

高レベル放射性廃棄物地層処分事業への参画意欲育成とスキルアップ —土木工学の視点から—

小峯秀雄*1

高レベル放射性廃棄物地層処分事業（以下、HLW 処分事業）は、原子力工学と土木工学ほかとの協働が不可欠な学際的かつ総合的工学である。HLW 処分事業は、巨大な地下施設建設が主体であり、土木工学が寄与すべき国家的プロジェクトである。そこで日本原子力学会バックエンド部会主催のバックエンド週末基礎講座において、著者の専門である土木工学の観点から、参加した若手技術者や学生諸君を対象に、問いかけを交え、HLW 処分事業における土木工学の基本的事項の重要性と、土木工学に関する知識不足が招く隘路を想像していただいた。さらにそれを起点に、原子力工学と土木工学の協働の重要性に気づき、自ら学習する意欲を醸成するように講演した。本論文では、その内容を概説する。

Keywords: 土木工学, 高レベル放射性廃棄物, 地層処分, 人材教育

The HLW disposal project is an interdisciplinary and comprehensive engineering project that requires collaboration between nuclear engineering, civil engineering, and other disciplines. In the Weekend Basic Lecture Course organized by the Division of Nuclear Fuel Cycle and Environment (NUCE) of the Atomic Energy Society of Japan (AESJ), the author, from the viewpoint of his specialty in civil engineering, discussed the importance of fundamental civil engineering in the HLW disposal project with questions to the participating young engineers and students, imagining the bottleneck caused by insufficient knowledge of civil engineering. The questions were used as a starting point for the discussion. The lecture also encouraged the students to recognize the importance of collaboration between nuclear engineering and civil engineering, and to develop a desire to learn on their own.

Keywords: Civil Engineering, High-Level Radioactive Waste, Geological Disposal, Education

1 序論

高レベル放射性廃棄物地層処分事業（以下、HLW 処分事業）は、21 世紀の人類が解決しなければならない技術課題である。同事業は、Fig.1 に示すような、巨大な地下施設を建設し、容器に封入された高レベル放射性廃棄物を処分する事業である。そして、本事業を実施する主体として、2000 年に原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）が設立されている[1]。

著者は、30 年以上、HLW 処分事業における地層処分施設建設に係る土木工学の分野で、科学的・工学的研究と技術開発を進めてきた。そして、土木系学科の大学教員として、学部・学科で担当する教科の中で、HLW 処分事業の概要と土木工学の役割を教授し、将来の土木技術者になるであろう若者たちに対し、原子力工学分野にも活躍する場面があることを強く伝達してきた。さらに、日本原子力学会やバックエンド部会の企画等を通じて、原子力工学を主とする技術者たちに対しても、土木工学の歴史と発展を踏まえて、HLW 処分事業における土木工学の重要性を教授してきた。

このような背景から、2023 年 11 月 17 日に開催されたバックエンド部会週末基礎講座において、本論文のタイトル「高レベル放射性廃棄物地層処分事業への参画意欲育成とスキルアップ～土木工学の視点から～」にて、講義を行う機会を得た。本講義ではまず、著者の専門である土木工学の基礎の観点から、受講生に問いかけをした。

また著者らの研究チームでは、2020 年度・2021 年度原子力発電環境整備機構支援研究「地層処分事業に係る社会的

Fostering Motivation and Skills for Participation in High-Level Radioactive Waste Geological Disposal Projects -From a Civil Engineering Perspective- by Hideo KOMINE (hkomin@waseda.jp)

*1 早稲田大学 理工学術院/バックエンド部会副部会長(現:バックエンド部会部会長)

Waseda University Faculty of Science and Engineering

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 西早稲田キャンパス 58 号館 2 階 03 室

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会 2023 年度バックエンド週末基礎講座における講演内容に加筆したものである。

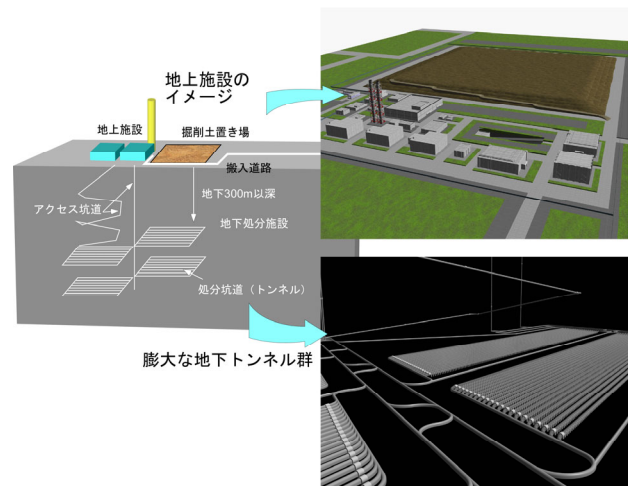


Fig.1 Schematic drawing of high-level radioactive waste (HLW) geological disposal facility

側面に関する研究」，“社会啓発と科学コミュニケーター育成を念頭に置いた「地層処分事業」への知的興味を向上させる土木教育プログラムの研究」を実践してきた[2]。本講義では、当該研究プロジェクトで製作してきた教材の使用[3]を念頭に、先の問いかけに引き続き、受講生との対話をヒントに伝達する内容を瞬時に判断して実践した。

2 土木工学の基礎からの問いかけ

2.1 ベントナイトは粘土の一種。では、粘土の定義は？

人工バリアの一つである緩衝材の主材である「ベントナイト」について、どの程度の知識を保有しているかを、受講生に尋ねた。具体的には、「ベントナイトは、粘土の一種である。さて、粘土の定義は？」という問いかけである。読者も是非、考えていただきたい。著者の問いかけは、工学技術者としての問いかけであり、基本的には、日本産業規格[4]に基づく問いかけとした。

