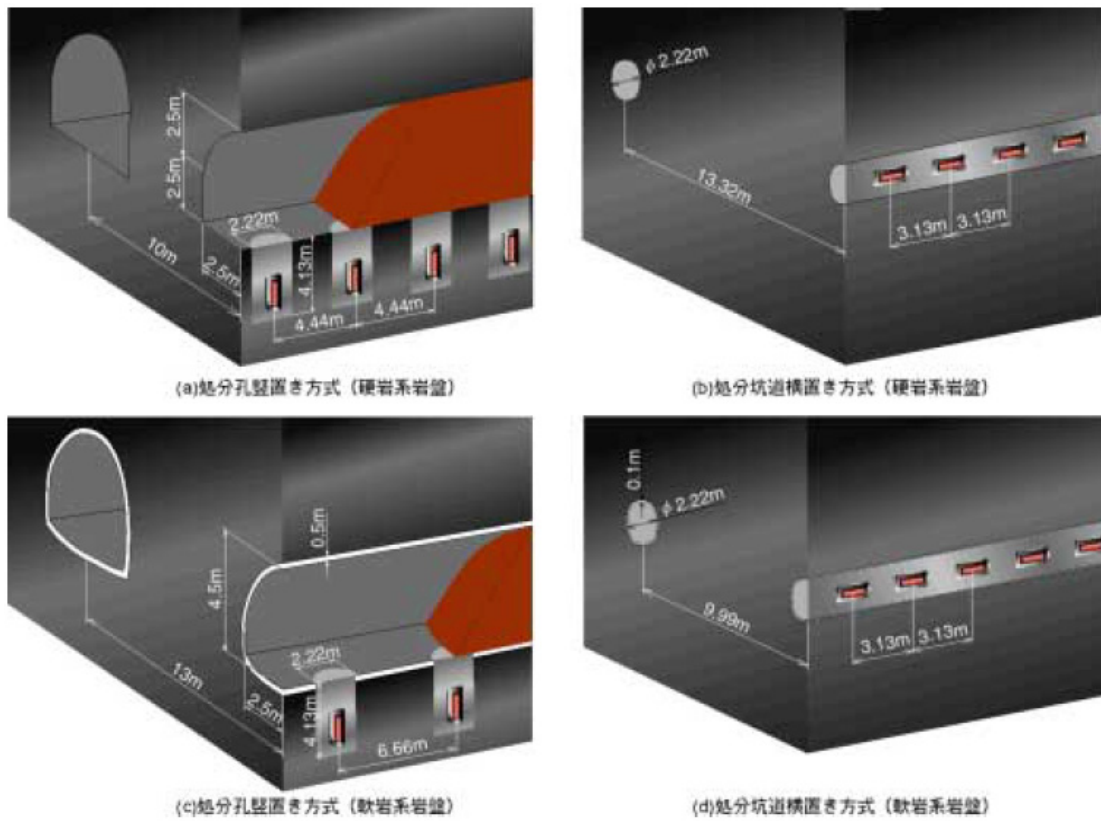


図 4-6 HLW 処分施設における廃棄体定置方式の例<sup>4)</sup>

地層処分研究開発の第2次取りまとめ<sup>4)</sup>によれば、豎置き方式の場合、処分孔は無支保が想定されており、緩衝材が直接セメント系材料と接する可能性はないが、軟岩系岩盤の場合、横置き方式では処分坑道の支保工と緩衝材が接することとなる。

HLW 処分施設の場合、LLW の余裕深度処分施設と異なり、核種移行抑制機能、すなわち人工バリアとして期待されているシステム構成要素は、オーバーパックと緩衝材であり、セメント系材料には期待していない。その役割は、主に建設・作業中の空洞安定性、すなわち力学的機能が要求される支保工としての用途である。この点は、TRU 廃棄物の地層処分でも同様である。しかし、処分場閉鎖後にセメント系材料から溶出する可能性のある高アルカリ性の間隙水が人工バリア（緩衝材）や天然バリア（岩盤）が有する核種移行抑制機能に影響（オーバーパックの腐食形態の変化や緩衝材の膨潤性能の低下等）を与えることや、長期においては、セメント系材料自体もセメント水和物の溶脱によって空隙率が増大することにより水みちとなり、これが放射性核種の移行経路となることが想定されている。この現象は、現在、LLW の余裕深度処分、TRU 廃棄物でも共通に検討されている課題であり、整合性の取れた検討・評価が必要とされるものである。

以上のことを踏まえて、以下に本検討で想定した HLW 処分施設に供する場合のセメント系材料の要求機能および留意点を抽出・整理する。

#### 4.4.2 HLW 処分施設に使用されるセメント系材料に対する要求機能および留意点

HLW 処分施設に用いられるセメント系材料の適用部位は、図 4-7 に示すように、(1) 吹付けコンクリート、(2) ロックボルト定着材、(3) 覆工コンクリート、(4) セグメント、(5) グラウト、(6) 力学プラグ（強度プラグ）が想定されている<sup>14)</sup>。以下、それぞれの部位の性能と施工方法や特徴、留意点について述べる

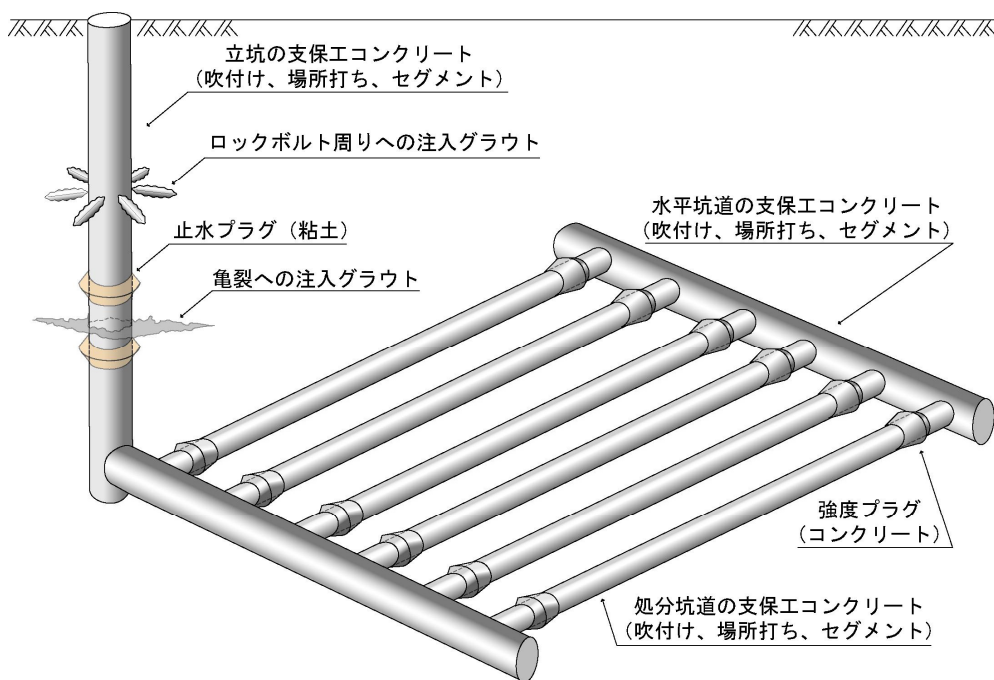


図 4-7 HLW 処分施設に用いられるセメント系材料の適用部位<sup>14)</sup>

(1) 吹付けコンクリート

① 吹付けコンクリートの機能と施工方法

(a) 吹付けコンクリートの機能

吹付けコンクリートには、建設、操業中に処分施設の坑道の空洞安定性を確保する機能が要求される。吹付けコンクリート指針（案）【トンネル編】<sup>15)</sup>では、トンネル支保工における吹付けコンクリートの機能と効果を表 4-4 のように示している。

表 4-4 吹付けコンクリートの機能と効果（土木学会 2006<sup>15)</sup>を参考に作成）

機能	I	軸圧縮(アーチ)抵抗
	II	せん断抵抗
	III	曲げ抵抗
	IV	吹付けコンクリートと地山境界面でのせん断および付着
効果	①	肌落ち防止、小岩塊保持効果(II、IV)
	②	地山への支保内圧付与効果(I、IV)
	③	弱層補強および形状保持の効果(I、II、III、IV)
	④	地山応力分布の円滑化効果(I、II、III、IV)
	⑤	地山の劣化・風化抑制効果(被覆効果)

表 4-4 に示されるとおり、空洞安定性の観点からは力学的性能が重要とされる。また、岩盤の緩み領域の進展を極力抑えるためには、掘削後速やかに吹付けコンクリートを施工し、ロックボルトなどの他の支保部材とともに早期に岩盤との一体化を図る必要がある。このため、材齢 24 時間までの初期における強度発現が要求されることが通常のコンクリートと大きく異なる点である。この初期強度を確保するため混和剤として急結剤が用いられる。

