派生断層の成長による地層処分システム周辺の 地下水流動への影響評価

高井 静霞^{1,*}, 武田 聖司¹, 酒井 隆太郎^{1,†},
島田 太郎¹, 宗像 雅広¹, 田中 忠夫¹

Evaluation of Influence of Splay Fault Growth on Groundwater Flow around Geological Disposal System

Shizuka TAKAI^{1,*}, Seiji TAKEDA¹, Ryutaro SAKAI^{1,†},
Taro SHIMADA¹, Masahiro MUNAKATA¹ and Tadao TANAKA¹

¹Environmental Safety Research Group, Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy
Agency, 2-4 Shirane, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

(Received April 19, 2016; accepted in revised form August 22, 2016; published online December 27, 2016)

In geological disposal, the direct effect of active faults on geological repositories is avoided at the stage of site characterization; however, uncertainty remains for the avoidance of faults derived from active faults, which are concealed deep under the ground and are difficult to detect by site investigation. In this research, the influence of the growth of undetected splay faults on a natural barrier in a geological disposal system due to the future action of faults was evaluated. We investigated examples of splay faults in Japan and set conditions for the growth of splay faults. Furthermore, we assumed a disposal site composed of sedimentary rock and made a hydrogeological model of the growth of splay faults. We carried out groundwater flow analyses, changing parameters such as the location and depth of the repository and the growth velocity of splay faults. The results indicate that the main flow path from the repository is changed into an upward flow along the splay fault due to its growth and that the average velocity to the ground surface becomes one or two orders of magnitude higher than that before its growth. The results also suggest that splay fault growth leads to the possibility of the downward flow of oxidizing groundwater from the ground surface area.

KEYWORDS: *splay fault, geological disposal of high-level radioactive waste, safety assessment, groundwater flow simulation*

I. はじめに

我が国の高レベル放射性廃棄物(以下, HLW)の地層処分は, 平成12年6月に公布された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(以下, 特廃法)に基づき事業化段階に入り, 平成14年12月以来, 現在事業主体である原子力発電環境整備機構による処分場候補地の公募が行われている。しかしながら, これまで公募に対して応募した自治体は1件に留まっており, その自治体もその後公募を取り下げるなど, 処分地選定は難航している。このことか

ら, 平成27年5月には, 特廃法の基本方針の改正が行われ, 処分地選定に当たっては国が前面に立って支援することが示された。長寿命核種を含む高レベル放射性廃棄物の地層処分では, 処分後数十万年先まで安全性を評価する必要があり, その間に起こり得る地震活動等の地質・気候関連事象による影響が懸念されている。処分場に著しい影響を与え得る地質・気候関連事象は, 特廃法によって立地選定の概要調査により回避することが求められている。しかし, 調査によって数十万年先の将来を予測することは難しいため, 事前に回避しきれない地質・気候関連事象の存在が指摘されている¹⁾。例えば地震活動に関しては, 活断層による処分施設への直接的影響(処分施設および廃棄体の直接破損など)は, 立地選定の段階で回避することとされている²⁾。しかし活断層を回避したとしても, 地下深部

¹ (国研)日本原子力研究開発機構 安全研究センター環境影響評価研究グループ

* Corresponding author, E-mail: takai.shizuka@jaea.go.jp

[†] 現在, (株)応用地質(OYO Corporation)

において活断層から派生した断層(以下、派生断層)については、予測や検出が困難なため事前に回避できない可能性が指摘されている¹⁾。派生断層を回避できない可能性が残された場合、将来数万年後に成長した派生断層が処分施設へ直接的影響を与える可能性がある。このような回避しきれない可能性のある事象について、万一事象が起こった場合の処分場への影響を定量的に評価し、将来の安全審査に向けて地層処分システム周辺の地下水流動および核種移行に与える影響評価の手法を整備しておくことは重要である。

そこで本研究では、地震活動に関する回避しきれない可能性のある事象の1つである、派生断層の成長による天然バリアへの影響評価手法を整備することを目的とする。まず、国内における派生断層の事例調査および探査技術の既往知見から、派生断層の成長に伴う地層処分システム周辺の地下水流動の変化により核種移行に影響を与える可能性のあるシナリオを整理し、定量的評価のための条件設定を行った。次に設定した条件に基づき、仮想的な堆積岩サイトにおいて派生断層の成長を仮定した水理・地質構造モデルを作成した。そして、作成したモデルを例として地下水流動解析を実施することで派生断層成長による天然バリアへの影響を定量的に評価し、一連の総合的な安全評価手法の流れを提示した。

II. 派生断層の成長に対する評価シナリオの設定

派生断層の成長に関する評価シナリオの構築のために、まず派生断層の形成過程を既往事例の地質学的知見より整理する。横手盆地東縁断層帯の事例において、逆断層型の主断層に伴う派生断層の過去数10万年間の形成過程が詳細に調査されている³⁾。派生断層の形成過程の概念図(Fig. 1)に示すように、主断層から分岐した断層はまず地層と水平に成長し(フラット)、地層に対して斜め方向に立ち上がる(ランプ)。その後、地震活動に伴い分岐断層が地表に向かって徐々に成長する。それに伴い分岐断層と主断層の間では地層が褶曲し(変形帯)、分岐断層の背後には構造性の堆積物が形成する。さらに、主断層と分岐断層の間には、分岐断層の共役系であるバックスラストが形成されることがある。以上の形成過程から、派生断層として、分岐断層(活断層から分岐した断層)とバックスラスト(分岐断層