粒径 (mm) [対数目盛り]	0.001	0.002	0.005	0.01	0.01	0.075	0.25	0.85	1	2	4.75	10	19	75	100	300	
(注1) 日本統一分類法 (JIS A 1204:2020)	粘土			シルト			砂			礫 (レキ)			石				
	細砂			中砂			粗砂			細礫		中礫		粗礫		粗石	巨石
	細粒分						粗粒分						石分				
(注2) 統一分類法 (ASTM D653-90)	粘土			シルト			0.425 砂			礫 (レキ)			粗石 コブル		巨石 ボルダー		
	細砂			中砂			粗砂			細礫		粗礫					

(注1) 日本産業規格 土の粒度試験方法 (JIS A 1204:2020) による。

(注2) Unified Soil Classification Systemと呼ばれる方法で、アメリカを中心に広く利用されている。

Fig.2 Classification of soil by Japanese Industrial Standards (JIS) and its definition of “clay”

土粒子の直径による分類

- 土粒子の直径を「粒径」という。
- 粒径によって、名称があることを覚えよう！
- 教科書p.22の図2.3を覚えること。

0.005mm以下: 粘土

0.005~0.075mm: シルト

0.075~2.000mm: 砂

2.000~75mm: 礫(れき)

75mm以上: 石

粘土と砂の違いは・・・
土粒子の直径の大きさの違いだった！

Fig.3 Educational material in “Soil Mechanics A” conducted by Hideo Komine in Waseda University

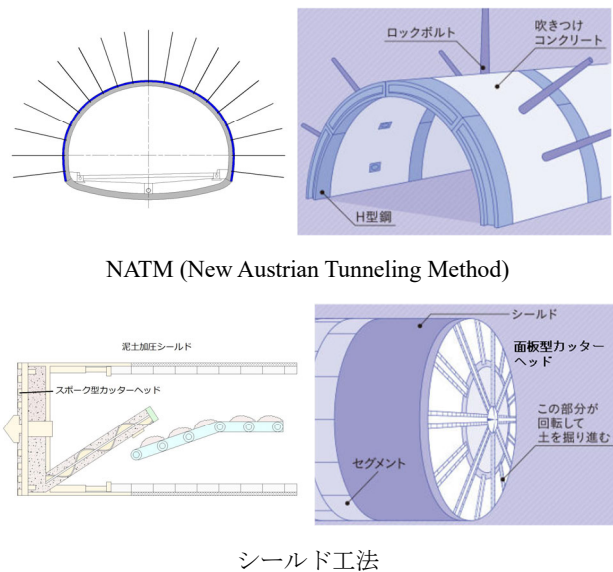
Fig.2 は、日本産業規格であり地盤工学会基準でもある日本統一分類法による土質区分を、アメリカで広く利用される ASTM の統一分類法と比較して示す。また、Fig.3 には、これに基づき著者が早稲田大学創造理工学部社会環境工学科学部 2 年生対象の必修科目：土質力学 A で使用している教材 (図中の教科書は参考文献[5]である) を示す。これらの図に示すように、日本においては、「粘土は、粒径 (粒子の平均的な直径) が 0.005 mm 以下のもの」である。このことを是非、記憶していただきたい。また併せて、Fig.3 に示す「砂」や「石」の定義や「礫」や「シルト」と呼ばれる土質区分の存在も記憶にとどめていただきたい。きっと、多くの読者が持っていたであろう “イメージ” に基づく土の認識が、如何に誤解していたものであるかを認識していただきたい。

さて、以上の粘土の定義から、ベントナイトは 0.005 mm 以下の粒子を主体とするものということが分かる。さらにベントナイトは、モンモリロナイトと呼ばれる膨潤性 (吸水により体積膨張する性質) の粘土鉱物を主成分とすることから、緩衝材としての要求性能である自己シール性や低透水性を実現できると考えられ、有力な候補材料とされている。参考文献[6]は、ベントナイトについてより詳しく解説しているので参照されたい。

2.2 トンネル建設工法を知っているか？

次に、著者は受講生に対し、「トンネル建設工法の一つである NATM (ナトム: New Austrian Tunneling Method の略) を知っている人はいますか？それから、都市部でよく使われるシールド工法を知っていますか？」と問いかけた。バックエンド部会の会員各位においても、是非、自問自答してほしい。

さて先の問いかけに対して、NATM やシールド工法について、その内容を説明できるほどの知識を持っている人はいなかったという結果であった。本論文では、Fig.4 に示すように、NATM とシールド工法に関して、極めて簡単な概念図だけを示す。この図だけを見て分かったつもりにはならないで、詳しく学習してほしい。シールド工法だけでも、非常に数多くの種類がある。Fig.4 は、あくまで読者に、トンネル建設工法に興味を持っていただくためのものである。トンネル建設工法には、大別するだけでも、NATM やシールド工法以外の方法も複数あり、さらに、補助工法と呼ばれる掘削対象地盤の状況に応じて、丁寧に対応する方法を



(左: 泥土加圧シールド, 右: 泥水式シールド)

各図は、パシフィックコンサルタンツ株式会社提供[7]
Fig.4 Schematic drawings of tunnel excavating methods named as both of NATM and Shield tunneling method