New Austrian Tunneling Method（以下、NATM とする）における支保設計の考え方は、ある程度の地山の変位を許容し、吹付けコンクリート等の柔な支保工により適切な支保内圧を地山へ付与し、本来地山が持っている空洞支持力を最大限に活用することにある。このため、吹付けコンクリートは掘削による岩盤変位を抑制し、この際に生じる反力すなわち支保内圧を発揮する機能が要求されていることから、強度特性に加え静弾性係数やクリープ、乾燥収縮等の変形特性の評価も重要となる。変形特性については、設計基準強度のような設計上の規定値はないものの有限要素解析等の数値解析で岩盤の緩み領域や吹付けコンクリートの発生応力を評価する際には重要となる。

(b) 吹付けコンクリートの配合設計と施工

吹付けコンクリートの施工は、コンクリート製造プラントによる製造、アジテータ車等による運搬、コンクリートポンプ等による吹付け機までの圧送、ノズル付近で急結剤を混合し吹付けを行う、という 4 つの段階に区分される<sup>15)</sup>。従って、施工性に関しては、スランプロス（スランプ値の経時的な低下）、ポンパビリティ（ポンプ圧送性）、はね返り率（リバウンド）、粉じん濃度について把握し、作業者の安全性、施工効率、ならびに吹付け後のコンクリートが所要の力学的性能を有している必要がある。また、吹付けコンクリートの施工上の最大の品質阻害要因として掘削壁面からの湧水がある。湧水を放置したまま施工した場合、コンクリートの水セメント比の変化やモルタル分の流出等が生じ、コンクリート自体の強度低下や吹付け面との付着性が低下する恐れがある。このため、排水パイプやフィルター材等により集水し、水の影響を排除しながら施工する必要がある<sup>15)</sup>。

配合設計では、所定の設計基準強度を満足するとともに適切な施工性を確保するよう、粗骨材の最大寸法、水セメント比（混和材を結合材として用いる場合には水結合材比）、単位水量、単位セメント量（単位結合材量）、細骨材率、混和剤量、急結剤の添加量等を決定する必要がある。また、従来のトンネルの吹付けコンクリートは、覆工コンクリートの設置が前提とされている場合が多く、耐久性について検討された例は少ないが、吹付けコンクリートのみを支保部材とする場合には、耐久性を考慮した配合とする必要がある。

## ② 操業期間中の耐久性における留意点

耐久性は主に操業期間中に要求される。耐久性に影響を与える要因としては、経年によるコンクリートの劣化や岩盤の緩み圧によるひび割れ等が考えられる。吹付けコンクリートは、表 4-4 のうち、主に軸圧縮抵抗部材として機能することから、基本的には無筋コンクリート構造となる。坑内の環境条件から考えると、経年劣化を生じる要因としては、中性化、塩害、アルカリ骨材反応が想定される。このうち、塩害は、無筋コンクリートであることから、経年劣化に関して特に検討する必要性は少ないと考えられるが、塩化物イオンや硫酸イオンによるコンクリートの変質には留意する必要がある。また、中性化、アルカリ骨材反応は考慮する必要があると考えられる。中性化は、空気中の二酸化炭素が水酸化カルシウム、けい酸カルシウム水和物、エトリンガイト、モノサルフェート等の主要なセメント水和物と反応し、炭酸カルシウムを生成してセメント中の pH を低下させる現象である。コンクリートに対する影響については、炭酸カルシウムが硬化したセメントの細孔構造を緻密にし、強度を増加させるとの報告もあるが、長期暴露試験の結果からは中性化部分の細孔量が大きくなることも示されており、現状ではっきりとした結論は得られていない<sup>16)</sup>。対策としては、水結合材比に上限値を設けること等が考えられる。一方、アルカリ骨材反応に対しては、使用する材料に起因する内的要因を排除（反応性骨材を使用しない、低アルカリ型のポルトランドセメントを使用する）すれば防ぐことが可能であるため、配合設計時の使用材料の選定において留意すればよいと考えられる。ただし、使用する骨材から完全に反応性骨材を取り除くことは難しく、また、吹付けコンクリートにおいては高 pH 成分を含む急結材を使用する必要があるため注意が必要である。

また、トンネル特有の経年的な変状として、空洞周辺岩盤の緩み圧が局所的に徐々に増加し、コンクリートにひび割れを生じさせることがある。これは、コンクリートの経年劣化ではなく岩盤の時間依存性挙動（クリープ等）によるものである。この対策としては、繊維補強コンクリートとすることが考えられる。ただし、地下水に塩化物イオンが含まれている場合には、使用する繊維の種類について、鋼繊維を採用しない等の配慮が必要である。

## ③ 閉鎖後における留意点

処分施設の閉鎖後については、既に坑道が埋め戻されており、吹付けコンクリートに空洞の安定性を確保する機能は必要とされない。図 4-8 に HLW 放射性廃棄物（ガラス固化体）の放射能の推移<sup>16)</sup>を示す。図から、ガラス固化体の放射能レベルが、その元となった核燃料を製造するのに必要な量の天然ウラン鉱石が有するレベルと同程度になるには数万年程度の期間が必要となることがわかる。この数万年オーダーの長期間においては、表 4-5 に示す支保工に対する要件のうち化学的安定性が求められており、核種移行遅延性能へ顕著な影響を与えないよう配慮することが必要とされている。

表 4-5 支保工に対する要件

(電力中央研究所, 電気事業連合会 1999<sup>17)</sup> を参考に作成)

要件	概要
力学安定性	・建設～閉鎖までの期間において、坑道周辺岩盤へ適切な支保圧を付与
施工性	・地山安定のため早期架設が可能で初期強度の発現が早い支保工を選択
化学的安定性	・コンクリートと緩衝材の接触により、緩衝材が許容限度を超えて変質することを抑制 (高アルカリ影響等) ・コンクリートの変質により、支保工部分が許容限度を超えた高透水ゾーンとなることを抑制 (セメントの溶脱等)

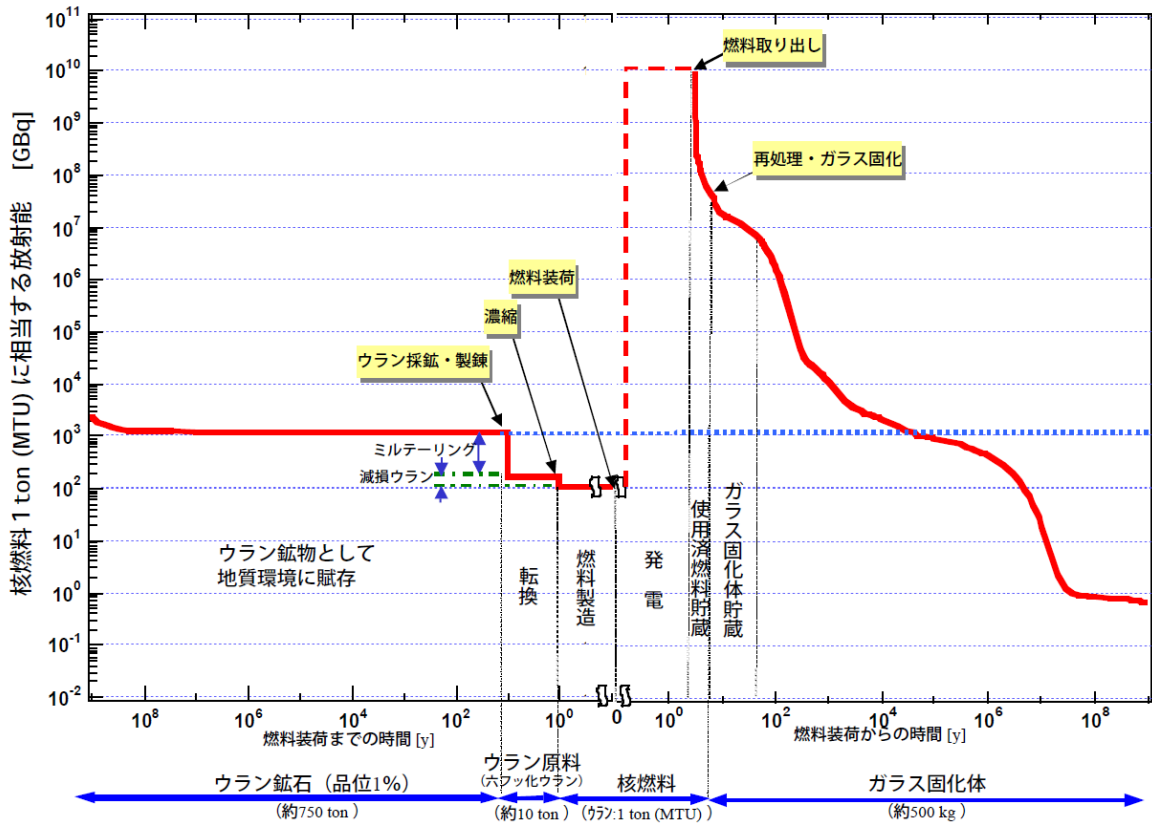


図 4-8 HLW 放射性廃棄物 (ガラス固化体) の放射能の推移<sup>16)</sup>

現状では、支保工および後述するプラグ、グラウトといったコンクリート材料に関しては、セメントから地下水を介し浸出する高アルカリ性間隙水による人工バリア、天然バリアの処分システム構成要素部材の変質とコンクリート構造物の劣化による水みち化<sup>18)</sup>が想定されている。高アルカリ影響に対しては pH が 11 以下の低アルカリ性セメントを使用することが考えられ、コンクリートの劣化については、セメント水和物の溶脱が要因として挙げられる。しかし、低アルカリ性セメントを用いたコンクリートの溶脱挙動は十分に解明されていない<sup>19)</sup>。