の共役系として形成する断層)の2種類を考えることが必要と判断した。

次に、地下の処分施設への直接的影響のシナリオ作成のために、我が国における派生断層(分岐断層およびバックスラスト)の発生事例および代表的な探査手法の情報を整理した。派生断層の発生事例は、国内においては東北地方の逆断層、あるいは、近畿・中部地方の横ずれ断層において多く報告されている³⁻⁸⁾。国内で過去数10万年以内に活断層から発生した分岐断層およびバックスラストの調査例を、Table 1 および Table 2 に示す。

Table 1 より、分岐断層の発生位置は活断層から2～

Table 1 Splay faults generated in the past hundreds of thousands years

Fault zone	Distance from active fault	Type	Generation time
Eastern margin of the Yokote basin fault zone ³⁾	2~3 km		North : 600,000 years ago Center : 1,600,000 years ago
Eastern margin of the Tokachi basin fault zone ⁴⁾	10 km	Eastern slope Reverse fault	150,000 years ago (recurrence interval : 33,000~42,000 years)
Shinjo basin fault zone ⁵⁾	7 km		400,000 years ago (recurrence interval : 2,000~4,000 years)
Western margin of the Nagano basin fault zone ⁶⁾	2~6 km	Western slope Reverse fault	Before the middle Pleistocene (200,000 years ago) 300,000 years ago (recurrence interval : 5,000 years)
Ichinose fault group ⁷⁾	2 km		

Table 2 Back thrusts generated in the past hundreds of thousands years

Fault zone	Type	Generation time
Eastern margin of the Yokote basin ³⁾	Western slope	North : 150,000 years ago Center : 300,000 years ago
Fault associated with the 2008 Iwate-Miyagi-Nairiku earthquake ⁸⁾	Reverse fault	Tens of thousands years ago

Fig. 1 Evolution of splay faults³⁾ (partially revised)

10 km 程度離れていることがわかる。また Table 2 より、いくつかの分岐断層の事例に対しては、分岐断層に伴って共役系であるバックスラストが発生していることが確認できる。

地震・断層活動に関する探査手法に対する既往の調査結果^{1,2)}を Table 3 に示す。

調査手法ごとに適用条件や特徴・課題を比較すると、探査手法の適用性は地質の種類(堆積岩系、結晶質岩系)により異なり、また可探深度が大きな探査手法でも地下深部では分解能が低くなり、分岐断層の構造把握には適用限界が存在すると考えられる。また産総研(2012)¹⁾では、立地選定時に想定される地震・断層活動に関する探査手法の多くは 1 km 程度の可探深度をもつことが指摘されている。

以上の調査結果から、派生断層の成長による処分施設への直接的影響のシナリオを作成する。まず前提として、深度 300~500 m の処分施設は、活断層から数 km~10 km 程度の距離を確保した位置にあり、処分施設が建設されるサイトでは最適な探査手法により地下 1 km 程度の範囲までは派生断層等が存在しないことが提示できるとする。そ

の際、地下 1 km より深部において検出できなかった派生断層が伏在し、その後の地震活動に伴って分岐断層およびバックスラストが成長し処分施設を直撃すると想定する。ただし、派生断層はすべての活断層に対して普遍的に発生するものではないこと、本研究では派生断層の可探深度を約 1 km としたが、サイトによってはそれぞれの探査手法を適切に組み合わせることで、より深い範囲にある断層を探知できる可能性があることから、処分施設を直撃する可能性は極めて低いタイプのシナリオ、いわゆる既往の安全評価における What if シナリオや稀頻度シナリオ^{9,10)}として位置付けられると考えられる。本研究ではこのような前提条件のもと、「伏在する派生断層の成長」が処分施設を直撃した場合に想定される核種移行への影響シナリオとして、以下の 3 種類を設定した(Fig. 2)。

シナリオ 1：核種移行経路の変化

地震活動に伴って分岐断層やバックスラストが成長し処分施設を直撃すると、処分施設周辺の地下水流動系に変化が生じ、核種が生物圏に到達するまでの移行経路や移行時間に影響を与える。

Table 3 Typical geophysical survey methods^{1,2)}

Technique	Depth of investigation/Precision	Feature
Seismic reflection method	<ul style="list-style-type: none"> Depth of investigation Impactor : 1 km S-wave vibrator : 1.5 km P-wave vibrator : 5 km Spatial resolution Tens of meters 	<ul style="list-style-type: none"> This method can investigate deep underground with high precision. This method is effective for sedimentary rock layers. For crystalline rocks, clear reflection surfaces may not be obtained when density of rock and velocity change of seismic wave are small.
Seismic refraction method	<ul style="list-style-type: none"> Depth of investigation Shallow area : 100~200 m Deep area : 1~100 km Precision ± 10% against depth 	<ul style="list-style-type: none"> This method can detect distribution and scale of fault crush zone. Evaluation for displacement and slope of fault is difficult.
Electromagnetic method	<ul style="list-style-type: none"> Depth of investigation MT method : tens of kilometers CSAMT method : 1 km Precision One tenth of depth 	<ul style="list-style-type: none"> For sedimentary rocks, interpretation of resistance cross section may be difficult.
Gravity method	<ul style="list-style-type: none"> Depth of investigation tens of kilometers Precision 1 mgal 	<ul style="list-style-type: none"> The result depends on estimated models of density structure.