Table 1 Novels and films on tunnel construction

小説・映画	概要
小説・菊池寛著 「恩讐の彼方に」	江戸時代に硬い岩を人力で掘削した、僧 禅海による九州・大分の耶馬溪（やまけ い）の「青の洞門」建設
小説・吉村昭著 「高熱隧道」	第二次世界大戦を目前にした時代、黒部 第3発電所建設のために、160℃にもな る岩盤の掘削に立ち向かった土木技術 者たちの活躍
映画・「黒部の太 陽」（石原裕次郎 主演）	関西電力・黒部第4ダム建設のためのア クセストンネル（大町トンネル）掘削の 難工事ドラマ。昭和30年代～40年代の お話。同名の文庫本も出版されている。
小説・田村喜子著 「関門とんねる 物語」	山口県下関と福岡県門司を結んだ、日本 初の海底トンネル建設のドラマ。後に京 都大学の土質力学の教官になった村山 朔郎が活躍。
小説・田村喜子著 「京都インクラ イン物語」	日本の土木技術者、田辺朔郎の物語。琵琶 湖疎水プロジェクトのお話。日本初の 水力発電も行った。
映画・「海峡」（高 倉健主演、国鉄地 質技術者）	有名な青函トンネル建設の映画。本も出 版されている。
小説・吉村昭著 「闇を裂く道」	JR 東海道線の丹那トンネル掘削時の苦 労話

変化させた工法が、無数と言っていいほど数多くある。

さて、上記の問いかけに対する状況は、仕方のないこと
かもしれない。大学の土木系学科では、まず間違いなく講
義は実施されているが、おそらくは、「地下構造学」等と言
う名称の選択科目であることが多い。すなわち、土木系学
科でも習っている人は少ないのかもしれない。しかし、そ
のような土木系学科を卒業・修了し、建設会社に入社すれ
ば、トンネル建設工法については必須の知識となる。土木
工学の専門家として、地層処分事業に関わる技術者には、
建設会社の職員と同じように、トンネル建設工法のおよそ
その分類や発展してきた歴史は認識しておいていただきたい。
なぜなら、Fig.1 に示すような膨大な数のトンネルから構築
される地層処分事業の発注を行い、完成した地層処分施設
の運用・点検・品質管理・維持管理を行うのであるならば、
どのような工法で建設されたものなのか、その長所と短所
を知っておかなければ、適切な運用・点検・品質管理・維
持管理はできないからである。

しかしトンネルは、実は、一般の人たちにとっても、身
近で頻繁に利用しているものはずである。東京近郊にお
住いの読者であれば、身近なもので例えるならば、神奈川
県川崎市から東京湾を横断して千葉県木更津市へ至る高速
道路「東京湾アクアライン」がある。東京湾を横断する川
崎側の約9.5 kmの東京湾アクアトンネルは、どのような建
設工法で実施されたのであろうか。このように思考すれば、
そのモチベーションを持って、インターネットでも良いの
で調べれば、それなりの情報は得られる。読者には、是非

とも、これを機会に調べてみてほしい。

また、東京湾アクアライン以前に建設された歴史的トン
ネルとして、青函トンネルもある。青函トンネルは、いか
なる工法で建設されたのか、是非、調べてほしい。また、
これらトンネル建設プロジェクトは、実は多くの歴史小説
や映画として記録されている。Table 1 に、そのいくつかを
紹介する。また、参考文献[8]では、写真入りで、トンネル
をはじめとして、HLW 処分事業に資する可能性のある数多
くの土木施設の概要説明をしているので、初修学習、土木
工学の導入教材として活用することもできる。

2.3 北欧の地下施設と同じように日本で建設できるか？

高レベル放射性廃棄物地層処分の技術については、スウ
ェーデンやフィンランド等の北欧は、日本よりもプロジェ
クト推進という観点で先を進んでおり、大いに参考になる
情報がある。そして時々、地層処分施設の主体となる地下
トンネルの形状も、北欧のプロジェクトを参考に示すこと
が多い。Fig.5 のように、著者も実際数多くのベントナイト
系緩衝材に関する学術論文において、研究背景を説明する
際に示している。さて果たして日本においても、北欧のよ
うな形状、Fig.5 に示すような馬蹄形の処分坑道トンネルが
掘削できるであろうか。実は、トンネルの掘削断面は、掘
削する地盤・岩盤の性状によって、力学的安定性の観点か

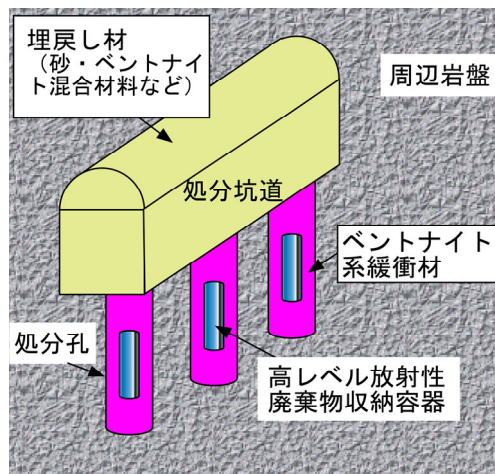


Fig.5 Schematic drawings of geological disposal facility and access tunnel



2016年10月24日、著者撮影
Fig.6 Photo of access tunnel of Horonobe Underground research center, JAEA

ら形状を設計していることを、十分に認識する必要がある。北欧の地質・岩盤は、日本のように地震の多い国における地質・岩盤とは大きく性状が異なる。したがって、地質・地盤・岩盤の力学特性や透水性の性状を考慮した詳細な設計することなく、あたかも、日本でもスウェーデンのような地下施設が建設できると考えることは早計であることを認識する必要がある。Fig.6に、日本原子力研究開発機構(以降、JAEA)の幌延深地層研究センターの坑道の形状を示す。是非、読者には、坑道の形状の違いという詳細な点にこだわって、観察していただきたい。そして、このトンネル形状が、地質・地盤の特性に応じて力学的安定性の観点で設計され施工されていることを認識していただきたい。