また、後述する覆工、セグメントも含め、セメント単味で建設材料として使用されることは無く、骨材や減水剤や急結剤等の各種混和剤、繊維等の補強材等が建設・作業中における坑道の要求性能を満足するために用いられる。特に、骨材はコンクリート容積の 7 割程度と大部分を占め、天然の岩石を用いていることから、母岩である岩盤との相互作用による変質と同様の現象がコンクリート内部において比較的早い段階で生ずると考えられる。このような現象は、閉鎖後のコン



クリートの挙動に大きな影響を与えることから、今後、岩盤に対するアルカリ影響等の知見を参考に検討を行い、骨材の規格等へ反映していく必要があると考えられる。さらに、混和剤は、溶出することによって岩盤等への核種収着性に有意な影響を及ぼす可能性があり、今後、定量的な検討が望まれる。

(2) ロックボルト定着材

① ロックボルトの機能と施工方法

(a) ロックボルトの機能

ロックボルトは、吹付けコンクリートと並ぶ NATM における重要な支保部材であり、その効果の概念については表 4-6 のように示されている<sup>20)</sup>。この中で、先に述べた NATM における支保設計では、主に③内圧効果および④アーチ形成効果が期待される。これらは、岩盤を力学的に連続体として考慮した場合の効果であるが、①縫付け効果や⑤地山改良効果については、岩盤の割れ目やすべりなどの不連続体としての挙動に対しての効果である。

表 4-6 ロックボルトの作用効果の概念 (土木学会 1996<sup>20)</sup>を参考に作成)

効果	効果の考え方	概念図
①縫付け効果(吊下げ効果)	発破などで緩んだ岩塊を緩んでいない地山に固定し、落下を防止しようとするもので、最も単純な効果である。割れ目の発達した地山において、吹付けコンクリートと併用すると効果がある。	
②はり形成効果	トンネル周辺の層を成している地山は、層理面で分離して重ねばりとして挙動するが、ロックボルトによって層間を締め付けると、層理面でのせん断応力の伝達が可能となり、合成ばりとして挙動させる効果が生じる。	
③内圧効果	ロックボルトの引張力に相当する力が内圧としてトンネル壁面に作用する。これにより、トンネル近傍の地山を三軸応力状態に保つことが可能となる。これは、圧縮試験時における拘束圧の増大と同じような意味を持ち、地山の強度あるいは耐荷能力の低下を防ぐ作用をする。また、これにより耐荷能力の高まったトンネル周辺の地山は、一様に変形することによって地山アーチを形成する。	
④地山改良効果	地山内にロックボルトが挿入されていると、地山自身の有するせん断抵抗力が増大し、地山が降伏した後も残留強度が増す。このような現象は、ロックボルトにより地山の強度特性が改善されたということになる。	

ロックボルトがこのような効果を十分に発揮させるためには、岩盤内に確実に定着させる必要がある。定着方式としては、ロックボルト全長にわたり急結性のセメントモルタルや樹脂などで定着させる全面定着方式、ロックボルト自体を直接岩盤へ密着させ摩擦力により定着させる摩擦定着方式、ロックボルト先端を摩擦や急結性の定着材で岩盤内へ定着させた後、セメントミルクなどを注入する併用方式がある。なお、ロックボルトの作用効果を長期にわたり期待する場合には、鋼材の腐食を抑制する必要があるため、耐食性に関する検討が必要とされている<sup>20)</sup>。鋼材の腐食抑制の観点からは、ロックボルト全長にわたり、定着材が充てんされているほうが望ましく、全面定着方式や併用方式が有利であると考えられる。

### (b) ロックボルトの施工

ロックボルトの施工は、ドリフターあるいはレグドリルなどの穿孔機械によりトンネル壁面を穿孔し、セメントモルタルなどの定着材を注入後、ロックボルトを挿入し、ロックボルトが岩盤内へ定着した後、プレートとナットによりトンネル壁面にロックボルトを固定することにより行われる。これら一連の作業が掘削サイクルの中で行われるため定着材には、早期の定着力（強度）と孔内への確実な充てん性が要求される。ロックボルトの定着力は、ロックボルトと定着材との付着性、地山と定着材との付着性からなるが、後者については、地山強度などの地質条件の影響を受けるため、所定の定着力が得られない場合には、より付着性の高い定着材を採用するか穿孔径を大きくして付着面積を大きくするなどの対策が必要となる。

定着材としては、一般にセメントモルタル、セメントミルク、樹脂（レジンなど）の使用実績が多く、セメントモルタルでは、予め工場にて早強セメント、細砂、添加材などを混合したプレミックスタイプのもの、樹脂系では、カプセル状に成型された定着材をロックボルト孔内に挿入しておき、ロックボルトの先端で定着材を攪拌することにより硬化させるものがある。

### ② 作業期間中の耐久性における留意点

耐久性については、先に述べた鋼材の腐食抑制、定着材の長期強度などが挙げられる。吹付けコンクリートと同様、ロックボルトの耐久性について検討された例は少ない。ただし、ロックボルトをセメント系材料に埋設された鉄筋と捉えれば、鉄筋コンクリートの耐久性に関する知見もある程度適用することが可能と考えられる。

### ③ 閉鎖後における留意点

閉鎖後については、支保工としての機能は要求されないが、セメント系材料を使用する場合は、吹付けコンクリートと同様のアルカリ影響、樹脂系の場合は有機物であることから、核種移行遅延性能に有意な影響を与えないことなどを確認しておく必要がある。

## (3) 覆工コンクリート

### ① 覆工コンクリートの機能と施工方法

#### (a) 覆工コンクリートの機能

覆工コンクリートは、吹付けコンクリート同様、空洞安定のための支保部材として機能し、立坑のショートステップ工法や地山強度比（岩盤強度／初期地圧）が低く吹付けコンクリートのみ



では支保が成立しない場合の二重支保構造<sup>2)</sup>等に用いられる。また、空洞の安定性の観点からは必要とされないが安全性や作業中の作業性の観点から設置される場合もある（表 4-7）。

表 4-7 各坑道と予想される支保工（電力中央研究所，電気事業連合会 1999<sup>17)</sup>を参考に作成）

岩種	坑道	予想される支保工
硬岩系岩盤	アクセス坑道(立坑)	力学的安定性から必要となる支保工の規模は軽微な程度と考えられるが、安全面から30cm程度までの覆工コンクリートが必要
	連絡坑道	力学安定性からは無支保か吹付けコンクリートのみの軽微な支保工が想定されるが、安全面から30cm程度までの覆工コンクリートが必要
	処分坑道	原則的に無支保
	処分孔	無支保
軟岩系岩盤	アクセス坑道(立坑)	深度の増加とともに支保工の規模は大きくなり、深部では大きな支保工厚が必要
	連絡坑道	NATM工法による場合、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工に加え覆工コンクリートによる規模の大きな支保工が必要
	処分坑道	TBM掘削等、円形断面の場合、セグメントタイプの支保工が合理的
	処分孔	原則的に無支保

支保設計上は、吹付けコンクリートと同様、基本的には軸圧縮抵抗部材として機能するため、無筋コンクリート構造が採られる。従って、覆工コンクリートに必要とされる力学的性能は、吹付けコンクリートと同様である。ただし、施工方法としては、一般的にセントルと呼ばれる移動式鋼製型枠内に場所打ちコンクリートとして打設し、ある一定期間養生後、脱型するため、吹付けコンクリートほどの初期強度は必要とされない。

(b) 覆工コンクリートの配合設計と施工

施工については製造、運搬、ポンプ圧送までは、吹付けコンクリートとほぼ同様であるが、覆工コンクリートの場合には、型枠内への打設、締固め、養生が必要となり、ポンパビリティーのほか、所定のワーカビリティーが必要となる。

配合設計においても、吹付けコンクリートと同様な点に留意する必要があるが、これに加え、自己収縮や乾燥収縮等の体積変化（寸法安定性）、セメントの水和反応時の水熱が覆工コンクリートにひび割れを生じさせる恐れがあることから、これらについても配慮した配合とする必要がある。

