

# 幌延深地層研究所における堆積岩の調査研究

地層処分研究開発部門  
幌延深地層研究ユニット  
ユニット長 福島 龍朗

## 1. はじめに

独立行政法人 日本原子力研究開発機構（原子力機構）が進める幌延深地層研究計画は、北海道幌延町に分布する新第三紀以降の堆積岩を対象とした「地層科学研究（深地層の科学的研究）」と「地層処分研究開発」に関する調査研究計画である。計画全体は約 20 年間にわたり、3つの調査研究段階に分かれている。第1段階は「地上からの調査研究段階」、第2段階は「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階」、そして第3段階は「地下施設での調査研究段階」である。幌延深地層研究計画の第1段階は、平成13年3月から開始し、平成18年3月に終了した（原子力機構、2006）。現在は、第2段階に入っており、地下施設を建設しながら調査研究を進めているところである。本報告では、平成13年3月から平成18年3月の約5年間にわたり実施した第1段階の調査研究における深地層の科学的研究の実施内容と成果を取りまとめた、「幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究調査報告書分冊『深地層の科学的研究』（太田他、2007）」について概説する。

## 2. 幌延深地層研究計画における調査研究の目標

幌延深地層研究計画では、①深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備、②深地層における工学技術の基盤の整備、③実際の地質環境での地層処分技術の適用性確認、を全体目標としている。「地層科学研究（深地層の科学的研究）」では、地質環境調査技術開発、地質環境モニタリング技術開発、深地層における工学技術の基礎の開発、及び地質環境の長期安定性に関する研究の4つの研究課題を設定し、「地層処分研究開発」では、処分技術の信頼性向上、安全評価手法の高度化の2つの研究課題を設定した（サイクル機構、2005）。

幌延深地層研究計画の第1段階においては、上記の全体目標及び研究開発課題を踏まえて、深地層の科学的研究に関して、次の2つの段階目標を設定した。

- ①「地上からの調査研究における地質環境モデルの構築及び坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握」
  - ②「地下施設の詳細設計及び施工計画の策定」
- 以下に2つの目標の概要を示す。

### 1) 地上からの調査研究における地質環境モデルの構築及び坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握

地上からの調査研究を通じて、地下深部の地質環境に関する情報を取得し、地下施設建設前の未擾乱の地質環境の状態について、特に、地層処分にとって重要な地質環境特性やプロセスに着目して、その理解を深める。また、取得した情報の統合と解釈を通じて、地質環境モデルの構築と解析を段階的に行い、その妥当性を評価することにより、堆積岩を対象とした地上からの体系的な調査・評価技術の整備を図る。

### 2) 地下施設の詳細設計及び施工計画の策定

地下施設の安全な建設・維持と調査研究のための環境の確保を前提として、地上からの調査研究において取得した地質環境情報、地下施設内で実施される調査研究の計画、及び現状の施工技術に基づき、地下施設の仕様及びレイアウトを検討するとともに、地下施設の設計・施工計画を策定する。また、施工計画の策定においては、地下施設の建設が周辺環境へ可能な限り影響を与えないように配慮する。

### 3. 第1段階の研究成果報告書（分冊「深地層の科学的研究」）の構成

幌延深地層研究計画における第1段階の研究成果報告書（分冊「深地層の科学的研究」）は、第1段階における深地層の科学的研究の成果を取りまとめたものであり、全7章から構成されている。2章「幌延深地層研究計画・第1段階における深地層の科学的研究の概要」では、第1段階における深地層の科学的研究の目標や進め方について概括した。3章「研究所設置地区及び研究所設置場所の選定」では、選定プロセスの各段階における基本的な考え方、選定の要件や結果などを記述するとともに、調査を実施する区域あるいは用地の選定という実経験を通じて確認した選定上の要件や考慮すべき条件とその重要性について記述した。4章「地上からの地質環境の調査研究」では、地層処分にとって重要な地質環境特性やプロセスに関する調査研究の成果をまとめ、堆積岩を対象とした地上からの体系的な調査・評価技術とともに、実際の調査研究を通じて得られた技術的知見などを整理した。5章「深地層における工学技術の基礎の開発」では、地下施設の仕様及びレイアウトや、地下施設における安全確保などに関する検討を通じて整備した堆積軟岩における地下施設の設計・施工計画技術について記述した。6章「地下施設建設に伴う周辺環境への影響調査」では、地上及び地下を対象とした環境影響評価の事例を取りまとめた。最後の7章「おわりに」では、3章から6章までの記述を踏まえて、第1段階における深地層の科学的研究の成果を総括するとともに、今後の展開について記述した。

