高レベル放射性廃棄物地層処分の初期調査段階における 水理・物質移行モデル化と不確実性 — ENTRY2003国際ワークショップの概要—

内田雅大*

The goal of flow and mass transport modeling and its uncertainty during initial site investigation of High Level Radioactive Waste Disposal — A summary of ENTRY2003 International Workshop —

Masahiro UCHIDA *

Abstract

Several countries including Japan are planning to select a site for the high-level radioactive waste disposal by step by step approach. Among the site selection phases, the initial site investigation phase is considered to have greater uncertainty due to the limited amount of site investigations.

JNC held an international workshop on October 22-24, 2003 to discuss the goal of modeling at this phase, the level of uncertainty and the investigation methods useful to reduce uncertainties. This paper presents a summary of discussion during the international workshop.

The goal of modeling at this phase differs between the crystalline rocks and sedimentary rocks, since the former tends to have greater degree of heterogeneities due to fractures/faults and require more boreholes and widely exposed outcrops which are generally not available, whereas the latter is more homogeneous and requires less understanding of geologic structures in various scales. The goal for modeling the crystalline rocks at this phase is to understand the site rather than to perform the rigorous safety assessment. The regional scale and the site scale are more reasonably modeled than the block scale at this phase, because the outcrops and boreholes required to model the block scale are generally limited. However, Sweden has relatively abundant outcrops and aims at the block scale, as well. On the other hand, the goal for modeling the sedimentary rocks could be safety assessment, since these rocks are relatively homogeneous and the models for all scales could be constructed with greater confidence.

Uncertainties can be divided into the expected uncertainties and the unexpected uncertainties. An example for the former is the fracture network in the block scale and an example for the latter is the compartments in the crystalline rocks. Reduction in uncertainties can be achieved not only by increased amount of investigations but also by demonstrating that the hypothesis is supported

* 核燃料サイクル開発機構 ()
Japan Nuclear Cycle Development Institute

by the multiple-lines of evidence. In order to reduce the unexpected uncertainties, 1) demonstrating the validity of the concept through iterations of prediction and confirmation, 2) collecting baseline data as much as possible and carefully analyzing the trend of data, are also useful.

There is no single investigation method that can drastically reduce uncertainties and it is important to obtain the multiple-lines of evidence based on the various methods. However, examples of useful methods to reduce uncertainties are: flow logging and fluid logging to measure the transmissivity of the individual fractures, tracer experiments to derive flow porosity, and 3D seismic method to derive geologic structure in the sedimentary rocks.

Key Words: high-level radioactive waste, geologic disposal, site investigation, modeling, uncertainty

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分予定地の選定は、わが国を含む国々において段階的に進められることが計画されている。本稿では、その中でも特に最初の調査段階である初期調査段階は、限られた調査量となる場合が多く不確実性が高いと考えられることから、初期調査段階におけるモデル化の目標、この段階における不確実性、不確実性を低減する上で有効な調査方法について、サイクル機構が2003年10月22-24日に開催した国際ワークショップでの主要な議論の概要を述べる。初期調査段階におけるモデル化の目標については、結晶質岩と堆積岩とで異なり、前者については亀裂による不均質性があることと通常限られた露頭しかないため、厳密な安全評価よりもサイト特性の理解が中心となり、その中でも広域スケール、サイトスケールがモデル化の主な対象となる。ただし、露頭の程度が良い場合には、ブロックスケールも対象となる。一方、堆積岩においては、通常亀裂が少なく比較的均質とみなされるため、全てのスケールがモデル化の対象となり、ある程度の安全評価は可能と考えている国が多い。不確実性に関しては、予想される不確実性と予想されない不確実性があり、前者としてはブロックスケールにおける亀裂ネットワーク構造などがあり、後者としては結晶質岩におけるコンパートメント構造などがある。不確実性を低減させるためには、調査量だけではなく、Multiple-lines of evidence と呼ばれる相互依存性のない複数のデータが同一の作業仮説を支持することを提示する方法が有効である。予想されない不確実性を低減する上では、予測と検証を繰り返し行うことにより知見の正しさを確認することと、初期状態からの長期データの取得を行い、その変動を注意深く分析することが有効と考えられている。調査方法については、不確実性を低減可能な単独の方法はないが、Multiple-lines of evidence を示すため多岐にわたるデータを取得することが重要である。個別の有効な調査法として、個々の亀裂の透水性を測定可能な流量検層や流体検層、物質移行開口幅を評価するためのトレーサー試験、堆積岩の構造を把握するための三次元反射法地震探査などが示された。