② 作業期間中の耐久性における留意点および閉鎖後における留意点

作業中の耐久性や閉鎖後に要求される機能は、吹付けコンクリートとほぼ同等であると考えられる。

(4) セグメント

① セグメントの機能と特徴

横置き方式では、Tunnel Boring Machine（以下、TBM とする）による掘削が想定されているが、岩盤が低強度の場合、TBM 掘進時の反力をグリッパーのみで確保できない場合を想定し、セグメントにより反力を取ることとしている<sup>4)</sup>。従って、この場合、工法としてはシールド工法となる。シールド工法は、これまで地下鉄や共同溝等未固結の地山での機械によるトンネル掘削

工法として、採用実績の多い工法である。セグメントは、工場にて材料の計量、練り混ぜ、打設、養生までが行われ、建設現場では、組立てのみが行われる。このように、硬化後のコンクリートの品質を大きく左右する養生までの工程が管理された工場内で行われるため、建設現場にてすべての工程が実施される吹付けコンクリートや覆工コンクリート等よりも均一な品質を得やすい特徴がある。また、養生についても、その期間や高温養生や蒸気養生等、自由な方法を選択することが可能であり、コンクリートの高強度化も比較的容易である。HLW 地層処分の事業化技術報告書<sup>17)</sup>では、堆積岩系軟岩の条件で支保設計を覆工コンクリートで行うと、内径が 5m の坑道に対し、覆工厚さが 1m 程度となり現実的でないことから、厚さ 150mm のセグメント（高強度コンクリート使用）と 100mm の裏込めモルタル（岩盤とセグメント間の充てん材）にて対応することとしている。

セグメントに要求される機能は、吹付けコンクリートや覆工コンクリートと同様に空洞安定性を確保することにある。従来、セグメントの設計は軟弱地盤等、地山の支持力を期待しない条件での設計が多いため、掘削による緩み荷重をセグメントが支持する考え方を採っており、NATM への適用事例は少ないと推測される。NATM における支保工は、掘削後速やかに設置され、地山へ適切な支保内圧を与えることが要求されることから、このような条件を満たすセグメントの組立てならびにセグメントと岩盤の間の充てん（裏込め）方法等について今後検討し、NATM の成立性について確認する必要がある。

## ② 操業期間中の耐久性における留意点および閉鎖後における留意点

操業中の耐久性や閉鎖後に要求される機能としては、吹付けコンクリート、覆工コンクリートと同様である。ただし、セグメントのみでなく、裏込めの充てん材についても同様の留意点および検討事項がある。

### (5) グラウト

#### ① グラウトの機能

従来、グラウトは岩盤の亀裂帯等の高透水ゾーンを改良し、地下水が構造物へ与える悪影響の低減や構造物の機能を確保する目的で実施されている。例えば、ダムにおいては、基礎岩盤の透水性を改良して貯水機能を確保するとともに、ダム堤体の安定性を損なう要因となる揚圧力の低減や基礎岩盤の変形特性の改良が主な目的とされる。一方、山岳トンネルにおいては、大量湧水による掘削作業の中断や、高圧湧水により周辺岩盤の力学安定性が損なわれる恐れのある場合、グラウトが行われる。また、近年では、地上環境への配慮から、トンネル掘削による地下水位を抑制するウォータータイトトンネルが建設されるようになってきており、これにおいてもグラウトが重要となっている。

HLW 処分施設の坑道においては、上記に加え、人工バリアである緩衝材の設置に際し、その品質を確保するため、グラウトが必要となる可能性が高いと考えられる。特に、この場合には従来よりもトンネルへの湧水量を厳しく規制されることが想定される。また、湧水抑制機能は建設・操業の期間にわたって必要とされる。

グラウトの設計では、浸透流解析等により目標とする岩盤の透水係数ならびに改良範囲を定め、その施工ではこれらを満たすように注入する必要がある。従って、グラウト材料には、岩盤亀裂

や破碎帯等に対する充てん性・浸透性が求められる。これらへ影響を与える要因としては、注入材の粘性、無効注入等を抑制する材料分離抵抗性ととともに、地下深部では高水压下の湧水が想定されることから、高圧注入に関する施工性も重要視される。

## ② 作業期間中の耐久性における留意点

作業中は、建設時の止水性を保持する機能が要求される。グラウトは岩盤の亀裂内部に浸透し、外気と接触しないため、吹付けや覆工等で想定した経年劣化は生じにくいと考えられるが、地下水とは常時接触していると考えられる。このため、地下水によるグラウト材料の変質について検討しておく必要があると思われる。

## ③ 閉鎖後における留意点

閉鎖後については、吹付け・覆工と同様に、人工バリアや天然バリアのシステム構成要素材へのアルカリ影響や、グラウト材料の変質（溶脱）挙動について把握し、安全性へ有意な影響を与えないことを確認しておくことが必要である。

## (6) 力学プラグ（強度プラグ）

### ① 力学プラグの機能

コンクリートプラグは、処分坑道の両端部に設置され、縦置き方式の場合はベントナイトを混合した埋め戻し材の移動・膨出、横置き方式の場合は緩衝材の移動・膨出を作業期間内において抑制する目的で設置される。埋め戻し材あるいは緩衝材の膨潤応力は、プラグを介して岩盤へスラスト力として伝達される。従って、プラグは膨潤応力に対し、岩盤に反力をとりながらせん断部材として機能すると考えられており、第2次取りまとめ<sup>4)</sup>では、土木学会コンクリート標準示方書の押し抜きせん断耐力式を用いてプラグの長さについての検討を行っている。また、プラグの形状は膨潤応力を効率よく岩盤へ伝達できるとともに充てん性等の施工性も考慮する必要がある。坑道径から考えるとプラグの寸法は数m規模となることから、マスコンクリートとして取り扱われる。マスコンクリートでは、水和熱によって温度ひび割れが発生することから、これについて配慮した材料および配合が選定されなければならない。加えて、型枠内への充てん性、硬化時の自己収縮が小さいことが求められる。

### ② 閉鎖後における留意点

閉鎖後については、吹付けコンクリート等と同様の機能が要求される。

## (7) 各セメント系材料の要求機能および留意点の整理

表4-8に以上の(1)～(6)に挙げた各部材に使用されるセメント系材料の要求機能および留意点について整理したものを示す。ここでは、各部位ごとに、性能、要求期間および留意点をまとめている。

表4-8より、HLW 処分施設では、建設・作業中の留意点は、従来の土木構造物と大きな違いはないと考えられる。一方、閉鎖後の長期間に対しては、人工バリアおよび天然バリアのシステム構成要素部材へのアルカリ影響やセメント系材料自体の変質を適切に評価し、安全評価へ反映あるいは有意な影響を与えないことを確認することが肝要と思われる。また、HLW 処分施設で

は、セメント系材料にバリア性能は期待しておらず、安全評価に対する不確実性を増大させる可能性があるため、空洞の安定性確保を最低限の要件として極力セメント系材料の使用量を低減させる研究開発を進めることも必要と考えられる。

This is a blank page.

表 4-8 HLW 処分施設にセメント系材料を使用する場合の留意点

部位	性能	主な要求期間	留意点
ロックボルト定着材	力学的安定性	建設～操業	①早期強度発現⇒混和剤, 急結剤が必要 ②ロックボルトと定着材間の空隙形成
	施工性	建設	①ロックボルトと定着材間への充てん
	化学的安定性	操業～閉鎖後	①ロックボルトの腐食, 長期強度 ②セメントのアルカリ溶出による周辺バリアへの影響と溶脱による物質移行経路形成 ③混和剤, 急結剤の溶出による核種収着性への影響
吹付けコンクリート	力学的安定性	建設～操業	①早期強度発現⇒混和剤, 急結剤が必要 ②変形特性評価 (地山特性に合わせて) ③セメント系材料の収縮による空洞形成
	化学的安定性	操業～閉鎖後	①耐久性 (繊維補強材の腐食, 中性化, アルカリ骨材反応) ②セメントのアルカリ溶出による周辺バリアへの影響と溶脱による物質移行経路形成 ③繊維補強材の影響 (有機繊維の変質や鋼繊維の腐食などによる物質経路形成) ④混和剤, 急結剤の溶出による核種収着性への影響
	施工性	建設	①ポンプ圧送 ②はね返り ③粉じん ④スランプロス
覆工コンクリート	力学的安定性	建設～操業	①強度発現⇒混和剤が必要 ②水みちの形成 ③変形 (覆工に力学性能を期待する場合) ④初期欠陥ひび割れの抑制 (自己収縮, 乾燥収縮, 水和熱)
	化学的安定性	操業～閉鎖後	①セメント溶脱による周辺バリアへの影響と溶脱によるセメントの水みち形成による物質移行経路形成 ②耐久性 (中性化, 塩害, アルカリ骨材反応) ③鉄筋の影響 (鉄筋の腐食による物質経路形成) ④混和剤の溶出による核種収着性への影響
	施工性	建設	①スランプロス ②ポンプ圧送
セグメント	力学的安定性	建設～操業	①NATM 工法における支保部材としての成立性
	化学的安定性	操業～閉鎖後	①セメントのアルカリ溶出による周辺バリアへの影響と溶脱による物質移行経路形成 ②耐久性 (中性化, 塩害, アルカリ骨材反応) ③混和剤の溶出による核種収着性への影響
	施工性	建設	①セグメント組み立て ②裏込め材とその施工方法
グラウト	施工性	建設	①亀裂充てん ②高圧注入に対する抵抗 ③注入材の粘性 ④材料分離
	化学的安定性	操業～閉鎖後	①セメントのアルカリ溶出による周辺バリアへの影響と溶脱による物質移行経路形成 ②地下水によるグラウト材の変質 ③混和剤溶出による核種収着性への影響
	力学的安定性	建設	①早期強度発現⇒混和剤が必要 ②収縮による空隙形成
力学プラグ	力学的安定性	建設～操業	①ベントナイト膨潤圧に対するせん断耐力 ②初期欠陥ひび割れ (自己収縮, 乾燥収縮, 水和熱) ③水みちの形成
	化学的安定性	操業～閉鎖後	①セメント溶脱による周辺バリアへの影響と溶脱によるセメントの水みち形成による物質移行経路の形成 ②耐久性 (中性化, 塩害, アルカリ骨材反応) ③混和剤の溶出による核種収着性への影響
	施工性	操業	①ポンプ圧送 ②型枠への充てん