2.4 複数設トンネルの実績は何本か？ 離隔距離は？

HLW 処分事業の主役とも言うべき地下の処分施設は、膨大な数のトンネルから構成される。Fig.7に、そのイメージ図を示す[9]。本図に示す白い多数の線はトンネルである。このように膨大な本数のトンネルの建設が予定されている。さて、果たして、これだけの膨大な数のトンネルを建設

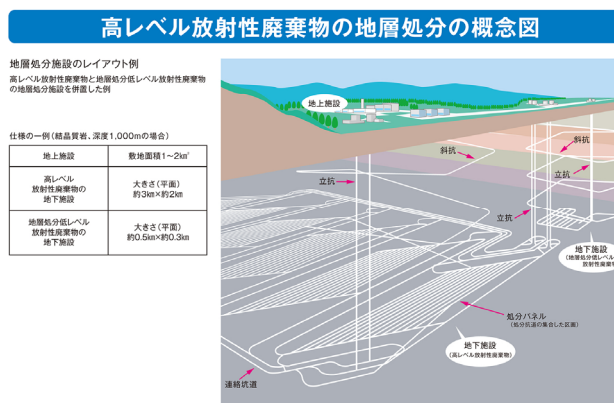


Fig.7 Schematic drawings of geological disposal facility from JAERO

した事例はあるだろうか。NUMO 包括的技術報告-第4章 処分場の設計と工学技術-[10]では、32本や48本の連設を想定した検討がなされている。35年以上、土木工学の研究者として、様々な各種土木工事の技術支援をしてきた経験からも、このような膨大な数のトンネル連設建設は記憶がない。土木工学では、「近接施工」という技術用語がある。Fig.7のように数多くのトンネル構造物が接近して施工される場合に用いられる技術用語である。そして、「近接施工」において注意しなければならない事項として、隣接し合うトンネル構造の力学的安定性と変形挙動がある。これに関する学術論文は数多くある。ほんの一例に、参考文献[11]や[12]を挙げる。学習の参考にされたい。

もう一つの視点を述べる。上述の複数のトンネル建設においては、各トンネルの離隔距離を適切に設計することが求められる。参考文献[13]など、一般土木における道路建設では、各トンネルの力学的安定性の観点から、およそ Fig.8 に示すような離隔距離が求められている。NUMO 包括的技術報告-付属書 4-33 処分坑道中心間距離の算定方法-[14]では、廃棄物からの崩壊熱の対策の観点から離隔距離が試

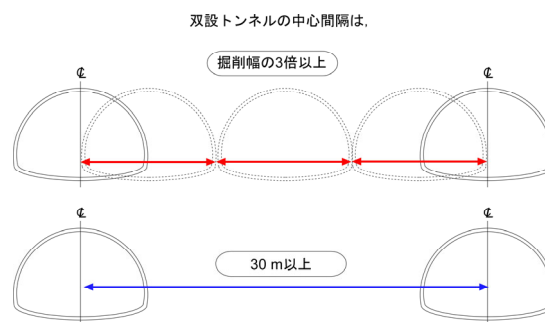


Fig.8 Image of separation distance for twin tunnels in civil engineering

算されており、トンネル直径の2~2.4倍の距離を確保する必要があるとされている。さて、このような試算結果から、Fig.1に示すような複数設のトンネルの描画を見直し、描画し直す必要がある。現在の地下トンネルの描画は、これらの試算結果や、一般土木の基準から見た場合、適切に描かれているとは言えない。

2.5 地上施設における掘削土の保管方法は？

本節からは、HLW 処分事業の地上施設に着目する。Fig.9は、地上施設のイメージ図である。ここで目を引くのは、大量の掘削土の保管の様子である。さて、この掘削土の保管期間は、具体的に何年であろうか。掘削土を坑道の埋戻し施工の際に有効利用することは、妥当な計画と考える。しかし、トンネルの掘削開始から閉鎖に至る比較的長い期間における保管として、Fig.9の様相は適切であろうか。ここでも、一般土木の経験から、いくつか疑問を提示したい。

まず昨今、盛土崩壊の事例が報道されていることは、読者も周知していると思う。HLW 処分施設の主役とも言うべき地下の処分施設は、前節に述べたように、膨大な数のトンネルから構成される。したがって、掘削される土量も、膨大な量になることは容易に予想できる。参考文献[15]によれば、掘削土量は約400~900万m³と試算されている。

さて、Fig.9に示すように、掘削土をむき出しの状態で保管することは、土木工学的に適切であろうか。読者は、昨今の産業廃棄物処分場のいくつか、屋根付きの施設になっていることをご存じであろうか[16]。また、「自然由来の重金属問題」という課題もある。すなわち、掘削土から溶



Fig.9 Schematic drawings of surface facility for geological disposal

出する重金属が、環境基準の規制値以上になる事例も数多く報告されている。そういう観点からも、Fig.9 に示す掘削土の保管施設について、詳細な設計と描画が求められる。

2.6 地層処分施設の町に未来ある発展を！

HLW 処分事業の主役は地下の処分施設であるが、施設周辺の住民が目にするのは、Fig.9 の右上に示す地上施設である。このような処分事業にのみ資する施設を住民の方々が毎日、目にする気持ちに寄り添う必要はないだろうか。このような施設を受け入れるのであれば、住民の方々にとって、受け入れるに値する未来を感じるものでなければならぬと考える。著者が関わっている茨城県日立市の新処分場建設の住民説明では、施設の建設に伴い、地域・町の発展・将来像を提示している[17]。HLW 処分事業においても、このような将来像を提示する必要があると考える。荒れた採掘場を再生させた英国のエデン・プロジェクトの考え方も参考になるであろう[18]。