キーワード：高レベル放射性廃棄物、地層処分、サイト特性調査、不確実性

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分は、わが国を始めてとして米国、カナダ、フランス、スペイン、スウェーデン、フィンランド、スイス等の先進諸国で計画が進められている。米国およびフィンランドでは、処分地点が決定され、特性調査が実施されており、特に米国ユッカマウンテンにおいて

は、調査坑道などに基づき最終環境影響評価報告書がまとめられ、連邦議会の承認を経て処分サイトの決定がなされている。我が国では、1976年に動力炉・核燃料開発事業団（現核燃料サイクル開発機構）により研究開発が開始され、1999年に我が国における地層処分の技術的信頼性が、「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—地層処分技術開発第2次取りまとめ

ー」(以下「第2次取りまとめ」)(サイクル機構、1999)において示された。これを受け、2000年5月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(通称「最終処分法」)(2000)が成立し、同年10月には実施主体として原子力発電環境整備機構(以下、「原環機構」)が設立され、2002年12月より候補地の公募が開始されている。

2. 高レベル放射性廃棄物の地層処分場とサイト選定

2.1 多重バリア機能と水理

地層処分場は、図1に示すように、ガラス固化体とこれを収納する金属性容器(オーバーパック)、さらにその外側に設置される緩衝材からなる人工バリアと処分場を取り囲む岩盤からなる天然バリアから構成される。それぞれが核種の移行を抑制するためのバリア機能を有しており、ガラス固化体はガラスの網目構造内に核種を保持し、低い浸出率により核種の移行を抑制する。オーバーパックには、耐食性に優れた金属が使用され、腐食劣化により密封性を喪失するまでの少なくとも1000年の間地下水の浸入を防止する。緩衝材は、透水性が低くかつ核種保持機能に優れるため、ガラス固化体と接触する地下水の量を制限す

るとともに、地下水中に溶け出した核種の移行を抑制する機能がある。岩盤は、低い透水性と岩盤内での収着やマトリクス拡散により核種の移行を抑制する。こうしたガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、岩盤が有する多重の移行抑制機能は、多重バリアと呼ばれている。また、この他に岩盤の持つ重要な機能は、人工バリアに対して安定した環境を提供することである。

地層処分において、水理特性は天然バリアの性能を支配する最も重要な要因の一つであるばかりでなく、人工バリアからの核種の移行にも大きな影響を及ぼす。「第2次取りまとめ」においては、データの不確実性が最大線量に与える影響が検討されており、透水量係数は、図2に示すように天然バリアのパラメータの中で最も強い影響を及ぼす可能性があることが示されている。透水量係数または透水係数とその不均質性は、移行経路や移行時間についても影響を与えることにより性能評価に大きな影響を与える可能性がある。一方、人工バリアの性能に対しても、人工バリア周辺岩盤の流量は、緩衝材外側の核種濃度を規定するため、緩衝材中を拡散で移行する核種の外側境界条件として影響を及ぼす。

このように、水理は地層処分の安全性を評価する上で、最も重要な現象の一つとすることができる。

図1 地層処分の多重バリアシステム (単位 mm) (サイクル機構、1999)

Fig. 1 Multi-barrier system in geologic disposal (unit:mm)(JNC, 1999)

2.2 サイト選定の段階

我が国においては「最終処分法」に基づき、高レベル放射性廃棄物の地層処分場の選定は、図3に示すように以下の3段階に分けて行われる予定である。

- ・概要調査地区の選定
- ・精密調査地区の選定
- ・最終処分施設建設地の選定

世界的に見ても、スウェーデン (SKB, 2001) やフィンランド (McEwen & Äikäs, 2000) においては、我が国と同じように段階を踏んでサイト選定が進められている。

