



幌延深地層研究計画の現状

中山 雅

幌延深地層研究センター

Current Status of the Horonobe Underground Research Laboratory Project

Masashi NAKAYAMA

Horonobe Underground Research Center

幌延深地層研究センターでは、2000年度より幌延深地層研究計画を進めている。本研究計画では、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術の信頼性向上に向けて、「幌延を例とした地表から地下深部までの具体的な地質環境の例示」、「地層処分技術の実際の地質環境への適用による信頼性の確認」及び「深地層を実際に体験できる場として整備」すること、を目標としている。本研究計画は、「地上からの調査研究段階（第1段階）」、「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）」、「地下施設での調査研究段階（第3段階）」の3段階に分け、約20年間の予定で進めている。これまで、第1段階の研究として、地質・地質構造、地下水の地球化学、地下水流動、岩盤力学などの各分野に関わる調査・研究を実施してきた。本稿では、これまでの研究の成果を中心として本研究計画の現状について報告する。

Horonobe Underground Research Center has been conducting the Horonobe Underground Research Laboratory (URL) project since 2000. The technical aims of the project are presenting concrete geological environment as an example of sedimentary formation in Japan and confirming reliability of technologies for geological disposal of high level radioactive waste by applying them to actual geological condition of sedimentary formation. Meanwhile, the social aim is providing opportunities for the general public to experience actual deep underground circumstance and conducting research and development activities there.

Research and development activities are planned over three phases that will span over a duration of about 20 years in total. These include the 1st surface-based investigation phase, the 2nd URL construction phase and the 3rd operation phase.

This report presents the outline of the project and the results of the investigations of 1st phase from 2000 to 2004.

キーワード

幌延深地層研究計画、地層処分、地層科学、地質環境、地質・地質構造、地下水流動、地下水の地球化学、岩盤力学

Horonobe Underground Research Laboratory Project, Geological Disposal, Geoscientific Research, Geological Environment, Geology and Geological Structure, Hydrogeology, Hydrochemistry, Rock Mechanics

1. はじめに

幌延深地層研究計画は、サイクル機構が進めている深地層の研究施設計画¹⁾のひとつであり、研究対象地層は新第三紀の堆積岩である。

本研究計画では、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術の信頼性向上に向けて、「幌延を例とした地表から地下深部までの具体的な地質環境の提示」、及び地質環境調査技術、地層処分の工学技術、安全評価手法といった「地層処分技術の実際の地質環境への適用による信頼性の確認」を技術的目標としている。また、一般の人を含めて多くの人に地下深部に入ってもらい、「深地層を実際に体験できる場として整備」することを社会的目標に掲げている。

本研究計画の成果は、東濃地科学センターにお



中山 雅

幌延深地層研究センター
深地層研究グループ
副主任研究員
地層処分研究開発、特に
処分技術の信頼性向上に向け
た研究開発業務に従事。
博士（工学）

ける深地層の科学的研究(地層科学研究)の成果、東海事業所で実施している地層処分研究開発の成果、及び国際共同研究の成果と併せて、実施主体が行う処分事業及び国が行う安全規制の策定等に反映する。

2. 計画の概要

幌延深地層研究計画は、調査研究の開始から終了までおよそ20年の計画であり、「地上からの調査研究段階(第1段階)」、「坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階(第2段階)」、「地下施設での調査研究段階(第3段階)」の3つの段階に分けて実施する。幌延深地層研究計画における地層処分技術に関する研究開発は、地層科学研究及び地層処分研究開発に分けられる。

地層科学研究として、

- (1) 地質環境調査技術開発
 - (2) 地質環境モニタリング技術の開発
 - (3) 地質環境の長期安定性に関する研究
 - (4) 深地層における工学的技術の基礎の開発
- の4課題、地層処分研究開発として、