Fig. 2 Scenario for effect on radionuclide transport by growth of splay faults

シナリオ 2：地下水水質の変化

地震活動に伴って分岐断層やバックスラストが処分施設を直撃すると、地下水流動系が変化し、地表付近の酸性性地下水の深部への流入等により天然バリア内の水質分布の変化が起こる。これにより人工バリアを含む処分施設がさらされる水質環境の変化や天然バリアの核種移行経路上の水質の変化が生じ、各バリア材に求められる核種閉じ込めや移行遅延などの安全機能の低下に影響を及ぼす可能性がある。また、地下深部に被圧帯水層があるような地質構造の場合は、断層成長に伴い深部熱水が断層沿いに上昇する可能性がある。ただし、今回の解析で対象とする仮想的な堆積岩サイト(Fig. 5)では地質構造上そのような影響は小さいと想定されるため、評価対象から除外した。

シナリオ 3：人工バリアの安全機能の低下・喪失

伏在する派生断層が成長して処分施設を交差し、オーバーバック、緩衝材などの人工バリアおよび廃棄体が損傷することで安全機能が低下あるいは喪失する。

これらの3つのシナリオは、派生断層の成長に伴い複合的に発生する可能性が考えられるが、本研究では、分岐断層とバックスラストの成長による天然バリア内のシナリオに着目し、「シナリオ 1：核種移行経路の変化」と「シナリオ 2：地下水水質の変化」について定量的評価のための条件を設定し、処分場周辺の地下水流動および核種移行に対する影響評価を行う。

III. 派生断層の成長に対する評価手法の構築

1. 評価体系

派生断層の成長による地層処分システムへの影響評価は、以下に示す流れで実施する(Fig. 3)。

まず始めに、事例調査に基づく派生断層の条件設定・評価モデルを構築する。ここではII章において整理した知見を含む派生断層に対する事例調査の結果に基づき、地下

水流動解析を実施するために必要な断層に対する条件(成長速度および成長角度)を設定する。そして設定した条件に基づき、仮想的な堆積岩サイトに対する派生断層成長の評価モデルを構築する。派生断層の成長に対する定量的な力学モデルは現時点ではないため、本研究では断層の成長を透水係数の変化によって表現することにより評価することとした。

次に構築したモデルに対し、断層成長に伴う地質構造の変化を考慮した非定常地下水流動解析を実施し、天然バリアへの影響を評価する。本研究では、有限要素法による多孔質媒体中での2次元地下水流動評価コードMIG2DF¹¹⁾により解析を実施し、水頭・流速分布および塩分濃度分布の時間変化を算出した。さらに、MIG2DFと連動した粒子追跡法による移行時間・移行経路の解析コードPASS-TRACにより、処分坑道からの移行経路、流速および水質条件について整理した。

MIG2DFによる浸透流解析は、以下に示すダルシー則と連続の式に基づき実行する。

$$u_i = -K_{ij} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} (h_p + z) - \frac{\partial}{\partial z} \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} z \right] \quad (1)$$

$$C \frac{\partial h_p}{\partial t} = Q - \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2)$$

ここで、 u はダルシー流速、 K は透水係数、 $h_p = (P/\rho_0 g)$ は圧力水頭、 z は位置水頭、 ρ は流体の密度、 P は水圧、 ρ_0 は淡水の密度、 g は重力加速度、 C は貯留係数、 Q は揚水量である。また $C = \theta \rho_0 g (C^f + C^r) + C_w$ であり、 θ は体積含水率、 C^f は水の圧縮係数(=0.45 GPa)、 C^r は岩石の圧縮係数、 $C_w = d\theta/dh_p$ は比水分容量係数である。岩石の圧縮係数は派生断層成長時の力学的影響によって変化すると考えられるが、本解析では力学的な挙動は評価対象外としているため、解析では岩石の圧縮係数は一律に0とした。また、海水の密度を1.025 g/cm³、淡水の密度を1.0 g/cm³と設定した。

塩分濃度解析は、以下の移流分散方程式により実行する。

$$\theta \rho \frac{\partial c}{\partial t} + \theta \rho u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta \rho D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + Q \quad (3)$$

ここで、 c は塩分濃度、 $D_{ij} = D_T |u| \delta_{ij} + (D_L - D_T) \frac{u_i u_j}{|u|} + \theta D_d \tau \delta_{ij}$ は分散係数であり、 D_L は縦方向分散係数、 D_T は横方向分散係数、 D_d は分子拡散係数、 τ は屈曲度である。

本研究では天然バリアへの影響を評価することを目的とし、事例調査に基づく派生断層に対する条件設定・評価モデルの構築および地下水流動解析を実施した。

2. 事例調査に基づく派生断層に対する条件設定

派生断層の成長に対する定量的な影響評価を行うために、国内における派生断層に対する事例調査に基づき、派生断層の成長角度および成長速度の条件を設定した。

Fig. 3 Assessment system for effect of splay fault growth on geological disposal system

(1) 派生断層の成長角度

派生断層の成長角度は、国内で第四紀以降に活動した派生断層の調査結果に基づき設定した(**Table 4**)。

調査結果では分岐断層の成長角度は $30\sim 45^\circ$ 、バックスラストの成長角度は $40\sim 65^\circ$ と分岐断層より高角である。また断層変位に関する模擬実験でも、バックスラストの成長角度は分岐断層より高角となることが示されている¹⁵⁾。