我が国の概要調査地区の選定においては、文献情報に基づき、公募した地区の地質条件が明らかに適性の劣る地域に該当するかが検討される。その際の考慮事項としては、活断層、活褶曲、活撓曲は避けること、第四紀火山から15km以上離すこと、過去10万年の隆起量が300mを超える地域を避けること、母岩が第四紀の未固結堆積物である地域を含めないこと、経済的価値が高い鉱物資源が含まれる地域ではないことなどがあげられている。(原環機構、2002)。

精密調査地区の選定については、文献調査に基づき選定された地区に対し、物理探査やボーリン

グ調査を実施する概要調査が行われ、岩盤力学的条件や水理学的条件、地下水化学などが悪影響を及ぼすおそれがないかが調査される。最終処分施設建設地の選定については、精密調査が行われ、概要調査に引き続きボーリング等の調査を実施するとともに、坑道を掘削し地下での詳細な試験が実施され、それに基づき安全審査が行われることとなっている。

2.3 水理モデルのスケールと役割

岩盤中の地下水流動及びそれに伴う物質の移行は岩盤中の不均質性の影響を受けるため、各調査段階で何を目標にどこまで調査するかが課題となる。先に述べたように、水理学的条件に関しては、緩衝材周辺岩盤の流量と岩盤中に移行した核種の人間環境までの移行経路の2つの観点から検討を行う必要がある。これらの検討は、図4に示す3つのスケール (POSIVA, 1999a) と個々の亀裂中のチャンネル構造などの移行経路のスケールの以下の4つのスケールを考慮して行われる。

- ・広域スケール
- ・サイトスケール
- ・ブロックスケール (キャニスタースケール)
- ・移行経路スケール

注：図の白棒線は母岩中の移行距離100mのみを考慮した場合の最大線量。灰色線は母岩中の移行距離100mと断層破碎帯中の移行距離800mを考慮した場合の最大線量。

図2 天然バリアの不確実性が最大線量に及ぼす影響の解析例 (サイクル機構、1999より)

Fig. 2 An example of the influence of the data uncertainties in natural barrier on maximum dose (JNC, 1999)

広域スケールは、分水嶺や湖、海など境界条件が明瞭に定義される範囲を対象とし、より狭いサイトスケールの外側境界条件の提供を目的として実施される。サイトスケールは、処分場を含む数kmの範囲を対象とし、主として岩盤中に漏出した核種が人間環境に到る経路としての断層や岩盤の堆積構造等をモデル化し、移行経路の評価を目的として実施される。ブロックスケールは、人工バリアから最寄りの高透水性の断層までの健岩部における遅延の評価を目的として実施される。

フィンランドでは、処分坑道周辺の掘削影響領域とその近傍を、そこでの移行遅延のモデル化を目的としてキャニスタースケールと呼んでいる。移行経路スケールは、結晶質岩においては、単一亀裂の内部構造を表現したものであり、移行遅延プロセスの起きる場そのものを表現したモデルである。移行経路スケールは、ブロックスケールの一部として同時にモデル化する場合と、別個にモデル化する場合とがある。

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、

図3 我が国におけるサイト選定のステップ（原環機構、2002）

Fig. 3 Siting steps in Japan (NUMO, 2002)

図4 フィンランドにおけるスケール区分 (POSIVA, 1999a)

Fig. 4 Scales of modeling in Finland (POSIVA, 1999a)

安全評価の視点だけでなく、天然バリアに対する我々の理解のレベルを示すことが重要であり、これらの全てのスケールを対象とする必要がある。

安全評価の視点からみた各スケールの重要性に関しては、移行経路スケールは遅延評価上最も重要であるが、他の3つのスケールに関しては核種移行上重要な不均質性がどのスケールで生じているかに依存しており、岩盤の種類によって異なってくる。亀裂が主たる移行経路となる結晶質岩においては、遅延効果は透水性の低い健岩部で期待されることから、健岩部に含まれる亀裂の評価が重要であり、ブロックスケールが重要となる。

一方、堆積岩については、一般に新第三紀以降(諸外国ではジュラ紀など古いものも含まれる)のものは亀裂が少なく、主要な不均質性は、堆積構造や断層などのサイトスケールの地質構造なのでサイトスケールが重要となると考えられている(Delay et al., 2004)。堆積岩の場合、透水性の低い母岩中においてしばしば異常間隙水圧が観測さ