- (1) 処分技術の信頼性向上
 - (2) 安全評価手法の高度化
- の2課題を設定している。

3. これまでの経緯

1998年12月にサイクル機構から北海道及び幌延町に「深地層研究所(仮称)計画」の申し入れを行った。2000年10月に受け入れが表明され、同年11月に北海道、幌延町及びサイクル機構の間で「幌延町における深地層の研究に関する協定」を締結した。この協定では、

- ・研究実施区域に放射性廃棄物を持ち込むことと

使用することはしない

- ・深地層研究所を放射性廃棄物の最終処分を行う実施主体へ譲渡、貸与しない
- ・研究終了後は地上の施設を閉鎖し、地下施設を埋め戻す
- ・研究実施区域を将来とも放射性廃棄物の最終処分場とせず、幌延町にガラス固化体の中間貯蔵施設を将来とも設置しない

こと等が明記されている。

2001年3月には、幌延町における調査に着手した。同年4月には幌延深地層研究センターを開設し、本格的な調査研究を開始した。2002年7月には2001年度の調査結果等に基づき、今後の調査研究の主な対象地区となる研究所設置地区を幌延町北部の北進地区に選定した²⁾。2003年3月には研究所設置地区内に、地上及び地下施設を建設するための用地を取得し、2003年度に第Ⅰ期、2004年度には第Ⅱ期の造成工事を行った(写真1)。

なお、造成工事にあたっては、埋蔵文化財の有無の確認のための調査を行った後に着工した。また、動植物への影響を評価し、必要な保全措置(エゾサンショウウオの卵塊の移動(写真2)、ハイドジョウツナギの移植)を行った。

今後の地下施設の建設については、2005年度に第Ⅲ期の造成工事に続いて、立坑の掘削を開始する予定である。

4. 幌延の地質環境の特徴

天北堆積盆の東端部に位置する幌延町には、その東部に蝦夷累層群を含む中生代の地層と神居古潭帯に属する変成岩・堆積岩類が分布する。幌延町の中央部から西部に向かっては、白亜紀の地層を基盤としてそれを不整合に覆う古第三紀堆積岩

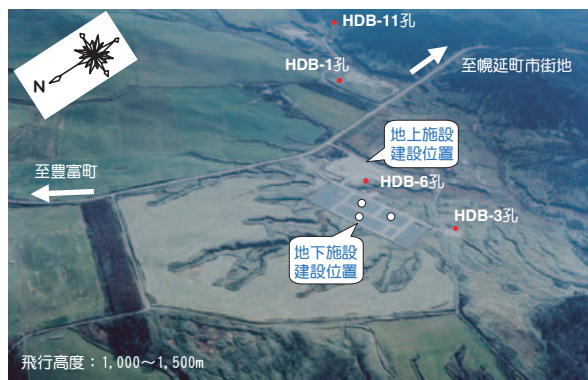


写真1 研究所用地(平成16年11月撮影)



写真2 エゾサンショウウオの卵塊

類、白亜紀と古第三紀の地層を不整合に覆う新第三紀堆積岩類（宗谷夾炭層、鬼志別層、増幌層、稚内層、声間層）、及び新第三紀末から第四紀にかけての堆積岩類（勇知層、更別層、段丘堆積物）が分布する^{3),4)}。また、ほぼ南北方向の褶曲構造や断層が発達し、活断層やとう曲等の活構造も認められる。研究対象である新第三紀の堆積岩は透水性が比較的低いこと、そこでの地下水は塩水系地下水と淡水系地下水の両者が存在すること、地下水には溶存ガスが存在することを確認している。幌延深地層研究計画では、このような地質環境の特徴に着目して研究を進めている。