以上より本解析では、派生断層の成長角度を分岐断層： 30° 、バックスラスト： 60° と想定した。

(2) 派生断層の成長速度

II章で示したように、断層が地下深部から地表に向かって成長すると、それに伴い断層の背後には構造的な堆積物が形成する(変形帯)(**Fig. 4**)。

断層の変形帯の厚さが反射法地震探査等によって明らかな場合、断層の平均的な成長速度は(断層の変形帯の厚さ)/(断層の立ち上がりから地表到達までの期間)で定義で

Table 4 Growth angle of splay faults after quaternary period in Japan

Fault zone	Splay fault	Back thrust
Noshiro fault zone ¹²⁾	45°	$45\sim 50^\circ$
Tsukioka fault zone ¹³⁾	35°	40°
	30°	$40\sim 65^\circ$
Yokote basin fault zone ³⁾	$30\sim 45^\circ$	$40\sim 55^\circ$
Fukaya fault zone ¹⁴⁾	45°	60°
Setting in this report	30°	60°

A. Formation of flat

B. Formation of ramp

C. Formation of deformation zone

Fig. 4 Growth of fault¹⁶⁾ (partially revised)

きると考えられる。例えば千屋断層北部の分岐断層は、60 万年前に活動を開始してからバックスラスト形成時(15 万年前)には地表に到達していると想定され、変形帯の厚さは 800 m である。断層の活動間隔が 3,500 年であることを考慮し、断層の成長角度を 30° とすると、分岐断層の成長速度は 12.4 m/1 回の地震活動と算出される。また光地園断層については、15 万年前に活動を開始してから高位-低位の河岸段丘に東側隆起の変位量 15 m(1 回の活動による変位量：3~5 m)を与えていることより^{17,18)}、5 回前後の地震活動で断層が形成したと想定される。変形帯の厚さについては、十勝平野東縁断層における地下での変形が深度 0.5~2 km に及んでいることを参考にする¹⁹⁾、光地園断層に対する断層方向の成長速度は最大で 500 m/1 回と推定される。このことから、分岐断層の成長速度はおおむね 10 数 m~500 m/1 回と推定される。バックスラストについては横手盆地東縁断層の事例しかないが、活動期間 15 万年、変形帯の厚さ 300 m より、断層の傾斜を 60° とすると 8.2 m/1 回となる。

ただし派生断層の成長速度に対しては情報が少ないことから、本研究では幅広い時間範囲を検討するために、1 回の地震活動当たりの派生断層の成長速度として、保守的なケースとして調査結果の最大値 500 m(ケース 1)、および、平均的なケースとして 100 m(ケース 2)の 2 ケースを想定した。また地震活動が起こる間隔は、国内 B 級活断層に対する平均的な値 5,000 年と仮定した。

3. 水理・地質構造モデルの構築

本評価では、幌延地域で得られている水理・地質データを参考にして、仮想的な堆積岩サイトに派生断層成長を仮定した水理・地質構造モデルを構築した(水平方向約 16 km、深度約 5 km)(**Fig. 5**)。

解析対象とした 2 次元断面は 3 次元の地質構造に対して直交する方向に設定しており、川沿いに標高を設定することで地表面は丘や谷がない滑らかな形状となっている。解析領域には、東縁に活断層が位置し、断層西側に背斜構造が存在する。上述したように、初期状態では調査により活断層は回避されているが、物理探査で検出しきれなかった分岐断層が処分場下に伏在すると仮定し、その後の地震活動に伴って分岐断層およびその後に形成されるバックスラストが成長して処分施設を直撃すると想定した。派生断層の形成位置は、モデルの褶曲構造を踏まえて背斜軸を挟んだ両翼部に形成されるものとして設定した。また、地層処分場のレイアウトに関する検討²⁰⁾によると、処分坑道の大きさは 1 本当たり長さ約 1 km、高さ約 5 m とされている。我が国においては、特魔法により処分施設の設置深度は地下 300 m 以深と設定されていることから、分岐断層およびバックスラスト周辺の深度 300, 400, 500 m 位置に処分坑道(長さ約 1 km、高さ約 5 m)が建設されると仮定した。

Fig. 5 Geological structure of evaluation model (red dashed line: growth of splay faults)

Table 5 Analysis case for growth of splay fault

Case	Growth velocity of splay fault per earthquake	Arriving time at a ground surface	
		Splay fault	Back thrust
1	500 m	15,000 years	40,000 years
2	100 m	55,000 years	165,000 years

Table 6 Hydraulic constant (z: depth (m))

Layer	Permeability k (m/s)	Porosity (%)
Layer 6	1.0×10^{-6}	60
Layer 5	$\log_{10}(k) = -0.0034z - 8.3665$ (max: 1.0×10^{-8} , min: 1.0×10^{-11})	60
Layer 4	$\log_{10}(k) = -0.0039z - 7.5935$ (max: 1.0×10^{-7} , min: 1.0×10^{-11})	60
Layer 3	$\log_{10}(k) = -0.0061z - 5.5626$ (max: 1.0×10^{-6} , min: 1.0×10^{-11})	40
Layer 2	5.0×10^{-10}	30
Layer 1	1.0×10^{-11}	20
fault (Layer 3~6)	$\log_{10}(k) = -0.0061z - 4.5626$ (max: 1.0×10^{-5} , min: 5.0×10^{-9})	50
fault (Layer 2)	5.0×10^{-9}	30
fault (Layer 1)	1.0×10^{-10}	20