れている(Gautschi, 2001, Delay & Cruchaudet, 2004)が、この場合母岩中の地下水化学のプロファイルと合わせた解釈が重要な課題となる。しかしながら、最近わが国の新第三紀堆積岩でも亀裂が水理上影響を及ぼす可能性があるとの知見が得られつつあり(畑中ほか, 2004)、ブロックスケールも今後重要となる可能性がある。

一方、処分場の岩盤をボーリングで調査した場合、ボーリング孔が潜在的な移行経路となる可能性があるためなるべく少ないボーリング本数で調査することが望ましいと考えられている。特に、概要調査においては調査量が限定されたものになるため、得られる地質構造の精度が課題となる。また、花崗岩等の結晶質岩においては亀裂が存在したり、堆積岩については堆積構造が存在するなど不均質性を有しており、モデル化上の課題となっている。さらに、地層処分固有の課題として、高レベル放射性廃棄物には半減期の長い核種が含まれるため、通常1万年以上の評価が必要と

され、このため過去の水理・地下水化学の変遷を理解した上で、将来の変化について検討する必要がある。

3. 国際ワークショップの概要

上記の視点に立ち、2003年10月22日~24日にかけて核燃料サイクル開発機構東海事業所において、初期調査段階（我が国の概要調査に相当。物理探査と数本の深掘りボーリングを実施するレベル。）におけるモデル化のあり方と不確実性の低減に関する国際ワークショップ、ENTRY2003（Ishikawa et al., 2004）が開催され、米国、フランス、スイス、スウェーデン、フィンランド、ハンガリー、韓国、日本の8カ国の専門家が集まり活発な議論が行われた。ここでは、その議論の要点を述べる。

3.1 初期調査段階における各スケールのモデル化の目標

広域スケール、サイトスケール、ブロックスケール、移行経路スケールの4つのスケールのモデルについては、それぞれ地質構造、水理地質構造、地下水水質の空間分布を考慮する必要がある。この場合、各分野毎に重要な不均質性がどのスケールであるかにより各スケールの重要性が異なる。例えば、地下水水質では比較的大きなスケールでの不均質性（時には数10m規模で変化する場合もある）が存在するが、水理については大きなスケールから小さなスケールそれぞれで不均質性が存在することが多く、結晶質岩の場合は性能評価上ブロックスケールが重要となる。結晶質岩の場合においては、性能評価上ブロックスケールが重要であるが、初期調査段階における目標は、一般に調査量が少なく詳細な地質構造を把握することが困難なため安全評価よりもサイト特性の理解に重点が置かれ、広域・サイトスケールのモデル化に重きが置かれる。亀裂等の不均質性の少ない堆積岩の場合には、調査量への依存度が少ないため文献調査段階で行った予測の確認が目標に置かれる。

広域・サイトスケールにおいては、主要な断層構造の把握と母岩の特性の把握に基づき、構造に

囲まれた良好な特性を有する母岩が一定の広がりを持つことの把握、大局的な流動系の把握、境界条件の把握、流出域¹⁾の概略推定が主要な課題と考えられている（POSIVA, 1999b）。このうち、流動系については、微生物活動も考慮した地下水化学の起源との整合性、水質の将来変化の予測が課題と考えられている（Pitkänen et al. 1998）。ただし、流出域については我が国においては表層部に被圧帯水層が存在する場合もあるので、表層水理の理解の重要性が指摘された。この他に、母岩の岩盤強度が処分場建設に適切な強度を有していることを確認すること、岩盤の熱的特性が妥当であることを確認することも重要と考えられている（Anttila et al, 1999）。

ブロックスケール・移行経路スケールについては、結晶質岩においては個々の亀裂のモデル化が要求されるため、堆積岩とは取扱いが大きく異なっている。結晶質岩に関しては、母岩の露頭の状況に応じて各国での目標レベルに違いが見られた。最も露出状況の良いスウェーデンの場合には、初期調査段階でのモデル化が可能と考えているのに対して、スイスのように厚い堆積岩で覆われている場合では初期調査段階におけるブロックスケールや移行経路スケールのモデル化は困難と考えられている。フィンランドは、スウェーデンに較べると岩盤の露出が少ないため、一般的パラメータを原位置のデータと矛盾しない範囲で使用して評価するレベルと考えている。我が国においても、スウェーデンほど露出は良くないことや全く露出しない場合もあり得るので、この点を考慮してモデル化の目標を設定する必要があると考えられる。