これまでの調査で得られた地質環境の特徴を以下に述べる。

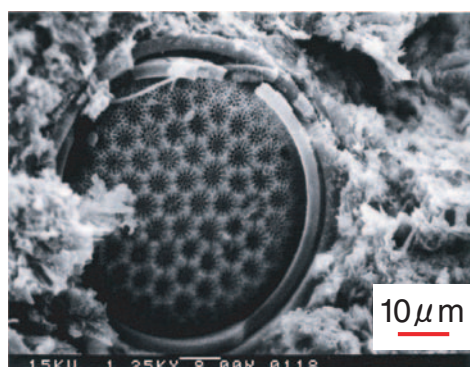
主な研究対象層準は新第三紀堆積岩のうち、中期中新世の稚内層と、後期中新世～前期鮮新世の声間層である。これらの研究対象地層は単調な珪質岩であり、その埋没続成変質の程度により上下に2区分される。下位の稚内層は埋没続成変質が進み、珪藻化石がopal-CT化した硬質頁岩である。一方、上位の声間層は続成変質程度が低く、opal-Aからなる珪藻化石の形状が良く保存されている、珪藻質泥岩である（写真3）。稚内層と声間層の境界部分には、両層と遷移的な関係にある層準が存在する⁴⁾。また、北進地区には大曲断層が分布しているとされているが、これまでの地表踏査や物理探査、ボーリング調査ではその正確な位置や特徴を特定するには至っていない。

岩盤力学的には、稚内層と声間層は日本の新第三紀の頁岩や泥岩として一般的な岩盤力学強度を有している一方で、大きな異方性を有している。

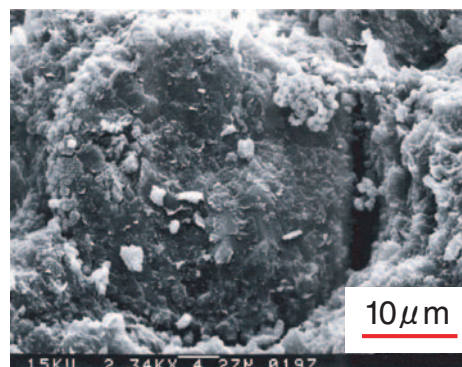
一軸圧縮強度は稚内層で20 MPa程度、声間層と稚内層の遷移部分で5～20 MPa程度、声間層で5 MPa程度である。水圧破碎法による応力測定の結果からは、最小主応力はほぼ深度に比例して増加すること、及び最大主応力は最小主応力のほぼ1.5倍の範囲内にあることがわかった。また、最大主応力方向は幌延地域を対象とした地震のメカニズム解から推定される水平最大圧縮軸方向⁵⁾と概ね一致している。

透水性に関しては、原位置水理試験で得られた透水係数は稚内層では $10^{-10} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ （割れ目帯）及び $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{ m/s}$ （健岩部）、声間層で $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ m/s}$ を示し、深度の増加に伴って小さくなる傾向がある（図1）。また、室内透水試験から得られた透水係数も、ばらつきはあるものの深度の増加に伴って小さくなる傾向を示した。

地下水の水質については、浅部は淡水系の地下水、深部は塩水系の地下水が存在するが、部分的には比較的深部まで天水が浸透したと考えられる淡水系地下水が確認された（図2）。酸素・水素同位体比の測定結果より、表層部の地下水はほとんどが表層から涵養した地下水であると考えられる。また、地下水の酸素・水素同位体比の深度プロファイルは、どのボーリング孔でも深度の増加に伴い大きくなる傾向を示した（図3）。図から、特にHDB-1、3孔に比べ、HDB-4、5孔は深部まで天水起源の影響を受けていると考えられる。この影響を受けていると考えられる深度は、地下水の水質分布で認められた淡水系地下水と塩水系地下水の境界深度の分布と良く一致している。



(a) Opal-Aからなる珪藻化石
(HDB-1孔, GL-288.5m, 声間層)



(b) Opal-CT化した珪藻化石
(HDB-1孔, GL-528.77m, 稚内層)