## 5. 地質環境条件，廃棄体条件の抽出・整理

### 5.1 地質環境条件（天然バリア）

セメント系材料による人工バリアや天然バリアのシステム構成要素部材へのアルカリ影響やセメント系材料自体の長期変質挙動について検討するためには，材料がおかれる環境を整理しておくことが重要と考えられる。ここでは，“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤－平成17年取りまとめ－ 一分冊2 工学技術の開発”<sup>14)</sup>（以下，H17取りまとめとする）にて検討された，「設計手法の適用性確認」を参考に地質環境条件を整理することとした。

H17取りまとめに提示されている処分場の全体設計フローは，図5-1に示すとおりであるが，セメント系材料は人工バリアとして考慮されていないため，設計上，フィードバックがかからないこととなっている。

しかし，埋設後の長期健全性評価においては，支保工などに使われるセメント系材料の変質などの長期挙動を適切に反映していく必要がある。ここで，セメント系材料の長期挙動とは，人工・天然バリアへのアルカリ影響やセメント系材料の地下水への溶出など表4-8に示した力学的・化学的安定性などによる挙動のことである。

これら長期挙動の評価に際しては，セメント系材料のおかれる環境をある程度想定しておくことが重要であり，以下では幌延の深地層研究施設（URL: [Underground research laboratory](#)）における地質環境条件を例にとり，岩盤の各種物性，水理条件，地下水質，廃棄体の発熱特性について整理した。



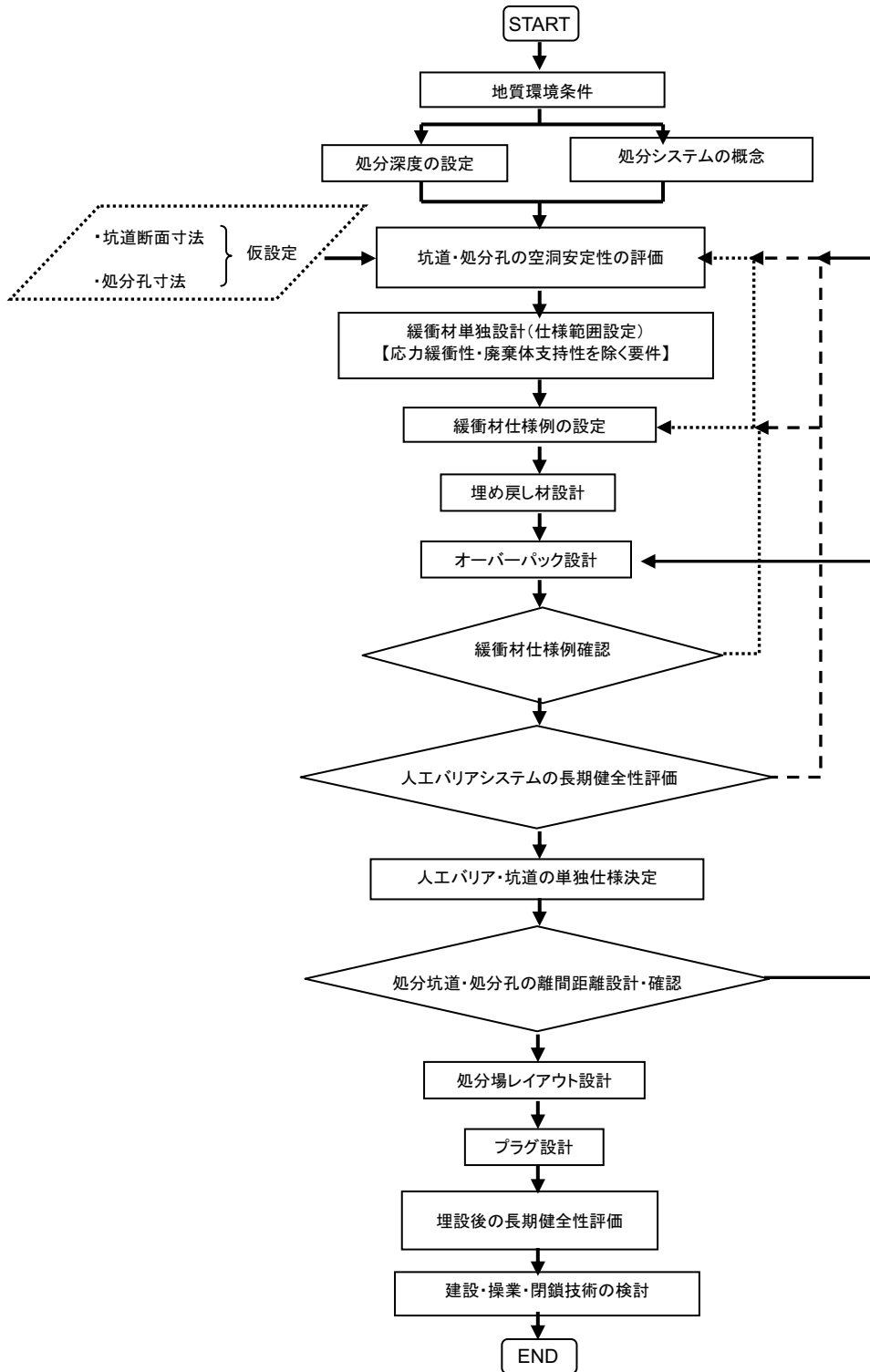


図 5-1 処分場の全体設計フロー<sup>14)</sup>

5.1.1 岩盤の各種物性

H17 取りまとめでは、堆積岩系岩盤における適用事例として表 5-1 に示す力学物性値を提示している。同表は、地上からのボーリング調査などにより得られた試験結果を基に設計用値として整理されたものである。このため、実際の処分環境を想定して直接的に表したものでないことに留意する必要がある。実際の処分環境に近い物性値を得るためには、坑道掘削等、調査の段階に応じて、得られる情報も併せて考慮する必要があると考えられる。

表 5-1 堆積岩系岩盤での設計用力学物性値<sup>14)</sup>

深度 [m]	岩盤等級	弾性係数 E[MPa]	一軸圧縮強度 $\sigma_c$ [MPa]	ポアソン比 $\nu$ [-]	ピーク強度		残留強度		引張強度 [MPa]
					粘着力 c[MPa]	内部摩擦角 $\phi$ [°]	粘着力 c[MPa]	内部摩擦角 $\phi$ [°]	
450	CM-H, Hr 無	2,500	16.3	0.186	5.2	25.0	1.27	29.8	1.63

また、力学環境としては、岩盤物性の他に初期応力（地圧）が挙げられ、この設定例を表 5-2 に示す。これらの値は、2つのボーリング孔において実施された水圧破砕法による初期応力の測定結果から得られた値を基にこれらの平均値から深度 450m における初期応力を設定したものである。

表 5-2 初期応力の設定例<sup>14)</sup>

	ボーリング 深度 [m]	$S_{max} / S_v$	$S_{min} / S_v$		ボーリング 深度 [m]	$S_{max} / S_v$	$S_{min} / S_v$
HDB-6 孔	223.0	1.21	0.91	HDB-6 孔	529.5	1.59	1.08
	256.0	1.10	0.87		539.5	1.01	0.76
	338.1	1.56	1.06		576.0	1.47	1.00
	351.0	1.71	1.13	HDB-3 孔	263.5	1.02	0.80
	416.0	0.85	0.72		392.5	1.20	0.90
設定値 (上記測定 値の平均)	$S_v : S_{max} : S_{min} = 1 : 1.3 : 0.9$ , 水平面内応力比 : 1.4, $S_v = \text{土被り圧}$ , よって, $S_v(450) = 7.21 \text{MPa}$						