3 土木工学から考える高レベル放射性廃棄物地層処分の実現のための人材育成

前章の土木工学的問いかけを踏まえて、土木工学から考える HLW 処分事業の実現のための人材育成実践を教授した。その内容は、2020 年度・2021 年度原子力発電環境整備機構支援研究「地層処分事業に係る社会的側面に関する研究」，“社会啓発と科学コミュニケーター育成を念頭に置いた「地層処分事業」への知的興味を向上させる土木教育プログラムの研究”[2]，そして参考文献[3]に紹介した内容である。本章では、その概要を2つのポイントで述べる。なお、参考文献[3]は、2024年7月に、フリー公開になる。閲覧を希望する人は、2024年7月以降に、Fig.10 の二次元バーコードからアクセスされたい。

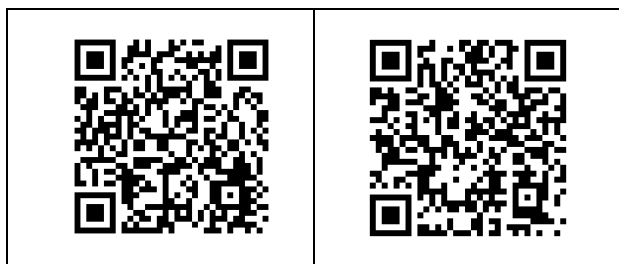


Fig.10 2D bar code for downloading reference [3]

3.1 学生のブレインストーミングに基づく HLW 処分事業に関する若者の知的興味と疑問点の抽出と土木工学的コミュニケーションツールの作成

HLW 処分事業に対する疑問点や懸念事項をテーマとして学生とのブレインストーミングを実施した。そして、HLW 処分事業に係わる自然・物理現象について、学びの深化に重要と考えられる疑問や課題、土木工学的な観点から HLW 処分事業について学ぶ意思のある学生に対し有用な教育教材の在り方を明らかにした。

ここでは、工学分野を専攻しているが、研究課程には進

HLW 処分事業に関する説明事項の分類

- 【1. 説明資料の種類・構成】
- 【2. 事業概要】
- 【3. 事業主体】
- 【4. 過去の事業検討の経緯】
- 【5. 処分技術】
- 【6. 事業の推進方法】
- 【7. 文献調査・候補地選定】
- 【8. 建設】
- 【9. 施設の長期運営・閉鎖】

Fig.11 Classification on the results of students' brainstorming for HLW disposal project

んでいない学生、すなわち理工学系の学部2,3年生を主な対象として実施した。そのため、専門知識を持たない一般市民が抱く疑問や意見と、理工学分野を専攻する学生から見た HLW 処分事業の詳細な技術面に関する意見の両者を得ることができたと考える。

学生ブレインストーミングにおける意見は、Fig.11 に示す9つの分類に集約した。その結果、特に、地層処分の必要性等の【2. 事業概要】に関する意見、HLW 処分事業に用いられる【5. 処分技術】に関する意見が多く抽出された。

【2. 事業概要】では、「高レベル放射性廃棄物を処分するにあたり、なぜ地層処分を行う必要があるのか」、「地上保管や海洋底処分等の処分方法がある中で地層処分が最適な処分方法なのか」、「HLW 処分事業を行う必要がある事実を国民に周知させ、問題提起する必要があるのではないか」等の疑問・意見が挙げられた。

これに対して、専門研究者・技術者で構成される著者の共同研究グループの見解は、これまで数十年にわたって処分方法に関する詳細な検討を経て、現在、地層処分が最適な処分方法として選定されているという認識であり、上記の学生の意見との認識の差異を確認した。この認識差異の原因の一つは、NUMO の説明資料ではわかりやすさを優先するため、選定の過程を割愛する傾向にあることと推察した。その結果、読み手は HLW 処分事業を押し付けられているような印象を受けることが、このような意見が出る要因の一つであると考えた。国民の正しい理解を得るために、HLW 処分事業の経緯や背景を説明することは必要事項であると言える。

【5. 処分技術】では、HLW 処分事業に用いられる技術を、より一般市民にイメージしやすいように、身近な例を用いてわかりやすく説明すべきである等の意見が多く挙げられた。専門研究者・技術者で構成される著者の共同研究グループの見解は、HLW 処分事業は、普段見ることができない地下に危険な高レベル放射性廃棄物が処分されるため、現実的に想像することが難しく、不安意識を与える可能性が高いと推察した。また、処分に用いられる材料や技術は一般市民には知られていないものも多いため、より身近な例を用いた解説は必要であると言える。

上記の他に、HLW 処分事業の処分地選定が進んでいる他

【1. 説明資料の種類・構成】

学生からの意見・疑問

- なぜ寸法情報がないのか？
- 身近な例がないと分かりづらいのではないのか？
- 科学コミュニケーターに向けたメッセージ(期待等)を明確に盛り込むべきでは？(一般向けとの違いを明確にすべきでは？)
- 事業や採用技術の経緯・背景を盛り込むべきではないか？
- 事業の目的を最初に示すべきではないか？
- 事業の必要性(現状問題)を示すべきではないか？
- 事業プロセスの詳細(精密調査で何を行うか等)を具体的に示すべきでは？
- より多くの人が目に触れる媒体も作るべきでは？(ドラマ, YouTube等)