写真3 声間層及び稚内層における珪藻化石

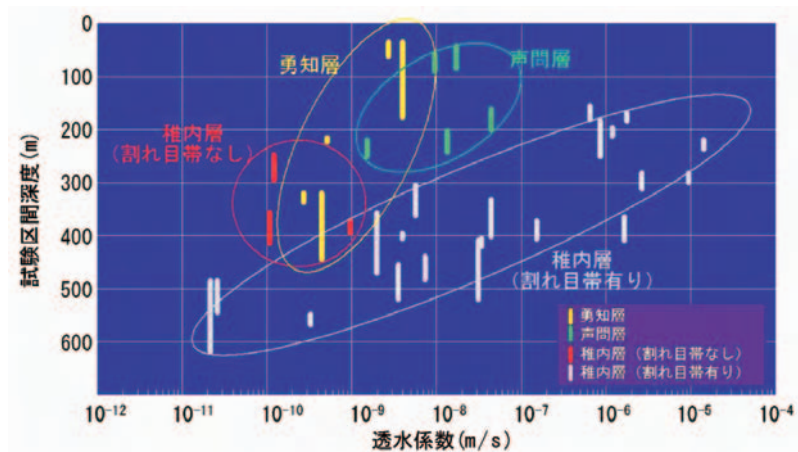


図1 透水係数の深度分布

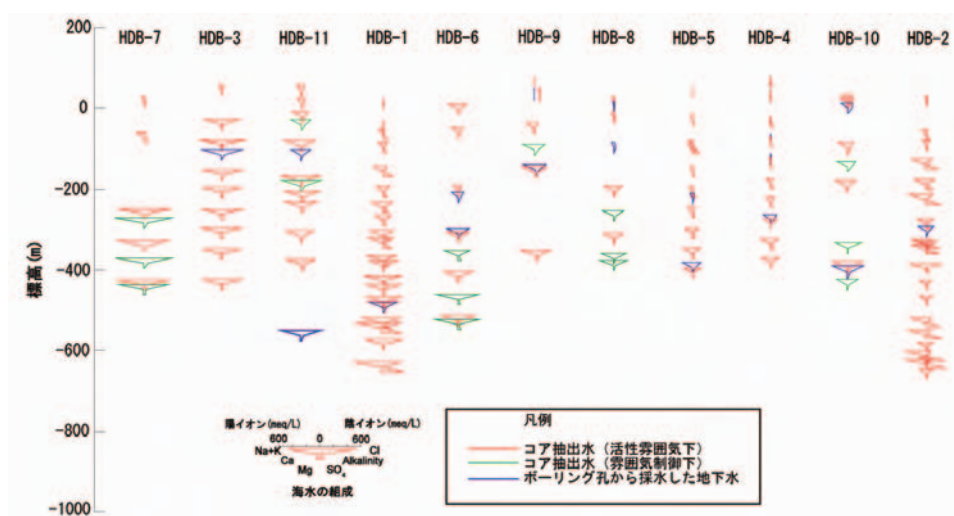


図2 地下水の水質

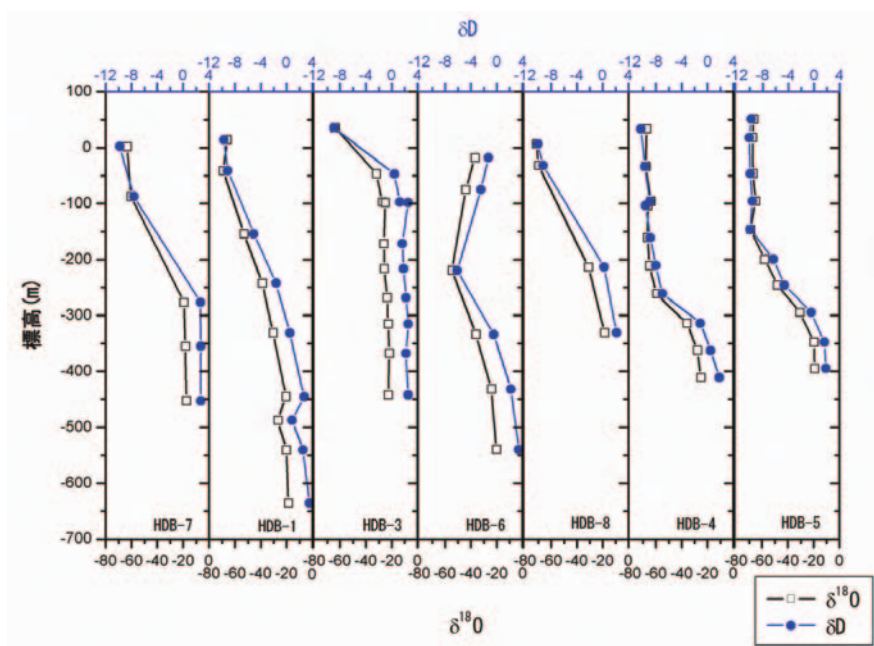


図3 酸素水素同位体比の深度プロファイル

5. 調査研究の進捗状況

5.1 地層科学研究

(1) 地質環境調査技術開発

2001年度に地上からの本格的な調査研究を開始し、地表踏査、空中物理探査、地上物理探査、表層水理調査、ボーリング調査を実施し、この地区の具体的な地質環境特性について実測データを蓄積してきた。これまでに実施したボーリング調査位置を図4に示す。

これまでに、地質層序、岩相、地質構造、岩盤力学特性、地下水の水理特性及び地下水の地球化学特性等に関する実測データが取得され、地質環境の概略を理解しつつある。一方、これらの調査には石油・ガス関連の調査技術等を基にした調査技術や機器を使用した。これらの調査技術や機器の一部について改善点が明らかとなり、その後も新たな知見や経験に基づいた改善点等を調査研究に反映している。

1) 調査技術・調査機器開発

岩盤中での物質移行を評価するために原位置での水素イオン濃度 (pH) 及び酸化還元電位 (Eh) のデータは必要不可欠である。これまでの調査で

は、揚水した地下水を地上で測定してきたため、地下水中の溶存ガスの脱ガスや、大気の影響が避けられず、信頼性のある pH 及び Eh が測定できなかった。そこで、既存の水理試験装置に採水時の深度に相当する水圧環境を保持したまま採水ができる機能及び原位置での pH、Eh、電気伝導度及び水温を測定する機能を追加した装置を開発した。