次に、熱特性を表 5-3 に示す。これらの値はボーリング孔等から採取した試料を用いた室内試験から結果から設定されている。

表 5-3 岩盤の熱特性の設定値<sup>14)</sup>

地温勾配	・地温勾配：4.7°C/100m ・地温：28.3°C（450m）
熱伝導率	1.33 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> （25°Cでの相関式により算定）
比熱	1.56 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> （30°Cでの相関式により算定）
線膨張係数	13.41 × 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> （40°Cでの相関式により算定）

また、岩盤の透水係数 (k) は、深度依存性を考慮した下式によって求められ、深度 450m 付近では  $k=2 \times 10^{-9} \text{ms}^{-1}$  程度となっている。

$$\log(k) = -0.0105z - 3.9118 \quad (1)$$

ここに、k：透水係数(m/s)，z：地表面からの深度(m)である。

### 5.1.2 水理条件

水理条件としては、動水勾配が挙げられ、図 5-2 に示す深度と動水勾配の関係が得られており、深度 450m 付近では 0.01 程度となっている。なお、図 5-2 は、複数のボーリング孔からの調査結果を基にした地下水流動解析結果から求めたものである。

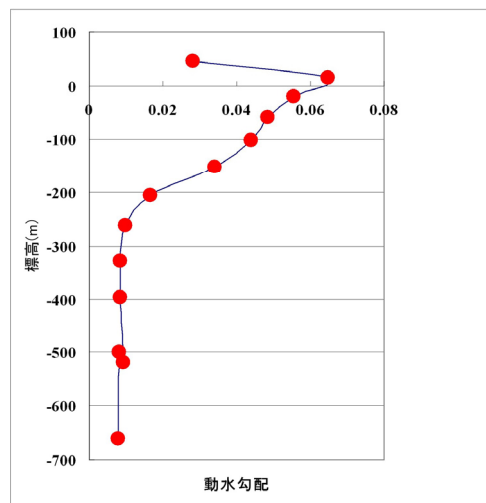


図 5-2 検討対象地点の深度と動水勾配の関係<sup>14)</sup>

### 5.1.3 地下水質

深度 450m 付近の地下水質の推定値を表 5-4 に示すが、表 5-4 の値は地層中の地下水とコア抽出水のデータを基に地球化学解析コードを用いて求めたものである。その理由は、コ

ア抽出水では抽出過程で大気との接触により、コア中の鉱物の溶解・沈殿などの影響を受けている可能性があるためである。

表 5-4 地下水質の推定値<sup>14)</sup>

熱力学データベース	JNC-TDB 011213c2. tdb		溶存化学種	[mol kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]
温度 [°C]	25		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2.989E-02	1823.29
pH	6.752		CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2.037E-05	1.22
pe	-2.804		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4.375E-06	0.42
Eh [mV]	-166		N <sub>2</sub> <sup>2)</sup>	-	-
イオン強度	2.579E-01		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	7.761E-03	139.70
電荷バランス [eq] <sup>1)</sup>	6.762E-15		Fe <sup>2+</sup>	1.523E-05	0.85
元素名	[mol kg <sup>-1</sup> ]	[mg kg <sup>-1</sup> ]	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> (aq)	1.139E-03	109.34
Na	2.279E-01	5239.42	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5.060E-07	0.04
K	2.077E-03	81.21	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	7.623E-12	0.00
Mg	5.784E-03	140.61			
Cl	2.202E-01	7806.09	飽和指数		
Br	5.632E-04	45.00	方解石		0.00
Ca	2.093E-03	83.93	非晶質シリカ		-0.20
C	4.098E-02	491.76	菱鉄鉱		0.00
S	6.250E-06	0.20	黄鉄鉱		0.00
F	1.053E-05	0.20			
Fe	1.524E-05	0.85	1) 電荷バランスはClで調整した		
Si	1.141E-03	32.05	2) Nに関しては幌延実測地下水中の主要成分は		
N	7.777E-03	108.88	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> であるため、計算にあたり溶存化学種として		
P	1.266E-06	0.04	N <sub>2</sub> は考慮していない。		
Sr	2.967E-05	2.60			
Mn	3.640E-07	0.02			
Al	3.706E-07	0.01			

表 5-4 より、深度 450m 付近の地下水には、Na、Cl が多く含まれることが特徴的である。

5.1.1～5.1.3 に示した地質環境特性は、セメント系材料の力学的安定性や化学的安定性等を考慮する場合に重要となると考えられる。特に、セメント系材料の寸法や力学特性の設定、あるいは熱や周辺イオンによるセメント系材料の変質を考慮する場合、処分施設が設置される地質環境特性を適切に評価することが重要である。

## 5.2 廃棄体条件

廃棄物からの熱影響については、第2次取りまとめ<sup>4)</sup>において廃棄体の処分ピッチを設定する際に検討されており、以下にその結果を示す。

- ① 緩衝材の内側（オーバーパックもしくはオーバーパック-緩衝材間の隙間と緩衝材が接する部分）では、人工バリア定置後約10～20年で最高温度（100℃程度）に到達し、その後温度が低下する。
- ② 緩衝材の外側（緩衝材と岩盤もしくは緩衝材-岩盤間の隙間が接する部分、また坑道横置き方式において隣接する人工バリアと接する部分）では、人工バリア定置後約20～40年で52℃程度まで（軟岩縦置き定置方式の場合）上昇し、その後温度が低下する。
- ③ 廃棄体定置後約1,000年で人工バリア内の温度分布は一定になり、その時の温度は、処分深度1,000mの硬岩系岩盤では約60℃、軟岩系岩盤縦置き方式では約40℃、軟岩系岩盤横置き方式では約50℃となった。したがって、廃棄体定置後約1,000年以降の人工バリアの温度は、初期の地温が支配的であるといえる。
- ④ 廃棄体定置後約10,000年で人工バリアの温度は初期地温に戻る。

セメント系材料として支保工を想定した場合、その位置は緩衝材外側となり、②で示した環境に近くなると考えられ、廃棄物からの発熱の影響による変質を考慮する必要があると考えられる。

ただし、上記検討では、解析モデルに支保工等のセメント系材料を考慮していないことから、今後、温度条件に関して詳細に検討するためには、セメント系材料の熱伝導特性等を考慮する必要があると考えられる。

## 6. セメント系材料の適用部位，要求機能および求められる性能の整理

### 6.1 HLW 処分施設のセメント系材料に求められる性能の抽出

#### 6.1.1 セメント系材料の状態変化の設定および検討項目の抽出方法

本章では，前章までの結果に基づき，HLW 処分施設に使用されるセメント系材料の性能の抽出を行った。

まず，5章で整理した地質・環境条件に建設された場合の，HLW 処分施設に供するセメント系材料の状態変化を適切に評価するためには，施工から埋め戻し，地下水冠水までの間でセメント系材料に生じる現象を，処分環境条件を踏まえながら検討・設定した。

この場合の状態変化とは，以下のように定義した。

「状態変化とは，HLW 処分施設の建設・操業・閉鎖の各段階において，様々な要因で生じる環境条件の変化を時系列的に整理したもの」

状態変化の検討・設定の目的は，環境条件および HLW 処分施設の施工を踏まえて，施設を構成するセメント系材料を対象として，

- ① セメント系材料に生じる現象を，既往の知見に基づいて抽出・整理し，
- ② 現状の技術レベルに基づいて，極力現実に近いと思われる HLW 処分施設の長期の状態を推定し，
- ③ その結果に基づいて，周辺状況を考慮した求められる性能の抽出を行う。

こととした。

また，求められる性能の抽出は，(a)建設段階，(b)操業段階，(c)閉鎖後（地下水冠水後）に大きく分類し行った。抽出に当たっては，先の表 4-8 で整理した「HLW 処分施設を構成するセメント系材料の部位，要求機能および留意点」で抽出された留意点を勘案した。

施設建設の状態を考慮した場合に求められる性能について整理したものを表 6-1 に示す。また，以下に各段階における求められる性能の抽出過程とその結果に関してそれぞれ示す。

#### 6.1.2 建設段階

建設段階における施設の状態においては，環境条件が初期で設定した状態とほぼ同等と考えられ，以下に示すように，各部材にセメント系材料の留意点から求められる性能の抽出を行った。

力学的安定性に関しては，何れの部材についても強度発現が留意点として挙げられるが，求められる強度特性に関しては，ロックボルト定着材の場合は付着強度，吹付けコンクリートと覆工コンクリートの場合は初期強度や圧縮強度，グラウトの場合は初期せん断強度や圧縮強度となる。また，何れの部材も収縮による空隙形成や収縮によるひび割れが留意点として挙げられ，性能として低収縮性が求められる。さらに覆工コンクリートにおいては低透水性や水和熱によるひび割れの抑制が留意点として挙げられ，性能として水密性や水和熱特性が求められる。