一方、堆積岩に関しては、母岩がスイスやフランスのオパール質粘土層のような均質な堆積岩の場合には、初期調査段階からでも反射法地震探査等の物理探査を活用することにより少数のボーリングでも移行経路スケール（ボーリングコアのスケール）、ブロックスケール、サイトスケールのモデル化が可能と考えられている（Delay et al, 2004）。

また、岩盤の透水性によってモデル化の重点が異なる。例えば、スイスのオパール質粘土では透水性が低く拡散支配となるためコアスケールの移

行経路スケールまたはそれ以下のスケールのモデル化が重要となる。一方、亀裂が卓越する結晶質岩においては、遅延の場としての移行経路スケールおよびブロックスケール、経路としてのサイトスケールが重要となる。

モデル化に際して重要なことは、複数の独立した証拠で現象理解の妥当性を示すこと (multiple-lines of evidence) である (OECD/NEA, 2003)。その際に、定量的データだけでなく定性的データも活用することが重要となる。例えば、流動系の妥当性を示す際には、水頭だけではモデルの自由度が高いため、水質、放射性同位体、鉱物分布などとの整合性を示すことが重要となる。

3.2 不確実性とその課題

不確実性には、存在が予測されるものと予測されないものが存在する。調査に際しては、予測される不確実性に対しては、その存在の有無を確認する調査を行い、予測されない不確実性に対しては、モニタリングを初期状態から連続的にを行い、なるべく多くの情報を得るとともに、データの変動の有無を注意深くチェックすることにより予測しない現象が起きていないかを確認することが重要である。

不確実性の低減は、調査量の増加だけにより達成されるものではなく、予測と検証を繰り返し行うことにより知見の正しさを確認することと、異なる分野のデータから統一的な解釈が得られるか

を検討する (multiple-lines of evidence) ことが有効である。例えば、水理学的データだけでは概念モデルに対する拘束の程度は低いが、水質データなど他のデータについても統一的に説明可能な概念モデルを構築することにより不確実性を低減することが可能となる。

国際ワークショップにおいては、初期調査段階における予測される不確実性の例として、ブロックスケールにおける亀裂ネットワーク構造、空洞安定性、堆積岩中の不均質性 (例：米国 WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) サイトにおける岩塩の透水係数と不均質性 (図5)) が挙げられた。予測されない不確実性の例としては、釜石鉱山でサイクル機構が明らかにしたコンパートメント構造²⁾ (図6) (Sawada et al., 2000)、スウェーデンの花崗岩中の健岩部における大量湧水 (SKB, 2004)、多孔質な花崗岩の出現 (Möller et al., 2003) などが挙げられた。今後、我が国におけるサイト特性調査における不確実性を評価し、また効率的に不確実性を低減させる調査を計画する上で、調査の種類や量に応じてどのように不確実性が低減されたかを整理しておくことは有効と考えられる。

3.3 調査技術、調査手順の最適化

調査手法については、単独の手法に頼るのではなく、Multiple-lines of evidence (OECD/NEA, 2003) として複数の手法を相補的に用いることが

図5 米国 WIPP サイトにおける概念モデルの変遷

Fig. 5 Evolution of the conceptual model of the WIPP site, USA

重要ということが各国の認識として示された。

水理学的調査の方法については、岩盤に亀裂等の卓越流路が存在するか否かにより大きく異なる。卓越流路が存在しない場合には、通常のダブルパッカーによる透水試験でボーリング孔全体の累積透水量係数を調査すれば良いが、亀裂等の卓越流路が存在する場合には、POSIVA 流量計³⁾ (図7) (Öhberg & Rouhiainen, 2000) による流量測定または流体検層 (電気伝導度検層)⁴⁾ (図8) (竹内ほか, 2004) が有効である。前者は、10cm 毎の透水性を調査可能という特徴を有している。後者は、測定限界が低いのが特徴であるが、大きな湧水ゾーンがあるとその上方での小さな湧水が識

別しにくいという欠点がある。

重要な調査としては、亀裂性媒体についてはトレーサー試験が物質移行開口幅を評価する上で重要である。また、長期揚水試験も水理学的連結性と岩盤の平均的かつ巨視的特性を把握する上で有効である。