### 4. 地質環境の調査研究の段階的な進め方と実施内容

第1段階の地質環境の調査研究については、幌延町全域を対象とした調査研究と研究所設置地区及びその周辺を対象とした調査研究の2つの段階に分けて実施した。幌延町全域を対象とした調査研究は、第1段階の前半に実施し、研究所設置地区（地上からの調査研究を主に展開する約3km×3kmの領域）及び研究所設置場所（地下施設の建設場所）を選定した。また、研究所設置地区及びその周辺を対象とした調査研究については、第1段階を通じて、上記の「地層科学研究」における課題に対する調査研究を実施した。また、地下施設等の建設に伴う周辺環境への影響を把握するために、環境調査や地質環境モニタリングなども継続的に進めた。

#### 1) 幌延町全域を対象とした調査研究

幌延町全域を対象とした調査研究（平成13年度末～平成14年度の約2年間）では、幌延町全域から、地質学的要件、社会的条件、土地利用状況等を考慮して、研究対象とすべき主要な領域を段階的に絞り込むことにより、研究所設置地区及び研究所設置場所を選定した。幌延町全域から研究所設置地区及び研究所設置場所を段階的に絞り込むにあたっては、既存情報を用いた調査から、空中物理探査、地表からの調査（地上物理探査及び地表地質調査）、ボーリング孔（HDB-1及び2孔）を利用した調査へと、調査の対象領域のスケールとそれに応じた地質環境情報の精度に留意して調査を実施した。

#### 2) 研究所設置地区及びその周辺を対象とした調査研究

研究所設置地区及びその周辺を対象とした調査研究（平成14年度～平成17年度の約4年間）では、研究所設置地区及びその周辺の地質・地質構造、岩盤の水理、地下水の地球化学、岩盤力学等の地質環境についての特性把握やその中の重要な地質構造である大曲断層の位置や性状の把握などに主眼を置いた。本調査研究は、①既存情報を用いた調査、②地表からの調査、③ボーリング孔を利用した調査、の3つに大別できる。地表からの調査とボーリング孔を利用した調査については並行して実施し、特に地層処分にとって重要な地質環境の特性のひとつである大規模不連続構造（大曲断層）の位置や地層の分布を把握するための地上物理探査や、ガスや石油を胚胎する堆積軟岩を対象とした掘削技術などの個別の調査技術開発に重点を置いた。地質環境調査においては、基本的に、「計画の立案」→「調査の実施」→「調査結果の評価」→「計画の修正や新たな計画の立案」を繰り返すアプローチを採用した。

### (1) 既存情報を用いた調査

研究所設置地区の選定にあたって収集した文献情報（公開論文や報告書など）と、広域的に実施した調査（空中物理探査，地上物理探査，地表地質調査，HDB-1 及び 2 孔における深層ボーリング調査）で新たに取得した地質環境情報に基づき，研究所設置地区及びその周辺の地質環境特性を概括的に把握した。また，この結果を踏まえて，地表からの調査及びボーリング孔を利用した調査の計画立案を行った。

### (2) 地表からの調査

大曲断層などの大規模不連続構造の位置や性状を把握することを主な目的として，地表地質調査及び浅層ボーリング孔を用いたガス調査を実施するとともに，反射法地震探査及び電磁探査を実施した。また，地下水流動解析において上部境界条件の設定に必要な地下水涵養量を算定するために，研究所設置地区及びその周辺の流域を対象に表層水理調査を実施し，さらに，地球化学モデルの構築に必要な表層水（河川水や浅層地下水）の地球化学特性を把握するために，水質調査を実施した。

### (3) ボーリング孔を利用した調査

ボーリング孔を利用した調査では，上述した浅層ボーリング孔を利用した調査及び深層ボーリング孔を利用した調査を実施した。深層ボーリング孔を利用した調査は，研究所設置地区の地質構造，特に大曲断層の位置や性状の把握，地下施設の設計に必要な地質環境特性に関するデータの取得，モデル化・解析において必要となる研究所設置地区内及びその境界付近における地質環境情報の取得を主な目的として実施した。研究所設置地区及びその周辺では，研究所設置地区の選定段階において HDB-1 孔を掘削しており，そこで得られた地質環境情報や調査の目的などを考慮したうえで，研究所設置地区の全域に偏りが少ないように調査地点を選定し，深層ボーリング孔（掘削長 470m～1020m）を新たに 9 孔（HDB-3～11 孔）掘削した。これらの深層ボーリング孔では，主として稚内層と声問層を対象の地層として，地層処分にとって重要な地質環境の特性である地質構造特性，岩盤の透水性や力学特性，地下水の水質の分布を三次元的に，かつ精度よく把握することに重点を置いて調査（コア観察，物理検層，水理試験，採水調査，力学試験など）を行った。また，これらの調査終了後はボーリング孔内に長期モニタリング装置を設置し，地下水の水圧及び水質のモニタリングを実施した。