施工性に関しては、部材ごとに留意点も異なり、ロックボルト定着材の場合は、ロックボルトと定着材間への充てんが留意点として挙げられ、性能として充てん性、圧送性、急結性が求められる。吹付けコンクリートの場合は、ポンプ圧送、はね返り、粉じん、スランプロスが留意点として挙げられ、性能として圧送性、急結性、はね返り抵抗性、粉じん飛散抵抗性などが求められる。覆工コンクリートの場合は、スランプロスやポンプ圧送が留意点として挙げられ、性能としては、圧送性、充てん性、材料分離抵抗性が求められる。グラウトの場合は、亀裂充てん性、高圧注入に対する抵抗性、注入材の粘性（レオロジー特性）、材料分離（ブリージングなど）が留意点として挙げられ、性能として凝結性、高圧注入適応性、亀裂浸透性、材料分離抵抗性が求められる。

化学的安定性に関しては、建設段階の場合、環境から重大な影響を受ける可能性は低いと考えられるが、一般の土木構造物で生じる現象を考慮し、中性化、塩化物イオンの浸透、アルカリ骨材反応に対する抵抗性が求められる。また、ロックボルトや覆工コンクリート、吹付けコンクリートに鋼製材料を使用する場合には、鋼材の腐食が留意点として挙げられ、性能としては耐食性が求められる。さらに、地下水による変質やそれに伴う物質移行経路の形成、混和剤等の溶出が留意点として挙げられ、水和物や混和剤の安定性が求められる。

これらの性能については、使用材料・配合設計、施工法により、その発生を制御・抑制できる技術はあるものの、定量的な信頼性を確認する必要がある。定量的な信頼性を確保するためには、以下に示す検討が必要であると考えられる。

- ① 施工を考慮した要求機能への影響因子の発生予測解析
  - ・ 物性値の入手
  - ・ 境界条件の設定
  - ・ 解析方法と条件設定
- ② ①の結果を踏まえた設計・施工上での対策検討
- ③ ②の結果を踏まえた確認試験
  - ・ 現場施工確認試験
  - ・ 品質管理方法
- ④ ③の結果を踏まえた影響因子の定量化
- ⑤ 各種影響因子に対する対策（案）の立案と設計、施工上の検討項目の整理

### 6.1.3 操業段階

操業段階における施設の状態においては、廃棄体が設置されることによる熱影響、大気や地下水から供給される物質の影響を考慮し、水和物の変化や骨材の変化、鋼材の腐食による施設の状態変化を考慮した上で、以下に示すように、各部材にセメント系材料の留意点からの求められる性能の抽出を行った。

力学的安定性に関しては、各部材に建設段階と同様に強度特性、低収縮性および骨材安定性などの保持が求められる。

化学的安定性に関しては、施工後のから埋戻し終了までの間に生じる劣化現象等に関する留意点が挙げられ、これらに対する性能が求められる。ただし、最終的には施設へのアクセスが困難となるため、変質に対する抵抗性および変質により生ずる生成物（例えば、中性化では炭酸カルシウム、アルカリ骨材反応であれば、反応性生物等）の組成等を十分に把握し、閉鎖後の変質に反映する必要がある。また、環境条件を考慮すると、廃棄体からの熱影響や地下水に対する水和物の化学的安定性を評価する必要があると考えられる。

一方、坑道埋め戻し段階においては、力学プラグの設置が必要となる。力学安定性に関しては、ベントナイトの膨潤圧に対するせん断耐力、収縮や水和熱による初期欠陥ひび割れ、水みちの形成が留意点として挙げられ、性能として強度特性、水和熱特性、低収縮性、水密性が求められる。また、施工性に関しては、ポンプ圧送や型枠への充てんが留意点として挙げられ、性能として圧送性や充てん性が求められる。さらに、化学的安定性に関しては、他の部材と同様、中性化、塩化物イオンの浸透、アルカリ骨材反応に対する抵抗性、水和物の安定性、骨材安定性が求められる。

#### 6.1.4 閉鎖後(地下水冠水後)

処分場の閉鎖後における施設の状態においては、地下水から供給される物質の影響、セメントの成分溶出によるバリアへの影響、および溶脱に伴う水みちの形成や強度の低下の影響による施設の状態変化を考慮することが考えられる。

力学的安定性に関しては、既に坑道が埋め戻されているため、強度などは要求されないが、化学的安定性に関しては、周辺環境へのアルカリ影響を軽減するため、低アルカリ性に加え、Caなどの成分溶出による水みちの形成などを評価できるようにしておく必要がある。

以上の現象は、埋め戻し後、HLW 処分施設内に地下水が除々に浸入することによって生じると考えられ、長期的な変質挙動については、HLW 処分施設内への地下水浸透に関して整理し、セメント系材料に生じる変質（特に高アルカリ性成分の溶出）の開始時期や影響度合いを整理することで、時系列的に設定できると考えられる。したがって、地下水の浸透解析等に基づいて、変質シナリオを整備することが合理的と考えられる。

## 6.2 HLW 処分施設に供するセメント系材料の挙動

6.1 の検討では、第 2 次取りまとめ<sup>4)</sup>や H17 取りまとめ<sup>14)</sup>で得られた知見を参考に、処分施設の建設・操業・閉鎖という各段階を追って、セメント系材料に求められる性能を抽出・整理した。

先に示したように、HLW 処分施設に供されるセメント系材料には、バリア機能は設計上、期待されず、坑道の空洞安定性等、操業期間までの機能が設計要件となる。これは、セメント系材料にバリア機能を期待している LLW の余裕深度処分施設と大きく異なる点である。ただし、閉鎖後においては、6.1 で抽出・整理した求められる性能を適切に評価し、必要に

応じて長期性能評価へ反映することや、セメント系材料が、人工および天然バリアへ与える影響を低減させることが重要となる。

セメント系材料の長期的な変質の検討においては、変質が発生した時の HLW 処分施設の「状態」（例えば、初期欠陥の場合：ひび割れの幅、間隔、深さ）を精度良く把握し、その状態が閉鎖後の長期挙動に与える影響を評価することが重要となる。

そのためには、6.1 で示した施工時に発生することが考えられる影響因子、それらが発生した時の HLW 処分施設の「状態」、埋め戻し後に発生する影響因子、それらが発生した時の HLW 処分施設の「状態」を精度よく設定することが必要である。更に、長期的な状態変化に対して、コンクリートの配合設計や打設方法等、設計・施工時に対策を講ずることができる場合には、既往の技術で出来るだけ対応することが必要である。ただし、設計時に対策を講じることが困難な影響因子（例えば、長期的な環境条件およびその変化に依存する水和物の溶脱現象など）については、その進行程度を予測・評価する技術の開発が必要と考えられる。

表 6-1 HLW 処分施設に供するセメント系材料の要求機能およびそれを満たすために求められる性能の整理 (縦置き, 軟岩)