堆積岩においては、反射法地震探査が断層構造の把握に有効である。二次元反射法地震探査は広域を対象に実施され、より詳細な構造が把握可能な三次元反射法地震探査は、限定された領域に対して実施されている。

3.4 Multiple-lines of evidence の重要性

不確実性を低減させるとともに、評価の信頼性を高める上で、近年 Multiple-lines of evidence (独立した複数の証拠: 筆者訳) の重要性が諸外国で認識されてきている。前にも述べたように、水理を理解する上で水頭自体のモデルに対する拘束

図6 釜石鉱山 (花崗閃緑岩) におけるコンパートメント構造による全水頭の不連続性 (Sawada et al., 2000)

Fig. 6 Compartments and discontinuous heads in the Kamaishi mine (granodiorite) (Sawada et al., 2000)

図7 POSIVA 流量計 (Öhberg & Rouhiainen, 2000)

Fig. 7 POSIVA flow log (Öhberg & Rouhiainen, 2000)

a 測定概念図

b 測定結果(20℃での温度補正後のプロット、図中の数字はデータ取得順位を示す)

c 原位置水理試験結果と電気伝導度検層に基づく解析結果による透水性の比較

図8 流体検層(電気伝導度検層)の適用例(竹内ほか、2004)

Fig. 8 Fluid log (electric conductivity log) and an example of its application (Takeuchi et al., 2004)

力は弱くモデルの自由度は高い。しかし、そこに地下水化学や同位体の空間分布の情報を重ねることによりモデルの自由度を低減することが可能となる。このように、独立した複数の証拠を用いて、統一的に現象を説明しようとするのが Multiple-lines of evidence の考え方である。スイ

スでは、処分場の母岩となるオパール質粘土中の地下水に含まれる ^2H および ^{18}O の分布が拡散で説明できることから母岩の低透水性を示している(図9) (Gimmi et al., 2004)。

重要なことは、定量的データだけでなく、定性的データも利用価値が高いということである。例

図中■、□、●、○は実測値。破線は拡散モデルの結果。青破線は25万年間、赤破線は50万年間、緑破線は100万年拡散が継続した場合の ^2H 、 ^{18}O の濃度分布を示す。

モデルでは、Malm および Keuper には新しい水を有する広域帯水層があり、Dogger 中の古い地下水は拡散で移動するものと仮定。

図9 オパール質粘土中の同位体比とモデル解析との比較 (Gimmi & Waber, 2004)

Fig. 9 Isotope ratios in Opalinus clay and comparison with model prediction (Gimmi & Waber, 2004)

例えば、英国セラフィールドにおいては海水準変動に伴う塩淡境界の移動範囲を検討する上で、亀裂内で成長する方解石結晶の形状が淡水領域と塩水領域で異なることに着目し、過去における塩淡境界の移動が狭い範囲でしか起きなかったことを示している (Milodowski et al. 1998)。

また、興味深い試みとして揚水試験時等の水圧変化による岩盤の変形を傾斜計で測定することにより断層などの卓越流路を抽出する技術も開発されてきている (Vasco et al. 2001)。

水理に関する Multiple-lines of evidence としては、以下のデータが利用されている。

- ・地下水化学 (同位体含む)
- ・亀裂充填物質
- ・温度
- ・地殻歪

わが国においても、水理と地下水水質を合わせた研究はなされてきている (例えば、五十嵐ほか、2000) が、今後さらにこの分野での技術の蓄積が望まれるところである。

4. まとめと水理関連の課題

これまで述べてきたように、水理は地層処分安全評価を行う上で極めて重要な要素である。地層処分においては、従来の水理とは異なり、核種を含む地下水と岩盤との相互作用が重要であるため、亀裂を有する岩盤の場合個々の亀裂中のチャンネルとその内部構造までモデル化する必要がある。このため、広域スケール、サイトスケール、ブロックスケール、移行経路スケールなどの大きなスケールから小さなスケールまでの各スケールでのモデル化とその整合性を図ることが必要となる。各スケールの重要性は、核種移行上重要な不均質性がどのスケールで生じているかに依存する。移行経路スケールは、核種の移行遅延の生じる場そのものであり、岩種を問わず重要である。それ以外のスケールについては、亀裂が主たる移行経路となる結晶質岩においては、ブロックスケールが重要となる。一方、透水性の低い堆積岩においては、地層の重なりや断層などのサイトスケールの地質構造と異常間隙水圧のモデル化が重要となる。各調査段階における目標を設定するに