堆積軟岩を対象とした岩盤力学測定装置について、孔内水が存在する場合でも岩盤の応力状態を測定することが可能な装置の開発・改良を、北海道大学との共同研究として行った。開発した装置を用いて、ボーリング孔内で試験を行い、性能を確認した。

また、電力中央研究所との共同研究として、掘削方向や傾斜を任意に変えながらボーリングを掘削し、同時に地下水環境特性等の調査を実施可能な、コントロールボーリング技術の適用試験を北進地区で実施している(図4)。2004年度には掘削長547.0mまで掘削を行い、掘削技術の実用化及び検層・測定技術の実用化に向けた現地適用性について確認を行った。

(2) 地質環境モニタリング技術の開発

地下水の長期モニタリングでは、地下施設建設による影響及びその後の回復過程を系統的にモニタリングするために、これまでに掘削したボーリング孔に既製のモニタリング装置を順次設置し、地下水の圧力計測等の長期観測を実施中である。この長期計測により、幌延のような地質環境に対する本装置の適用性、耐久性及び測定精度等も確認する。

東濃地科学センターにおいて技術開発が進められてきたアクロス (ACROSS: Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) を応用した、遠隔監視システムの構築を行っている⁶⁾。ここで構築したシステムを地下施設の建設前から建設中、建設後まで稼働させることにより、建設に伴う周辺の地質環境の変化等を観測し、同技術の有効性を確認する。これまでに観測装置の設置に適した場所を選定するため、環境ノイズデータの解析結果をもとに、実際にアクロス信号(電磁波及び弾性波)を送信した場合の信号強度の空間分布や時間変化の検出に必要な観測時間の見積もりなどを行い、送受信装置の設置場所を決定した。2004年度には、電磁アクロスの送受信装置を設置し、地下施設建設前の状態を把握するための試験観測を