また活断層の断層幅は、モデルとした大曲断層の場合、断層粘土と亀裂密集部からなるダメージゾーンを合わせると約 120 m と報告されている²¹⁾。派生断層の幅は活断層より小さいと考えられるため、本評価では活断層の幅を 100 m、分岐断層の幅を 50 m、バックスラストの幅を 25 m と仮定した。なお、地震活動に伴う地表の形状や地質構造の変化については、ここでは考慮しないこととした。

各解析ケースに対する分岐断層およびバックスラストの地表面への到達期間を、Table 5 に示す。

これより、地下深部に伏在する派生断層が地表面に到達

Fig. 6 Boundary conditions

するには、1 回の地震活動による成長速度が事例調査の最大値 500 m の場合でも、数万年かかることがわかる。

各地層に対する水理定数を Table 6 に示す。

水理定数は既往の研究による幌延地域の水理定数に基づいて設定しており^{22,23)}、亀裂性の堆積岩に対しては透水係数の深度依存性を考慮している。派生断層の透水係数に対する調査事例は報告されていないため、保守的に活断層と同じ値とした。また、地震発生後の透水係数の回復や、地震の度に断層の透水係数が増加し続けるといった報告はないため、本解析では断層の透水係数の経時変化はないものとした。

解析で設定した境界条件を、Fig. 6 に示す。本研究では断層の成長に着目した影響評価を行うために、気候変動を考慮した降雨条件を考慮せずに領域内が飽和状態にあるとして解析を行った。

また初期状態における塩分濃度分布を設定するために、幌延地域が過去数 10 万年以前に海底下にあったことを考慮して、全領域を化石塩水で満たした状態に対して Fig. 6 の条件で地下水流動を行い、おおむね定常となった 50 万

Fig. 7 Salt concentration at initial state

(a) Initial state

(b) After arriving of splay faults at a ground surface

Fig. 8 Groundwater flow velocity distribution before and after growth of splay faults (white dashed line: the position of splay faults)

年後の分布を使用した。解析の際は縦分散長を 100 m, 横分散長を 10 m とし, 分子拡散の影響は無視した。塩分濃度の初期条件を **Fig. 7** に示す。

以上で示した派生断層の成長を考慮した非定常解析は, 5,000 年間隔で起こる派生断層の成長に応じて地質構造モデルを入れ替え, 入れ替えの前後で圧力水頭および塩分濃度の計算結果を引き継ぐことにより, 連続的に実行した。また解析時間は派生断層の地表面到達時刻を見越して, ケース 1・2 とともに 20 万年間とした。

IV. 派生断層の成長に対する地下水流動解析

III 章に示した解析条件に基づき地下水流動解析を行っ

た結果を, 以下に示す。

(1) 派生断層の成長に伴う流れの変化

ケース 1 における初期状態と派生断層地表面到達後に対する領域全体の流速分布を, **Fig. 8** に示す。

派生断層の成長に伴う地下水流動の変化は大局的には小さいものの, 派生断層周辺では局所的に流速の増加や流れの方向の変化が起こっていることがわかる。また, 成長速度が異なるケース 2 においても, 断層成長前後の流れの様子はケース 1 と同様であった。

派生断層成長に伴う断層周辺での流れの変化を詳細に調べるために, 0, 5,000, 10,000, 15,000 年後の流動場に対する処分坑道からの流跡線の変化を求めた。処分坑道から放出される粒子は, その粒子が断層に対して下流, 交差

部、上流のどの領域から放出されたかによって、挙動が異なると推測される。そこで、処分坑道を断層に対して下流・中央・上流の3つの領域(幅 200 m)に分け、各領域において等間隔に 200 点発生させた粒子に対して流路解析を実施した。例として、各領域の midpoint を始点とした場合の流路を以下に示す。

(a) 分岐断層周辺における流れの変化

各時刻の流動場に対する分岐断層周辺の処分坑道からの流路解析の結果を **Fig. 9** に示す。

分岐断層より下流側にある処分坑道では分岐断層の成長

による影響をあまり受けない。一方分岐断層交差部・上流側にある処分坑道からの移行経路は、分岐断層成長に伴い断層に沿って上昇する経路に変化していることがわかる。よって分岐断層交差部および上流側に処分坑道がある場合、断層成長に伴い核種移行経路の変化が生じるものと考えられる。またこのとき、透水性の高い断層部を流れることで生物圏到達までの平均速度が増加すると考えられる。

(b) バックスラスト周辺における流れの変化

各時刻の流動場に対するバックスラスト周辺の処分坑道からの流路解析の結果を **Fig. 10** に示す。

Fig. 9 Change of flow path from disposal tunnel by growth of splay fault

Fig. 10 Change of flow path from disposal tunnel by growth of back thrust

Fig. 11 Change of average velocity from disposal tunnel (300 m depth) by growth of splay fault

バックスラストより下流側にある処分坑道では断層成長による移行経路への影響はみられないが、40,000年後においてはバックスラスト交差部・上流側にある処分坑道からの移行経路に対し、バックスラストに沿った下向きの流れが発生している。このことは、バックスラスト成長後に地表付近から酸化性地下水の流入が起こる可能性を示唆している。

(2) 派生断層の成長による核種移行経路の変化(シナリオ 1)

(a) 分岐断層

IV-(1)項において、分岐断層周辺では交差部および上流側に処分坑道がある場合、断層成長に伴い核種移行経路が変化し、地層に到達までの平均流速が増加する可能性があることを示した。ここでは平均流速の変化の程度について