## 5. 深地層における工学技術の基礎の開発

第 1 段階における深地層の工学技術の基礎の開発では，主に稚内層と声問層を対象地層として，地表からの調査により得られた地質環境情報，地下施設内で実施される予定の調査試験の計画，現状の施工技術を考慮して，坑道の仕様・レイアウトを検討するとともに，地下施設の建設・供用時において地下深部で遭遇する様々な現象を考慮した坑道の安全確保，坑内環境の維持のために必要となる対策工，施工管理方法について検討し，地下施設の設計・施工計画を策定した。具体的には，地下施設の事前設計技術については，稚内層と声問層を構成する堆積軟岩における不連続面に起因する岩盤挙動発生の可能性を考慮するため，ヘアークラックに着目した地山区分及び岩盤物性値の設定方法を提案した。また，地山強度比の低い条件下での掘削工事に際して，二重支保構造の概念を導入し，掘削後の空洞の安定性を保持しつつ，岩盤及び支保工に掘削開放応力を合理的に負担させることで，支保設計の合理化を実現した。さらに，地下施設における代表的な部位での地震に対する安定性の検討を行い，地下施設の耐震性能照査に関する検討手法を整理した。

施工計画技術としては，大深度立坑の自由断面掘削機による掘削工法の計画を策定した。掘削土（ズリ）や地下水に含まれる特定有害物質への対応については，各種法令や関係機関との調整結果を踏まえ，周辺環境への影響を考慮した処理方法を策定した。さらに，地下施設内での安全確保の観点から，坑内作業環境対策，坑内情報管理システム，火災時対策，可燃性ガス対策などの計画を立案するとともに，坑内火災時に発生する浮力による通気主流の

逆転現象や、水平坑道の風門を開閉した場合の通気挙動などを実験により確認した。

## 6. 成果とその反映

第1段階における調査研究で得られた成果については、処分事業における概要調査や精密調査における地上からの調査及び国による安全規制における安全審査基本指針等の策定を支援する技術基盤として整備することを念頭に取りまとめた。ここでは、整備した技術基盤の中で、①要素技術開発、②不確実性の低減、③調査手法の体系化と信頼性向上、④総合的な調査の例示、の4項目について、それぞれの代表例を示す。

### 1) 要素技術開発：地球化学調査技術

- ・堆積岩中の地下水の地球化学特性の評価においては、地下水やコア等のサンプリング手法ならびに分析手法の品質管理が重要である。
- ・堆積岩中の地下水の地球化学特性を把握するための地下水採取方法として、ボーリング孔からの揚水による方法とコアから間隙水を抽出する方法を組み合わせることにより、地下水水質の3次元分布に関する評価の信頼性が向上する。
- ・コアから間隙水を抽出する際には、掘削水のコアへの浸透、コア保管中の水-岩石反応系の変化、酸化、脱ガス等による間隙水水質の変化、間隙水が少ない場合の分析誤差に留意する必要がある。また、コアに含まれる鉱物の吸着水や層間水が抽出されることにより間隙水の希釈を生じる可能性があることも考慮する必要がある。
- ・コアの酸化は、間隙水水質の分析値に影響を与える重要な要因となるが、コア採取後直ちに間隙水を抽出することやコアのラッピングを行うことにより、コアの酸化の影響を低減できる。

### 2) 不確実性の低減：地下水水質の空間分布の推定

- ・調査においては、「計画の立案」→「調査の実施」→「調査結果の評価」と繰り返すアプローチを採用することにより、新たな調査結果を用いて過去の調査結果の評価・修正を行うことが重要である。これにより、調査量の増加に応じた不確実性低減の様子を定量化できるとともに、対象領域の地質環境特性の分布と傾向が把握できる。
- ・地下水水質の空間分布は、対象領域で深層ボーリング調査を実施することによって得られる深度方向の地下水水質分布を3次元的に補間することにより概括的に推定することができる。補間方法としては地質統計法や比較的単純な逆距離加重法などがある。
- ・幌延においては、第1段階で合計11本の深層ボーリング調査を段階的に実施したが、その結果、大規模不連続構造である大曲断層を挟んで東側の領域と西側の領域で地下水水質の分布状態が異なることが明らかになった。