当たっては、上記で述べた重要な不均質性に対する調査可能性を考慮することが重要である。例えば、結晶質岩の場合におけるブロックスケールの取り扱い、岩盤の露出状況などを考慮して決定すべきであると思われる。また、不確実性を低減させるためには、物理探査と少数のボーリングからなるべく多くの情報を引き出すとともに、multiple-lines of evidence の考えに従い、複数の独立したデータから共通の傾向を示すことが重要な課題と考えられる。また、予期されない不確実性の出現に対して、初期状態からの変化をモニタリングで観測し、かつ得られるデータを注意深く観察することにより予測と異なる変化を捉えるようにすることが重要と思われる。さらに、初期調査段階においては、サイトから得られるデータは限られたものとなる可能性があるので、他のサイトや室内試験などから得られた一般的知見を活用することも重要である。

注

- 1) ここでの流出域は、処分場を通過した地下水が地表に浸出する地域のことであり、流動系全体での排水域とは区別する必要がある。英語では“exfiltration area”と呼ぶことがある。
- 2) コンパートメント構造は、水理学的連結性の乏しい亀裂ネットワーク構造を指す。現象的には、岩盤内が水頭または水質の異なる複数の領域に分かれており、個々の領域内では水理学的によく連結しているが、異なる領域間では、水圧変化が伝播しないなど水理的に隔離されている。コンパートメント構造は、我が国の釜石鉾山の花崗閃緑岩、米国 Cigar Lake、スウェーデンの Äspö 島で報告されている。
- 3) POSIVA 流量計のプロープは、プロープの上下にそれぞれバックカーの代わりにゴム製の円盤が4枚設置され、試験区間を隔離する。ロッド内部は、試験区間より下方からの流れをバイパスするようになっており、測定区間およびボーリング孔内の全水頭を一定に保つようになっている。試験区間からの湧水は、バックカー上方の流量計に導かれ、流量を測定した後、ボーリング孔内に戻される。測定は、揚水量を2段階に分けて実施され、最小10cm ピッチでプロープを移動させて行われる。その結果、10cm の精度で透水

量係数を測定することが可能となる。パッカーの移動と間隙水圧の安定までの待ち時間がないため、1箇所の測定は10~15分、移動を含めて20分で行うことが可能である。

- 4) ボーリング孔内を電気伝導度の異なる水で置換し、湧水に伴う孔内の電気伝導度の時間変化を測定する。電気伝導度の時間変化から、湧水区間から湧水する地下水の電気伝導度と透水量係数を解析的に評価する。POSIVA 流量計と同様、何段階か揚水量を変化させ、揚水を行いながら測定する。プローブには電気伝導度計を使用し、一回の揚水時に数回ボーリング孔内を測定し、電気伝導度の時間変化を測定する。1000m 級のボーリングの測定を3~4日で行うことができる。