12

【2. 事業概要】

学生からの意見・疑問

- そもそも何故HLW処分が必要なのか？(放射性廃棄物が発生する経緯・原子力発電のしくみ)
- 最終処分に関するこれまでの歴史や経緯(特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律の制定など)
- 高レベル放射性廃棄物とは？低レベル放射性廃棄物とは？その違いは？
- 現在、放射性廃棄物はどこで保管しているのか？現在の状況は？
- どうして地上での保管はダメなのか？
- 原発と同じレベルで自然災害などの対策をすれば地上保管で問題ないのではないのか？
- 海洋底処分は国際条約で禁止されているのに、なぜ沿岸海底下に処分することは問題ないのか？
- 地層処分事業を行う必要があるという事実を国民に周知させ問題提起する必要があるのではないのか？
- 安全面のみではなくコスト・パフォーマンスの面から見ても、地層処分は最適なのか？定量的評価を知りたい。
- HLWだけガラス固化体にする必要があるのか？LLWはガラス固化体にせず大丈夫なのか？
- 年間線量の安全性に関する数値がイメージできない。

13

【5. 処分技術】

学生からの意見・疑問

- 素材や材料だけでなく、その素材や材料が持つ性能、性質を示すべきではないか？
- そして、それを使う目的を身近な例を使って説明するべきではないか？
- 具体的には、
 - 地下水の状況は？(いきなり土の遮水性の話やグラウチングの言葉を使うより事業をする上での湧水のリスクを伝えることが先？)
 - 身近な例を使って遮水性・遮蔽性を説明するべきではないか？
 - 遮水性・遮蔽性の違いを、身近な例を使って目的の違いを示すべきではないか？(ペントナイトを使う必要性等)
 - ガラス固化体を使う目的を身近な例を使って説明するべきでは？(例:ビール瓶のガラスを割っても茶色の要素が出てこない原理)

15

Fig.12 Some sampled results of students' brainstorming

国と日本にはどのような違いがあり、課題は何であるのか(【4. 過去の事業検討の経緯】、【7. 文献調査・候補地選定】)、具体的な事業プロセスの明確化や地域に対するメリットを提示する必要があること(【6. 事業の推進方法】)、巨大地下施設を長期間運用していくにあたり考えられるリスクを抽出する必要性(【8. 建設】、【9. 施設の長期運営・閉鎖】)等の意見が挙げられた。

Fig.12 には、代表的なものを示したが、詳しい意見は参考文献[3]に記しているのので、是非とも参照いただきたい。

以上のように、学生の意見集約のまとめと、それに対する専門研究者・技術者で構成される著者の共同研究グループの見解を対比して例示した。実際、学生が HLW 処分事

業に対して持つ純粋な疑問や柔軟な意見を抽出することができたと考える。また、次の教育教材の作成で求められる事項を整理することができた。

そこで、ブレインストーミングにて収集・整理した学生の興味や疑問点等を受け、高校2年生から大学3年生を主な対象とし、企業・コンサルタントの技術者による理工学系の学部2,3年生向けのHLW処分事業の説明教材の作成、大学院生による高校生向けのHLW処分事業の内容説明教材の作成を行った。土木工学を専門とする50歳代の技術者は、【2. 事業概要】および【6. 事業の推進方法】の観点から教材を、土木工学を専攻した20歳代の技術者は、【5. 処分技術】、【8. 建設】の観点から教材を作成した。また、地質学を専攻した20歳代の技術者は、【9. 施設の長期運営・閉鎖】という観点で教材を作成した点は、とても興味深い。すなわち、理工系技術者と言っても、学生時代の専攻の差異、年齢に応じた経験の量に依存して、関心事が変化し、HLW処分事業において、説明・解説において重きを置く点が変わることが分かる。作成したスライド教材および動画教材は、以下のサイトからダウンロード可能とした。Fig.13には二次元バーコードも示した。

【HLW処分事業・スライド教材】の公開サイト：

<https://waseda.box.com/s/76u3k0o2blw6e2xvqs1ywubg8ek0idle>

【HLW処分事業・動画教材】の公開サイト：

https://hkomine.w.waseda.jp/HLW_Lecture.html

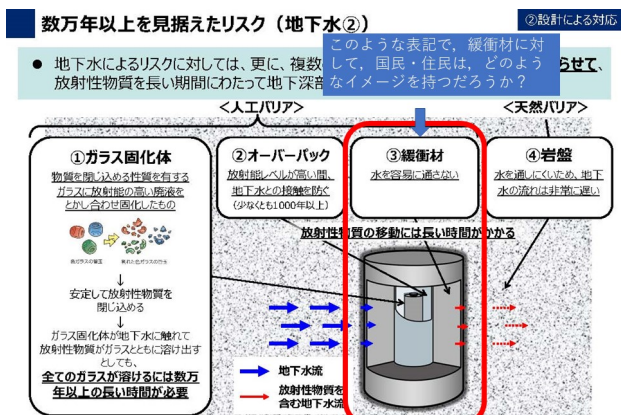


Fig.13 2D bar code for downloading communication tool for understanding HLW disposal project

3.2 HLW 処分事業の技術的成立性に関する理解促進のための実験教材の製作

HLW 処分事業の技術的成立性に関する理解促進のため、著者の共同研究グループでは、新たに2種類の実験教材の製作(物理現象の実験教材)を行った。一つは、「粘土」、「締固めた粘土」、「緩衝材」のイメージをより正しく認識できる、ペントナイト(緩衝材の材料の粘土)の締固め簡易デモ実験装置の製作と実験手順を作成した。この実験の動機は、以下のようなものである。

Fig.14は、HLW処分事業の実施主体であるNUMOの対話型住民説明会の資料[19]から抜粋し、着目ポイントを加筆したものである。高レベル放射性廃棄物は、ガラス固化体の形態に成形され、オーバーパックと称される金属製容器に収納され、地下の処分孔において、「緩衝材(粘土)」