て詳細に調べるために、IV-(1)項と同様に処分坑道を断層に対して下流・交差部・上流の領域に区分し、各領域において等間隔に200点発生させた粒子に対して流路解析を行い、各粒子が帯水層(対地深度40 m)に到達するまでの平均流速を求めた。ここで各領域の幅は200 mであるため、断層領域には断層と交差していない領域も含まれている。そのため、断層交差部では断層成長による影響に着目するために、断層交差位置より上流側の領域に対して結果を整理した。解析結果をFig. 11に示す。200点の粒子は様々な経路を取りばらつきが大きいので、平均値、5%および95%パーセンタイル値の箱ひげ図として整理した。

断層が成長しても断層下流側では平均流速は大きく変化しないことがわかる。一方断層交差部および上流側では、分岐断層が処分坑道に交差した後から平均流速が増加している。最も平均流速が増加するのは、全移行経路に対する断層部分の割合が大きい交差部からの移行で、最大で2桁程度増加している。上流側においても、断層部分を移行することで平均流速が1桁程度増加している。平均流速の増加の程度は断層の成長速度によらないものの、平均流速が最も増加する分岐断層地表面到達時期は、ケース1:1.5万年、ケース2:5.5万年と4万年のずれがある。第2次取りまとめ²⁴⁾での評価と同様にオーバーパックが1,000年で破損すると仮定した場合、この時期は処分施設からの核種漏えいが起こっていることから、断層の成長速度の違いが核種移行に影響を与える可能性が考えられる。この分岐断層の成長による流速増加が核種移行に与える影響を概略的に把握するため、HLWの重要核種の1つである⁷⁹Se(半減期: 2.95×10^5 年²⁵⁾)を例として、分岐断層地表面到達時に人工バリアから放出された⁷⁹Seが生物圏へ到達するまでの天然バリア中の移行時間を以下の式により簡易的に求めた。

$$t = \left(1 + \frac{1-f}{f} \rho Kd \right) \quad (4)$$

ここで、 t は移行経路上の各地層および断層における核種の移行時間、 $T=L/V$ は地下水の移行時間、 L は移行距離、 V は流速、 f は間隙率、 ρ は岩石の真密度、 Kd は分配係数である。岩石の真密度は、幌延堆積岩に対する調査結果に基づきすべて 2.4 kg/m^3 とした²⁶⁾。⁷⁹Seに対する分配係数は、幌延における該当地層が泥質岩であることから、第2次取りまとめでの泥質・凝灰岩に対する値 $0.01 \text{ m}^3/\text{kg}$ (降水系および塩水系)を使用した²⁴⁾。地下水の流速は、Fig. 11に示した断層交差部における平均流速の95パーセンタイル値の結果(ケース1およびケース2)を使用した。比較のため派生断層の成長が起らない場合について、1,000年で⁷⁹Seが放出されるとし、生物圏到達までの移行時間を求めた。その結果、派生断層の成長が起らない場合の⁷⁹Seの生物圏到達時期は 1×10^7 年オーダーとなり、⁷⁹Seの半減期 2.95×10^5 年との比較から十分に物理減衰した核種濃度レベルになる。一方、派生断層が成長す

るケース1と2では生物圏到達時期は60万年から70万年程度になり、物理減衰の影響が小さい核種濃度レベルになると推測され、派生断層の成長が生物圏での核種濃度の増加の要因になることが示唆される。

また、平均流速の増加傾向が大きな交差部において、深度方向に対する平均流速の比較を行った結果をFig. 12に示す。

分岐断層の成長による平均速度の増加傾向は処分坑道の深度には大きくよらないことがわかる。また、平均流速が最も増加する分岐断層地表面到達時においても、処分坑道の深度が300 mから500 mになっても中央値は1桁も減少しない。よって、処分坑道の深度の違いによる分岐断層の影響への寄与は小さいといえる。

(b) バックスラスト

バックスラストと交差する処分坑道からの移行についても、同様に解析を行った。解析結果をFig. 13およびFig. 14に示す。

IV-(1)項に示したように、バックスラストが地表面に到達するとバックスラストに沿った下向きの流れが形成されるものの、バックスラストに流入した粒子はすぐに断層外へと流出するため、処分坑道からの移行経路は断層が成長してもほとんど変わらない。そのため、地表到達までの平均流速に対する断層成長の影響は小さい。

(3) 派生断層の成長による地下水水質の変化(シナリオ2)

IV-(1)項において、バックスラスト周辺では断層成長に伴い断層に沿った下向きの流速が増加することで、処分坑道に地表付近の酸性地下水が流入する可能性があることが示唆された。幌延地域では酸化フロントが対地深度60 m程度であるという調査結果があることから²⁷⁾、ここでは地表付近の地下水がバックスラストに沿ってどの程度の深度まで流入する可能性があるのかを検討した。バックスラスト中の断層に沿った下向きの流速(深度100, 200, 300 m)の経時変化を求めた。その結果をFig. 15に示す。

Figure 15より、バックスラストが解析点に交差する時刻からバックスラストが地表に到達する時刻にかけて、ケース1および2とともにバックスラストに沿った下向きの流速はおよそ1桁増加していることがわかる。また、バックスラスト内の深度100 m, 200 m, 300 mにおける塩分濃度の経時変化を、Fig. 16に示す。