参考文献

- 五十嵐敏文・馬原保典・塩崎 功 (2000): 地下水モデリングのためのデータ解析手法の基礎 4. 地下水環境状態のモデリング 4.1 水質解析・環境同位体・トレーサ、日本地下水学会誌、42、243~262.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999): 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—、サイクル機構技術資料、JNC TN 1410 99-020~024.
- 原子力発電環境整備機構 (2002): 概要調査地区選定上の考慮事項、高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公衆関係資料—3.
- 竹内真司・下茂道人・城まゆみ・Chin-Fu Tsang (2004): 電気伝導度検層による深部花崗岩中の水みちの抽出と水理特性の評価、第33回岩盤力学に関するシンポジウム、451~456.
- 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律、平成12年6月7日、法律第117号.
- 畑中耕一郎・内田雅大・下茂道人・山本 肇・熊本 創 (2004): 亀裂を有する軟岩の透水性および物質移行特性に関する室内実験、第33回岩盤力学に関するシンポジウム、313~318.
- Anttila, P., Ahokas, H., Front, K., Hinkkanen, H., Johansson, E., Paulamäki, S., Riekkola, R., Saari, J., Saksa, P., Snellman, M., Wikström, L. and Öhberg, A. (1999): Final disposal of spent nuclear fuel in Finnish bedrock — Olkiluoto site report. POSIVA Report 99-10, 206p.
- Delay, J. and Cruchaudet, M. (2004): Hydraulic monitoring of low-permeability argillite at the Meuse/Haute Marne underground research laboratory, Proc. 1st EurEngGeo Regional International Association of Engineering Geologists Symposium, Liège, Belgium (to be published).
- Delay, J., Lesavre, A. and Doe, T. (2004): The French Underground Research Laboratory at Bure as a precursor for deep geologic repositories, 32nd International Geological Congress, Florence, Italy (to be published as a Geological Society of America Special Paper).
- Gautschi, A (2001): Hydrogeology of a fractured shale (Opalinus Clay): Implications for deep geologic disposal of radioactive wastes. — *Hydrogeology Journal*, 9, 97~107.
- Gimmi, T. and Waber, H. (2004): Modeling of profiles of stable isotopes, chloride, and chlorine isotopes of pore water in argillaceous rocks in the Benken borehole, Nagra NTB 04-05 (in print).
- Ishikawa, H., Yui, M., Uchida, M. and Kamei, G. (2004): ENTRY 2003 —The International Workshop on Reliable Performance Assessment through Laboratory Experiments and Ground Surface Investigations—, 10th Anniversary of ENTRY, 核燃料サイクル開発機構、JNC TN8200 2003-004, 144p.
- Lappin, A.R. and Hunter, R.L. eds., Garber, D.P. and Davies, P.B. ass. eds. (1989): System analysis, long-term radionuclide transport, and dose assessments, Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), Southeastern New Mexico; March 1989, Sandia National Laboratories SAND89-0462, 684p.
- McEwen, T. and Äikäs, T. (2000): The site selection process for a spent fuel repository in Finland — Summary report, POSIVA Report 2000-15, 224p.
- Milodowski, E., Gillespie, R., Naden, J., Fortey, J., Shepard, J., Pearce, M. and Metcalfe R. (1998): The petrology and paragenesis of fracture mineralization in the Sellafield area, west Cumbria, Proc. of the Yorkshire Geological Society 52, 215~241.
- Möller, C., Snäll, S. and Stephens, M.B. (2003): Forsmark site investigation — Dissolution of quartz,

- vug formation and new grain growth associated with post-metamorphic hydrothermal alteration in KFM02A, SKB P-03-77, 56p.
- OECD/NEA (2003): First Workshop on building confidence using multiple lines of evidence. Proceedings of Amigo Workshop, Yverdon-les-Bains, Switzerland 3-5 June, 2003.
- Öhberg, A., and Rouhiainen, P. (2000): Posiva groundwater flow measuring techniques. POSIVA Report 2000-12, 81p.
- Pitkänen, P., Luukkonen, A., Ruotsalainen, P., Leino-Forsman, H. and Vuorinen, U. (1999): Geochemical modelling of groundwater evolution and residence time at the Olkiluoto site. POSIVA Report 98-10, 184p.
- POSIVA (1999a): Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olukiluoto and Romuvaara - TILA-99. POSIVA Report 99-07, 253p.
- POSIVA (1999b): The final disposal facility for spent nuclear fuel, Environmental Impact Statement. POSIVA, 232p.
- Sawada, A., Uchida, M., Shimo, M., Yamamoto, H., Takahara, H. and Doe, T.W. (2000): Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the Kamaishi Mine, Northeast Japan. *Engineering Geology*, **56**(1), 75~96.
- SKB (2001): Site Investigations —Investigation methods and general execution programme—, SKB Technical Report TR-01-29, 264p.
- SKB (2004): Preliminary site description —Forsmark area— version 1.1, SKB R-04-15, 523p.
- U.S. Department of Energy (1980): Final Environmental Impact Statement, Waste Isolation Pilot Plant, U.S. Government Printing Office, DOE/EIS-0026.
- Vasco, D., Karasaki, K. and Kishida, K. (2001): A coupled inversion of pressure and surface displacement. *Water Resources Reserach*, **37**(12), 3071~3089.

(受付: 2004年8月2日、受理: 2005年4月15日)