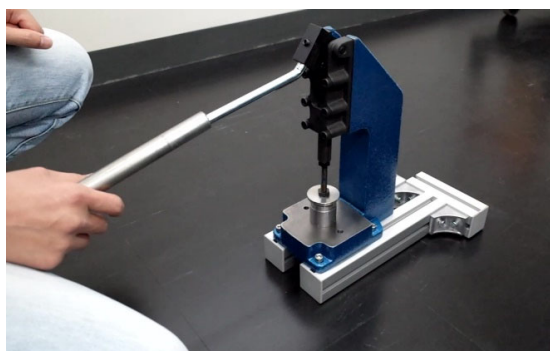
2023年5月版NUMO住民説明会資料抜粋

Fig.14 Image of buffer material (clay) in NUMO's interactive public information meeting materials

で覆られるという記述である。ここで、国民や住民が「粘土」という表記に対して、どのようなイメージを持つかを思索する必要がある。人は、実体験に基づき、様々なものを理解しようとする。その観点からすれば、幼少期の頃に触った粘土をイメージする人が多いと考えられる。すなわち、様々な形態に変化できる粘り気のある物質、湿り気のある物質をイメージする人が多いと推測される。しかし実際には、ベントナイト系緩衝材は、高い圧力で締固められ



粉体のベントナイト モールド内に投入



「緩衝材 (粘土)」の簡易製作装置による締固め工程



「緩衝材 (粘土)」ミニモデルの出来上がり (右は、お持ち帰り用袋詰め)

Fig.15 Process of "buffer material (clay)" mini-model production

たブロック状のものである。Fig.14 の状況を、国民・住民に、少しでも正確に理解してもらうためには、「緩衝材 (粘土)」の感触や実物を実感してもらう必要がある。

そこで著者の実験的研究[20,21]を通じて、獲得・蓄積してきたベントナイト系緩衝材の供試体作製技術をもとに、対話型住民説明会等でも実践できる規模のベントナイトの締固め装置の製作を行った。

Fig.15 に、著者らが製作した「緩衝材 (粘土)」の簡易製作装置を活用した「緩衝材 (粘土)」ミニモデルの製作工程を示す。専用の締固め用モールド(内径 28 mm・高さ 30 mm, ステンレス製)と締固め用のレバーに荷重モーメントを増加させることを目途として、パイプを取り付けたものである。締固め用モールドへの粉体状ベントナイトの投入から開始しておよそ 6 分程度で、「緩衝材 (粘土)」ミニモデルが完成できる。したがって、住民説明会等での実践は十分可能である。

実際の緩衝材は、多くの国民がイメージする軟らかい“粘土”ではなく、堅い軟岩のようなものであり、実際には強固な部材が人工バリアとして機能するというより正確に、実際の処分形態を理解できるものと考えられる。なお製作過程の動画は、以下の公開サイトから鑑賞できる。

【ベントナイト締固め実験】:

<https://waseda.box.com/s/u0ilzs06p87pkdk6ftybpcxk0s9kuvd>

次に、砂と粘土中の水の流れを可視化し、具体的な透水係数を提示して、遮水機能を実感できる実験教材と計算過程提示方法も考案した。住民説明会においても、地下水の流れが関心事に上がるが、「ほとんど流れない」という説明だけでは、体感的に理解するのは困難である。そこで、Fig.16 に示す、砂と粘土中の水の流れを可視化する実験

土の中の水の速度は、意外に遅い



計算してみよう!

- 砂の中の水の速度は、・・・
- 「0.01 cm/秒」
- 粘土の中の水の速度は、・・・
- 「0.000000000001 cm/秒」

クイズ
水が前に1 cmに進むために必要な時間を計算してみよう!

Fig.16 Comparative experiments on water flow in sand and clay

方法を考案した。後述の公開サイトもしくは二次元バーコードにて、本実験を鑑賞した後に、さらに、簡易に計算できる方法で、土の中の水が 1 cm 前に進むために要する時間を計算することを促す (Fig.16 下)。緩衝材の中を流れる水が、1 cm 前に進むために必要な時間が、人の一生を越える長さであることを実感してもらうことができる。

以上に述べた 2 種類の【ベントナイト締固め実験】と【砂と粘土の中の水の流れ比較実験】は、以下の公開サイトおよび Fig.17 の二次元バーコードを通じて公開している。是非とも鑑賞していただきたい。

【砂と粘土の中の水の流れ比較実験】:

<https://waseda.app.box.com/s/3xcehvqmgy1otc79hw72uazwbkznrnrcm>



Fig.17 2D bar code for downloading movies of bentonite-compaction and comparative experiments on water flow in sand and clay

さらに、現在、NUMO でも実践しているベントナイトの遮水性能を可視化する実験についても、さらにベントナイトに釘を刺し、自己修復機能を示す実験の動画も公開している。公開サイトの URL と二次元バーコードを Fig.18 に示す。参考にさせていただければと思う。



Fig.18 Nail-piercing experiment movie to demonstrate very low permeability of bentonite

以上に述べたコミュニケーションツールと各種実験を活用して、HLW 処分事業に貢献できるであろう、科学コミュニケーターとしての若手・学生の育成と社会啓発の試行も、複数回、実践した。その結果については、参考文献[2]および[3]に詳述している。是非とも参照されたい。