Figure 16より、バックスラストの成長に伴い断層内部では流れが大きく変化するため、塩分濃度の経時変化もバックスラストが成長する以前とは異なる挙動を示していることがわかる。その後バックスラストが地表に到達すると、深度100, 200, 300 mのすべての地点で急激に塩分濃度が低下し、淡水化が進んでいる。同じような傾向は、分岐断層周辺でもみられる。Fig. 17に初期状態における塩淡水境界を示す。

ここで塩淡水境界は淡水化率(=1-ある点での塩分濃度/

(a) Case1 (growth velocity: 500 m/earthquake) (b) Case2 (growth velocity: 100 m/earthquake)

Fig. 12 Change of average velocity from disposal tunnel (crossing part) by growth of splay fault

(a) Case1 (growth velocity: 500 m/earthquake) (b) Case2 (growth velocity: 100 m/earthquake)

Fig. 13 Change of average velocity from disposal tunnel (300 m depth) by growth of back thrust

(a) Case1 (growth velocity: 500 m/earthquake) (b) Case2 (growth velocity: 100 m/earthquake)

Fig. 14 Change of average velocity from disposal tunnel (crossing part) by growth of back thrust

塩水領域での鉛直方向に対する塩分濃度の平均値)が0.07となる位置としている。これは、幌延地域のボーリング調査結果に対する地下水の水素・酸素同位体比分析結果から求めた降水起源の水の混入率が0となる位置に相当するものである²⁸⁾。Fig. 17 から分かるように、初期状態においては分岐断層周辺では塩淡水境界は深度 300 m 付近に位置するが、バックスラスト周辺では塩淡水境界は深度 500 m

以深に位置する。よって、分岐断層周辺の処分坑道では断層の成長に伴い、水質が変化する可能性があると思定される。そこで、分岐断層周辺の処分坑道(深度 300 m)において、断層の下流・交差部・上流の各領域が塩水から淡水に切り替わる時期を算出した。その結果を Table 7 に示す。

処分坑道の断層交差部では、分岐断層が地表面に到達し

Fig. 15 Change of downward velocity along back thrust

Fig. 16 Change of salt concentration in back thrust

Fig. 17 Seawater/Freshwater interference at initial state

Table 7 Hydrogeological characteristics in disposal tunnel (300 m depth) across splay fault

Growth velocity of fault	Downward part	Crossing part	Upward part
500 m/earthquake	Freshwater	Seawater→ Freshwater (15,000 years)	Seawater→ Freshwater (70,000 years)
100 m/earthquake	Freshwater	Seawater→ Freshwater (45,000 years)	Seawater→ Freshwater (95,000 years)

た以降において、徐々に水質が切り替わる。これは、断層交差部の中央～下流側においては主に IV-(1)項に示した断層に沿った上向きの流れが形成しているが、断層交差部の上流側では標高の違いにより生じる上流からの流れの影響で断層に沿った下向きの流れも形成していることから、地表付近にある淡水が断層内部に流入するためである。

以上より、断層成長に伴ってバックスラストに沿った下向きの流れが増加し、また断層が地表面到達後に塩分濃度の急激な低下が起こることが、分岐断層・バックスラスト

ともに確認された。この結果は、派生断層が処分施設を直撃した場合、断層成長によって処分坑道に地表の酸化性地下水が流入することで、処分施設内の還元的な環境が変化し核種移行に影響をもたらす可能性を示唆している。このような変化が最も大きくみられたのは断層地表面到達時(ケース1: 40,000年, ケース2: 165,000万年)であったが、オーバーバックが1,000年で破損すると仮定した場合この時期には処分施設からの核種漏えいが起こっていることから、断層の成長速度の違いが核種移行に影響を与える可能性があると思定される。

V. まとめ

本研究では、事前に回避しきれない可能性のある事象である「派生断層の成長」に対する核種移行経路と地下水水質分布の変化に及ぼす影響評価を実施した。まず国内における派生断層の事例および探査技術の既往知見から、派生断層の成長に伴って核種移行に影響を与える可能性のあるシナリオを構築し、定量的に影響を評価するための条件設定を行った。次に、派生断層の事例調査に基づき仮想的な堆積岩サイトに対して派生断層成長を考慮した水理地質構造モデルを作成し、構築したシナリオに対して地下水流動解析を実施することにより、天然バリアへの影響を定量的に評価した。

解析の結果、派生断層成長に伴う①核種移行経路の変化と②地下水水質の変化の2つの影響シナリオに対し、次のような知見が得られた。

①核種移行経路の変化については、分岐断層の交差部および上流側において、分岐断層の成長に伴って移行経路が断層に沿って上昇する経路に変化する傾向がみられた。処分坑道が分岐断層と交差する位置(深度300m)にある場合、地表面到達までの平均流速は断層が処分坑道に交差した後から増加する傾向がみられた。最も平均流速が増加するのは、初期状態から数万年が経過した分岐断層地表面到達後であり、分岐断層近傍では2桁、300~500m上流では1桁程度平均流速が増加した。この結果は、分岐断層より上流側に処分施設を設置した場合、断層成長に伴い透水性の高い断層部を移行することによる生物圏への核種流出の早期化、および、生物圏での核種濃度の増加の可能性を示唆している。このとき、処分坑道の深度が500mまで下がったとしても、平均流速の増加の程度および傾向に大きな違いはみられなかった。また、断層成長速度に対する2つの解析ケースの結果から、平均流速の増加時期は断層成長速度に応じた分岐断層地表面到達時期の条件に大きく影響を受けることがわかった。