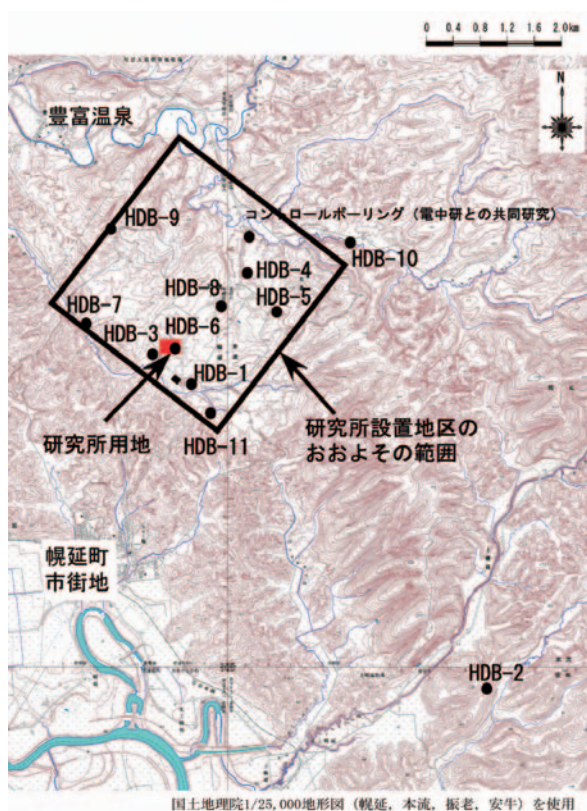


図4 ボーリング調査実施位置

開始した。2005年度には弾性波アクロスの送受信装置を設置し、試験観測を開始する。

(3) 地質環境の長期安定性に関する研究

地層処分の長期的な安全性を確保するためには、地層処分システムの性能が長期に亘って維持されるような安定な地質環境を選定すること、天然現象による地質環境の変動を見込んで処分施設や人工バリアを適切に設計・施工し、その安全性を評価することが重要となる。そのためには、地震・断層活動等の天然現象について、その変動傾向、速度の変化及び天然現象によりもたらされる地質環境の変化を数万年以上の期間で評価・予測することが必要である。評価・予測に当たっては、過去の天然現象や現在の地殻変動を詳細に知ることが基盤となるため、それらを把握する評価手法等の研究開発を進めている。

地層に残された記録から幌延地域の地質構造発達史を明らかにするため、段丘面の分布やその形成時期の把握及び火山灰層の年代測定等を行い、地形発達史の解明に取り組んでいる。

一方、現在進行している地殻変動の特徴を把握するため、ボーリング孔内（深度138m）に1台、

地表に4台の地震計を設置して観測を実施している。また、電磁探査機器やGPS観測機器を設置して、地震発生前後における地下の電磁氣的性質の変化や地殻変動量等の観測を行っている。取得したデータは、防災科学技術研究所が設置した高感度地震観測網（Hi-net）⁷⁾や国土地理院のGPS全国連続観測網（GEONET）のデータと併合処理し、震源分布、地殻変動量とその傾向に関する解析を実施している。

(4) 深地層における工学的技術の基礎の開発

工学的技術の基礎の開発として、地下研究施設の基本レイアウト及び基本的な施工計画の策定を行っている。施工計画の策定では、地下施設における調査研究の他、施設の安全性を確保するために岩盤特性に応じた地下空洞の安定性を評価するとともに、可燃性ガスの湧出を前提に施設の通気や防災対策等の検討を進めている。また、アクセス方式については、立坑方式とスパイラル方式を比較検討した結果、経済性が良く工期の短い立坑方式を採用することとし、安全性の観点から立坑3本方式とした⁸⁾（図5）。