### 3) 調査手法の体系化と信頼性向上：大規模不連続構造の3次元分布の推定

- ・大曲断層のような物質の移行経路として重要な大規模不連続構造の3次元分布や性状の把握にあたっては、露頭での観察やリニアメント調査等の地表踏査、反射法地震探査や電磁探査等の物理探査及び深層ボーリング調査を体系的に組み合わせて実施し、各調査結果を相互に対比することにより、統合した解釈を得ることが重要である。
- ・深層ボーリング調査は、地質構造や地層境界等に関する詳細な深度方向1次元の地質・地質構造、水理特性、地下水水質、岩盤力学特性に関する情報を直接取得することができる。当該地点において物理探査により得られる弾性波や比抵抗等のデータの解釈を検証することができる。
- ・物理探査によって得られる弾性波や比抵抗等のデータの空間分布は、当該地域に分布する大規模不連続構造等の重要な地質環境特性の空間的な広がり(3次元分布)に起因して生じると考えることができ、これと深層ボーリング調査や露頭調査の結果と対比することにより、データの解釈の信頼性を向上させることができる。
- ・幌延のような塩水系地下水が支配的な地域において観察される地表部から地下深部へと連

続して分布する高比抵抗ゾーンは、大規模不連続構造に沿って天水起源の地下水が浸透している部分に相当する可能性があることが推定された。

#### 4) 総合的な調査の例示：研究所設置地区及び研究所設置場所の選定

- ・対象地区を選定するにあたっては、選定のための要件とその重要度・優先度を明確にする必要がある。考慮すべき選定のための要件は、地質環境要件（調査対象の地層が地下深部に適度な層厚で広く分布していること、地下水が存在すること等）、地形要件（調査の展開や施設建設において有利なこと等）、安全要件（地下施設を安全に建設でき、安全な作業環境を確保できること等）、社会的条件（調査のための許認可や用地取得が容易なこと等）、道路状況、土地利用状況及び利害関係者の意向などである。
- ・調査の対象領域のスケールに応じた調査手法とそこで取得される地質環境情報の精度を考慮して調査を実施することが肝要である。調査の実施にあたっては、a) 文献などの既存情報の調査による広域を対象とした地質環境要件を満たす複数区域の選定、b) 複数区域から安全要件、社会的要件、地形要件等を考慮した対象区域の絞り込み、c) 絞り込んだ対象区域から道路状況、土地利用状況、利害関係者の意向などを考慮した対象領域の選定、d) 選定した対象領域における詳細な地質環境調査の実施、と手順を踏んで進めるとともに、対象領域の絞り込みの各段階における調査結果や選定理由等について積極的に情報公開を行うことにより調査の透明性を確保することが重要である。
- ・調査計画の策定においては、「調査」→「データの解釈」→「モデル化・解析」→「地層処分において重要な地質環境特性やプロセスの理解」を合理的に進めるために系統的なデータの流れを記述・整理した統合化データフローを作成することが有効である。これにより地下施設の建設・施工、人工バリアの信頼性向上及び安全評価手法の高度化へと反映先を明確にした地質環境調査を行うことができる。

#### 7. 現状と今後の予定

幌延深地層研究計画では、平成 17 年度から、第 2 段階の坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究を実施しており、平成 19 年 3 月末までに、換気立坑及び東立坑ともに、調査研究の対象となる堆積岩層の上部（換気立坑：深度約 50m、東立坑：深度約 40m）までの掘削を行った（原子力機構 幌延深地層研究センター、2007）。また、坑道掘削に伴い露出する坑道壁面における地質観察等や坑道掘削に伴う周辺地質環境の変化を把握するための各種モニタリング調査を連続的に実施している。今後、安全及び環境保全に配慮しながら坑道掘削（地下施設の建設）を進める一方、第 2 段階において、深地層の科学的研究と地層処分研究開発が密接に連携し、調査研究がより合理的及び体系的に進められるように、調査研究の基本的な考え方や計画の具体化を早急に図っていく予定である。さらに、その計画に基づき、調査研究を本格的に展開しながら、第 1 段階で残された課題の解決に向けて取り組む。また、坑道掘削時に得られる情報に基づき、地下施設あるいは坑道の近傍の地質環境を対象にして、地層処分にとって重要な地質環境特性やプロセスの理解を深めていくとともに、地上からの調査研究で構築した地質環境（地質構造、岩盤水理、地球化学、岩盤力学）モデルや地下施設建設による地質環境の変化の予測結果について、その妥当性を評価しながら、地上からの体系的な調査・評価技術の信頼性を確認していく。一方、深地層における工学技術の基礎の開発については、地下施設の設計手法・施工技術の適用性を実際の施工を通じて確認するとともに、地下坑道の設計・施工計画の策定、施工対策、安全確保や維持・管理に関する工学技術の整備・高度化を進めていく。

#### 参考文献

- 核燃料サイクル開発機構（2005）：平成 16 年度研究開発課題評価（中間評価）報告書、評価課題「幌延深地層研究計画」、JNC TN1440 2005-002。  
日本原子力研究開発機構（2006）：幌延深地層研究計画 平成 17 年度調査研究報告、JAEA-Research

2006-073.

日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター (2007) : 幌延深地層研究計画 平成 18 年度調査研究成果報告.

太田久仁雄 他 (2007) : 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044.