		0 ~ 70 年													
		建設期間				建設期間				作業期間				閉鎖後	
		坑道建設段階		処分孔掘削段階		処分孔掘削段階		処分孔掘削段階		処分坑道埋戻し段階		処分坑道埋戻し段階		閉鎖後	
状態図															
セメント系材料の適用部位		ロックボルト定着材	吹付け	覆工	グラウト	ロックボルト定着材	吹付け	覆工	グラウト	ロックボルト定着材	吹付け	覆工	グラウト	力学プラグ	吹付け, 覆工, ロックボルト定着材, 力学プラグ
要求機能		・ロックボルトの岩盤への定着	・支保内圧の発揮(リング効果, 岩盤の崩落抑制)	・空洞安定化(力学的機能を付与する場合) ・低透水性(力学的機能を付与しない場合)	・空洞周辺岩盤の低透水性	・ロックボルトの岩盤への定着の保持	・支保内圧効果の保持(リング効果, 岩盤の崩落抑制)	・空洞安定化の保持(力学的機能を付与する場合) ・低透水性の保持(力学的機能を付与しない場合)	・空洞周辺岩盤の低透水性の保持	・ロックボルトの岩盤への定着の保持	・支保内圧効果の保持(リング効果, 岩盤の崩落抑制)	・空洞安定化の保持(力学的機能を付与する場合) ・低透水性の保持(力学的機能を付与しない場合)	・空洞周辺岩盤の低透水性の保持	・周辺岩盤相当の透水性 ・埋戻し材の膨潤圧に対する耐力および周辺岩盤への荷重伝達	・セメント系材料の変質による安全性能への有意な影響の抑制
求められる性能	力学的安定性	①強度特性(付着強度) ②低収縮性(自己)	①強度特性(初期強度, 圧縮強度, 変形特性) ②低収縮性(自己・乾燥)	①強度特性(圧縮強度, 変形特性) ②水密性 ③水和熱特性 ④低収縮性(自己・乾燥)	①強度特性(せん断・圧縮強度) ②低収縮性	①強度特性の保持性 ②緻密性(ロックボルト耐腐食性)の保持性	①強度特性の保持性 ②低収縮性(乾燥)	①強度特性の保持性 ②水密性の保持性 ③低収縮性(乾燥)	①強度特性の保持性 ②低収縮性	①強度特性の保持性 ②緻密性(ロックボルト耐腐食性)の保持性	①強度特性の保持性 ②低収縮性(乾燥)	①強度特性の保持性 ②水密性の保持性 ③低収縮性(乾燥)	①強度特性の保持性 ②低収縮性	①強度特性(圧縮強度, ベントナイト膨潤圧) ②水和熱特性 ③低収縮性(自己・乾燥) ④水密性	
	施工性	①充てん性 ②圧送性 ③急結性	①圧送性 ②急結性 ③はね返り抵抗性 ④粉じん飛散抵抗性	①圧送性 ②充てん性 ③材料分離抵抗性	①凝結性(ゲルタイム) ②高圧注入適応性 ③亀裂浸透性(粒度, 粘性, 降伏値, 流動性) ④材料分離抵抗性									①圧送性 ②充てん性	
	化学的安定性					①塩化物イオンの耐浸透性, 中性化, アルカリ骨材反応に対する抵抗性 ②水和物の化学的安定性(地下水反応) ③骨材安定性(化学) ④鋼材の耐腐食性(鉄筋を用いる場合) ⑤混和剤等の安定性	①中和化, アルカリ骨材反応に対する抵抗性 ②水和物の化学的安定性(地下水反応) ③骨材安定性(化学) ④鋼材の耐腐食性(鉄筋を用いる場合) ⑤混和剤等の安定性	①水和物の化学的安定性(地下水反応) ②塩化物イオンの耐浸透性, 中性化, アルカリ骨材反応に対する抵抗性 ③鋼材の耐腐食性(鉄筋を用いる場合) ④骨材安定性(化学) ⑤混和剤等の安定性	①水和物の化学的安定性(地下水反応) ②混和剤等の安定性	①熱影響に対する抵抗性 ②塩化物イオンの耐浸透性, 中性化, アルカリ骨材反応に対する抵抗性 ③水和物の化学的安定性(地下水反応) ④骨材安定性(化学) ⑤鉄筋の耐腐食性(鉄筋を用いる場合) ⑥混和剤等の安定性	①熱影響に対する抵抗性 ②中和化, アルカリ骨材反応に対する抵抗性 ③水和物の化学的安定性(地下水反応) ④骨材安定性(化学) ⑤鉄筋の耐腐食性(鉄筋を用いる場合) ⑥混和剤等の安定性	①熱影響に対する抵抗性 ②水和物の化学的安定性(地下水反応) ③塩化物イオンの耐浸透性, 中性化, アルカリ骨材反応に対する抵抗性 ④鉄筋の耐腐食性(鉄筋を用いる場合) ⑤骨材安定性(化学) ⑥混和剤等の安定性	①熱影響に対する抵抗性 ②水和物の化学的安定性(地下水反応) ③混和剤等の安定性	①熱影響に対する抵抗性 ②塩化物イオンの耐浸透性, 中性化, アルカリ骨材反応に対する抵抗性 ③水和物の化学的安定性(地下水反応) ④骨材安定性(化学) ⑤混和剤等の安定性	①熱影響に対する抵抗性 ②低溶出性(Ca2+) ③低アルカリ性(天然バリア, 人工バリアへのアルカリ影響抑制) ④耐化学的安定性(相組成変遷考慮) ⑤混和剤等の安定性
環境条件	熱的環境	地温								廃棄体からの熱, 地温					
	水理環境	掘削による空洞近傍の水頭低下, 不飽和領域の発生												埋戻しによる, 空洞近傍水頭の上昇, 再飽和の開始	
	応力環境	地圧, 地下水圧				地圧, 地下水圧, 岩盤クリープ								地圧, 地下水圧, 岩盤クリープ, 埋戻し材の膨潤応力	
	化学環境	酸化性												酸化性→還元性へ移行	

## 7. まとめ

本報告では、HLW 処分施設でのセメント系材料の適用部位とその要求機能を明らかにし、適用する際に求められる性能を抽出した。そのために、LLW の余裕深度処分施設や TRU の地層処分施設における検討状況を勘案し、HLW 処分施設に生じるセメント系材料の状態変化を設定し、その適用部位、要求機能および求められる性能を時系列的に整理した。その結果、建設段階・操業段階においては、一般のコンクリート構造物を参考として性能の抽出が可能であり、使用材料・配合設計、施工法により、その発生を制御・抑制できる技術はあるものの、影響因子の特定やその対策などについて定量的な信頼性を向上させる必要があると考えられた。特に、操業段階で生じる劣化現象については、最終的には施設へのアクセスが困難となることを考慮して、その組成を十分に把握し、閉鎖後の変質に反映する必要がある。閉鎖後においては、施設への再冠水を考慮して、HLW 処分施設内への地下水浸透に関して整理し、セメント系材料に生じる変質（特に高アルカリ性成分の溶出）の開始時期や影響度合いを整理することで、時系列的に設定できると考えられた。

## 8. おわりに

HLW 処分施設に低アルカリ性セメントを適用する上でのセメント系材料に求められる性能を抽出・整理するために既往の文献調査を行った。

我が国では現在 LLW の余裕深度処分施設の設計・性能評価が日本原燃(株)によって進められており、一方で国による関連指針および学会を中心とした民間規格の作成や、セメント系材料を処分施設の設計・性能評価に供する場合の項目についても検討されている。このため、本報告書をまとめるにあたっては、周辺状況も勘案した。

「1. はじめに」に示したように低アルカリ性セメントは人工バリアおよび天然バリアに対する潜在的な高アルカリ影響を低減させることが期待されており、低アルカリ性セメントの実用化が可能となれば、HLW 処分だけでなく、LLW および TRU の廃棄物処分への貢献も期待できる。

今後は、本報告で整理した求められる性能に基づき、低アルカリ性セメントの適用性を試験等に基づいて検討する予定である。



## 参考文献

- 1) 大和田仁, 三原守弘, 黒木泰貴, 有本邦重: アルカリ溶液中での花崗岩の変質挙動, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2000-027, (2000)
- 2) Cama J., Ganor J., Ayora C., Lasaga A. : Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH 8.8, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64 2701-2717, (2000)
- 3) Sato T., Kuroda M., Yokoyama S., Tsutsui M., Fukushi K., Tanaka T., Nakayama S. : Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, (2004)
- 4) 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)
- 5) 京谷修: 放射性廃棄物処分施設の設計検討状況, 土木学会平成17年度全国大会研究討論会コンクリート構造物の長期耐久性評価, —1万年コンクリートへの挑戦—資料, (2005)
- 6) 土木学会エネルギー委員会: 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, p.231, (2008)
- 7) 河西基: 地下水移行シナリオに用いる核種移行解析パラメータ設定の考え方 (土木学会における検討), 原子力学会春の年会, (2008)
- 8) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会: 低レベル放射性廃棄物の余裕損度処分に係る安全規制について (案) (2007)
- 9) 原子力委員会: 原子力バックエンド対策専門部会報告, 現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について(1998)
- 10) 原子力委員会: 放射性廃棄物・廃止措置専門部会報告, 低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方 (中間報告) (2007)
- 11) ICRP : Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long lived Solid Radioactive Waste, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication no. 81, Pergamon Press, Oxford and New York (2000).
- 12) 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, pp.1-7 - 1-16(2005)
- 13) 経 済 産 業 省 資 源 エ ネ ル ギ ー 庁 ホ ー ム ペ ー ジ (<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/gaiyo/gaiyo03.html>)
- 14) 核燃料サイクル開発機構: 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊2 工学技術の開発, JNC TN1400 2005-015 (2005)
- 15) 土木学会: 吹付けコンクリート指針 (案) [トンネル編], コンクリートライブラリー 121(2006)



- 16) 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—総論レポート, JNC TN1400 99-020, (1999)
- 17) 電力中央研究所, 電気事業連合会(1999): 高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術 U98509d
- 18) Timo Vieno, Jarmo Lehtikoinen, Jari Lofman, Henrik Nordman, Ferenc Meszaros : Assessment of Disturbances Caused by Construction and Operation of ONKALO, POSIVA 2003-06 (2003)
- 19) 土木学会 : 高レベル放射性廃棄物地層処分技術の現状とさらなる信頼性向上に向けて (2004)
- 20) 土木学会 : トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説(1996)
- 21) 尾留川剛, 森岡宏之, 山上光憲, 村川史朗 : 幌延深地層研究計画における地下研究坑道の概要と支保設計, 電力土木, No.324, pp.82-86, (2006)

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
物質の量	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基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> 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。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。  
 (e) 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。  
 (f) 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
粘り度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射線輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1L=1l=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> 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	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-12</sup> cm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
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、 対数である定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	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 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォトル	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe≈ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(c) 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 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> 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	1cal=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 <sup>-6</sup> m