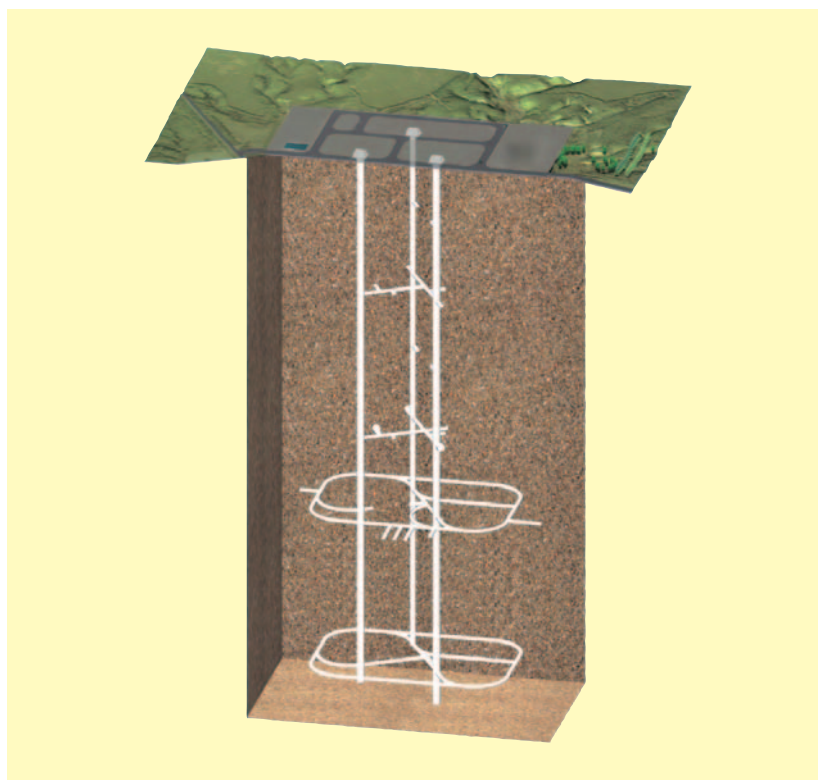


図5 地下施設レイアウトのイメージ図

このイメージ図は、今後の調査研究等の結果次第で見直すことがあります。

5.2 地層処分研究開発

地層処分研究開発については東海事業所と連携して進めており、処分技術の信頼性向上に係わる研究では、主に第2段階以降に地下研究施設を用いて行う試験研究計画の具体化のための検討を行っている。また、安全評価手法の高度化に係わる研究については、安全評価に必要なデータの項目、量、精度の確認及びモデルの適用と改良を行うこととしている。

(1) 処分技術の信頼性向上

人工バリアの搬送定置や支保工材料、坑道閉鎖、周辺岩盤を含む人工バリアの長期挙動に関して、第2段階以降に地下研究施設で行う原位置試験計画（目的、内容及びレイアウト等）の検討を進めている⁹⁾。

支保工材料に関する原位置試験計画の具体化のために、低アルカリ性セメントの施工性に関する室内試験を行った。施工に関しては、低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの施工試験を行い、普通コンクリートと同等の施工性を持つことを確認した。現在は目標とする低アルカリ性（ $\text{pH} \leq 11$ ）の達成時期を確認するための試験等を行っている¹⁰⁾。

原位置試験での人工バリアの仕様を具体化するため、地下施設深部で遭遇すると考えられる塩水系地下水環境における緩衝材等として使用するベントナイト材料の力学特性に関する室内試験を行っている。ボーリング孔（HDB-6孔）から採取した地下水を用いて、一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験等を実施し、その結果を基にオーバーパックの沈下挙動等の解析を行った。その結果、塩水系地下水環境において、オーバーパックの沈下量は10,000年後で30.9～35.4mmと見積もられた¹¹⁾。同様の手法で、淡水系地下水環境での沈下量は30.9～31.2mmとなっており¹²⁾、塩水系の場合と大差ない結果が得られたが、塩水系での試験データ数が少なく解析精度が低いことから引き続き試験を行い解析精度の向上を図っている。