4 結論

本論文は、著者が 2023 年 11 月 17 日開催のバックエン

ド部会週末基礎講座において、受講生に伝えたメッセージを文章化したものである。繰り返し主張してきたが、HLW 処分事業は、原子力工学と土木工学ほかとの協働が不可欠な学際的かつ総合的工学である。このような観点から、著者の専門である土木工学の観点から問いかけし、HLW 処分事業における土木工学の基本的事項の重要性と土木工学に関する知識不足が招く隘路を示した。読者には、これを起点に、原子力工学と土木工学の協働の重要性に気づき、自ら学習する意欲を醸成していただきたい。

さらに、2020 年度・2021 年度原子力発電環境整備機構支援研究「地層処分事業に係る社会的側面に関する研究」，“社会啓発と科学コミュニケーター育成を念頭に置いた「地層処分事業」への知的興味を向上させる土木教育プログラムの研究”で作成・製作した講義教材、実験教材を紹介した。これら教材の公開サイトの URL および二次元バーコードが、末永く活用されることを願う。

謝辞

本論文の論旨を視覚的に表現するために、パシフィックコンサルタンツ株式会社様と（一財）日本原子力文化財団様には、数多くの図をご提供いただいた。また、日本原子力研究開発機構様には、幌延深地層センターにて著者が撮影した写真の使用のご許可をいただいた。さらに原子力発電環境整備機構の技術者との議論も大いに参考にさせていただいた。ここに感謝する次第である。

参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構, <https://www.numo.or.jp/> (accessed 2024-01-04).
- [2] 小峯秀雄: 2020 年度・2021 年度原子力発電環境整備機構支援研究「地層処分事業に係る社会的側面に関する研究」, 社会啓発と科学コミュニケーター育成を念頭に置いた「地層処分事業」への知的興味を向上させる土木教育プログラムの研究 成果報告, https://www.numo.or.jp/pr-info/pr/social/result2/pdf/seikahoukoku_20211130_3-1.pdf (2021).
- [3] 小峯秀雄, 王海龍, 龍原毅, 園田真帆, 村田航大: 高レベル放射性廃棄物地層処分事業への土木技術者としての参画意欲育成のための教材開発と試験的実践, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 7, 23-00059, <https://doi.org/10.2208/jscej.23-00059> (2023).
- [4] JIS A 1204: 2020. 土の粒度試験方法.
- [5] 足立格一郎: 土質力学, 共立出版, ISBN4-320-07393-2 (2002).
- [6] 小峯秀雄: ベントナイト, 地盤工学会誌, Vol. 56, No. 6 (605), pp. 52-53 (2008).
- [7] パシフィックコンサルタンツ株式会社: あなたの知らないあの場所の『ヒミツ』トンネル編, <https://www.pacific.co.jp/magazine/2018/04/post-27.html> (accessed 2024-01-22).
- [8] 土木ウォッチング: 地下構造物・トンネル,

- <https://www.doboku-watching.com/cmsK.php> (accessed 2024-01-05).
- [9] (一財)日本原子力文化財団:【8-3-08】高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念図,
<https://www.ene100.jp/zumen/8-3-8> (accessed 2024-01-25).
- [10] 原子力発電環境整備機構:包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築— 第4章 処分場の設計と工学技術, pp.4-95,
<https://scct.numo.or.jp/GeoCom2/faces/content/content10003954/content.xhtml> (2021).
- [11] 野城一栄, 小島芳之:トンネルへの近接施工のパラメータ解析と近接度の判定基準の提案, トンネル工学論文集, 第15巻, pp.89-97,
<https://doi.org/10.11532/journalte2004.15.89> (2005).
- [12] 真下英人, 日下敦, 河田皓介:無導坑の超近接トンネルの掘削時挙動に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.70, No.3 (特集号), I_29-I_42,
https://doi.org/10.2208/jscejte.70.I_29 (2014).
- [13] 国土交通省北陸地方整備局 設計標準 第10章 トンネル,
https://www.hrr.mlit.go.jp/gijyutu/kaitei/sekkei_r/02Split/10.pdf (accessed 2024-01-27).
- [14] 原子力発電環境整備機構:包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—付属書 4-33 処分坑道中心間距離の算定方法,
<https://scct.numo.or.jp/GeoCom2/faces/content/content10003576/content.xhtml> (2021).
- [15] 原子力発電環境整備機構:包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—付属書 4-62 地下施設の掘削土量と占有面積の見積り,
<https://scct.numo.or.jp/GeoCom2/faces/content/content10003041/content.xhtml> (2021).
- [16] 宇都宮市:新最終処分場「エコパーク下横倉」の整備,
<https://www.city.utsunomiya.tochigi.jp/kurashi/gomi/shisetsu/ecopark/index.html> (accessed 2024-01-29).
- [17] 茨城県:新たな産業廃棄物最終処分場整備について～茨城県から日立市民の皆様へ～, 令和3年4月,
<https://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/haitai/syobun/documents/oshirase-chirashi.pdf> (accessed 2024-02-04).
- [18] Eden project: <https://www.edenproject.com/> (accessed 2024-02-04).
- [19] 原子力発電環境整備機構:高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する対話型全国説明会,
<https://www.numo.or.jp/setsumeikai/> (accessed 2024-02-08).
- [20] 小峯秀雄, 小山田拓郎, 尾崎匠, 磯さち恵:締固めた粉体状ベントナイト各種の水分移動特性と膨潤圧挙動に関する考察, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 74, No. 2, <https://doi.org/10.2208/jscejge.74.63> (2018).
- [21] 小峯秀雄, 緒方信英, 中島晃, 高尾肇, 植田浩義, 木元崇宏:高レベル放射性廃棄物処分のためのブロック型緩衝材の製作方法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.735/VI-59, pp.203-208,
https://doi.org/10.2208/jscej.2003.735_203 (2003).