また、第2次取りまとめ¹³⁾で示した人工バリア設計手法の実際の地質環境への適用性を検討するため、幌延の地質環境データを用いた人工バリアの試設計に関する検討を行った¹⁴⁾。

(2) 安全評価手法の高度化

第2次取りまとめ¹⁵⁾で示した安全評価手法の実際の地質環境への適用性を確認するとともに、

その過程において安全評価に用いるモデルや評価手法を改良することにより、その信頼性を高めるために、以下の検討を進めた。

研究所設置地区及びその周辺地区について、文献情報やボーリング調査等から得られる地質環境データを用いて、取得データの安全評価への取り込み方法や取得データの増加による解析結果への影響、その不確実性の変化等について確認し、安全評価において扱うべき重要な地質環境データの項目や現象の整理並びにデータに求められる量や精度等を明らかにするための研究課題の整理を進めた。

また、東海事業所と協力して、安全評価に用いるデータの拡充のため、幌延のボーリングコアを用いて、水理／トレーサー試験及び核種の収着試験等を実施中である。

6. おわりに

幌延深地層研究計画における深地層での研究を通じて得られた成果は、処分事業の推進や国が進める安全規制の策定等へ反映する。また、多くの人に深地層やそこで行われる研究を実際に見て体験して頂くことにより、深地層の環境や地層処分についての理解を進める場としての整備を進めていく。さらに、研究を進めるにあたっては、広く国内外の機関の参加と協力を得ながら、開かれた研究を推進していく。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会（廃棄物処理処分課題評価委員会）：“平成13年度研究開発課題評価（中間評価）報告書”，（2001）。
- 2) 山崎眞一，中司昇，他：“幌延深地層研究計画 平成13年度調査研究結果と研究所設置地区選定”，JNC TN1400 2002-017（2002）。
- 3) 保柳康一，宮坂省吾，他：“衝突帯のタービダイト相形成とテクトニクス—中新世・中央北海道の例—”，地団研専報31, pp. 265-284（1986）。
- 4) 岡孝雄：幌延町の地質，新幌延町史（2000）。
- 5) 森谷武男：“北海道とその周辺における地震のメカニズム解から推定される地殻内部応力場”，月刊地球 Vol. 21, No. 9, pp557-564（1999）。
- 6) 大原英史，津久井朗太，他：“幌延深地層研究計画—遠隔監視システム（アクロス）の概要—”，地球惑星科学関連学会2005年合同大会予稿集（2005）。
- 7) 岡田義光，笠原敬司，他：“Hi-net(1) 概要”，日本地震学会講演予稿集（2000）。
- 8) 白戸伸明：“幌延における地下施設の検討状況 平成14年度地層科学研究情報・意見交換会要旨集”，

- JNC TN7410 2002-006 (2002).
- 9) 栗原雄二, 油井三和, 他: “幌延深地層研究計画における処分技術に係わる原位置試験概念の検討”, JNC TN8400 2004-002 (2004).
- 10) 入矢桂史郎, 田島孝敏, 他: “幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究 (Ⅳ)”, JNC TJ5400 2003-008 (2004).
- 11) 高治一彦, 重野喜政, 他: “幌延の地下水環境下におけるペントナイト混合材料の力学特性に関する研究”, JNC TJ5400 2003-007 (2004).
- 12) 高治一彦, 重野喜政, 他: “緩衝材長期力学挙動構成モデルの検討 (Ⅲ)”, JNC TJ8440 2003-007 (2004).
- 13) 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次取りまとめ一分冊2地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022 (1999).
- 14) 栗原雄二, 油井三和, 他: “人工バリア等の設計検討および幌延の地質環境を条件とした原位置試験環境の検討”, JNC TN8400 2004-006 (2004).
- 15) 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次取りまとめ一分冊3地層処分システムの安全評価”, JNC TN1400 99-023 (1999).