②地下水水質分布の変化については、分岐断層周辺において、分岐断層地表面到達後に地下水水質が塩水から淡水に切り替わることが確認され、分岐断層付近の水質がその成長速度に影響を受けることが確認された。またバックスラスト周辺においては、バックスラスト地表面到達後に、

バックスラスト内部において断層に沿った下向きの流れが1桁程度増加し、それに伴って塩分濃度が急激に低下し淡水化が起こる様子が確認された。これらの結果から、派生断層の成長に伴って酸化性地下水の流入が起こる可能性が示唆された。ただし、地表付近の酸化性地下水の流入に伴う地下での酸化性環境の形成については、化学計算に基づく議論が必要であるため、今後の課題として検討が必要である。

以上のことから、伏在する派生断層が成長し処分坑道に直撃した場合、処分坑道内の断層との交差位置において、核種移行経路の変化および地下水水質の変化が起こる可能性が示唆された。また派生断層が処分施設を直撃しなかったとしても、処分施設が派生断層より上流側にある場合には、派生断層の成長が処分施設からの核種移行に影響を与える可能性がある。したがって、既存文献に基づく過去～現在の地質構造発達史に関する知見を基に将来の派生断層の発生の可能性の高い領域を推定できる場合には、そのような領域での派生断層の成長が地下水流動場の変化に与える影響を検討しつつ処分パネルの設置を決めるなどの設計対応は重要と考えられる。このような核種移行への影響シナリオおよび、本研究で対象としなかった派生断層が成長し処分施設を交差することでオーバーバックなどの各人工バリアの安全機能が低下あるいは喪失するシナリオについて、核種移行の観点から派生断層の成長のシナリオの具体的な評価手法の整備を進める必要がある。また本評価では、派生断層に対する条件を設定する際に不確実性が大きい条件については保守的に設定している。水理・地質構造モデルについても、本評価では幌延地域を参考に解析を行ったが、実際には様々な水理・地質構造の条件に応じて流動場の傾向が変わる可能性がある。今後の課題として、派生断層の成長に関する様々なバリエーションや水理条件等に関する条件の感度解析により、これらの設定の不確実性に対する感度をより詳細に把握する必要がある。また設定した条件に対する信頼性を高めるため、派生断層に対する国内の事例調査により情報が更新されることが望まれる。

本論文は、原子力規制委員会原子力規制庁からの受託研究「平成26年度地層処分の安全審査に向けた評価手法等の整備」において実施したものであり、同事業の機会を頂いた原子力規制庁に感謝いたします。また本研究を実施するに当たり、首都大学東京の山崎晴雄教授から貴重なご意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。

—参考文献—

- 1) Research Core for Deep Geological Environments, *Technical Report on the Review and Assessment Features, towards the Submission of the Preliminary Field Investigations of HLW Geological Disposals*, Geological Survey of

- Japan Open File Report No.560, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (2012), [in Japanese].
- 2) Nuclear Waste Management Organization of Japan, *Safety of the Geological Disposal Project 2010 — Safe Geological Disposal Based on Reliable Technologies* —, NUMO-TR-11-01, Nuclear Waste Management Organization of Japan (2010), [in Japanese].
- 3) K. Kagohara, T. Imaizumi, T. Miyauchi, H. Sato, T. Uchida, T. Echigo, T. Ishiyama, N. Matsuta, S. Okada, Y. Ikeda, S. Toda, S. Koshiya, M. Noda, H. Kato, K. Noda, A. Miwa, H. Kurosawa, H. Kosaka, T. Nohara, “Active tectonics of the Senya hills and evolution of the Senya active fault, eastern margin of the Yokote basin fault zone, northeast Japan,” *J. Geogr.*, **115**, 691-714 (2006), [in Japanese].
- 4) M. Togo, *Bishochikei niyoru Katsudanso Handoku*, Kokon Shoin Co., Ltd., Tokyo, 206p., ISBN 477221416X (2000), [in Japanese].
- 5) H. Sato, H. Yagi, Y. Ikeda, T. Imaizumi, S. Ogino, T. Miyauchi, S. Toda, S. Hirano, N. Matsuta, T. Echigo, M. Tajikara, T. Ikawa, R. Sakai, Shinjo 97 Seismic profiling group, “Seismic reflection profiling across active folds in the eastern Shinjo basin, NE Japan,” *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **81**, 157-169 (2006), [in Japanese].
- 6) T. Miyauchi, D. Takeda, “Late Quaternary evolution and activity of the northern part of the western marginal fault zone of Nagano Basin, central Japan,” *Active Fault Res.*, **22**, 77-84 (2004), [in Japanese].
- 7) D. Miura, R. Hataya, S. Abe, K. Miyakoshi, D. Inoue, M. Nikaido, T. Tachibana, N. Takase, “Recent faulting history at the Ichinose Fault Group, southern part of the Itoigawa-Shizuoka tectonic line, central Japan,” *Zisin (J. Seismol. Soc. Jpn., 2nd ser.)*, **55**[1], 33-45 (2002), [in Japanese].
- 8) Y. Suzuki, M. Watanabe, T. Nakata, N. Koiwa, N. Sugito, Y. Kumahara, D. Hirouchi, H. Sawa, Y. Nakamura, N. Marushima, K. Shimazaki, “The active fault related to the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in Japan — Preliminary report of the earthquake fault in Genbi-cho, Ichinoseki city,” *Active Fault Res.*, **29**, 25-34 (2008), [in Japanese].
- 9) K. Miyahara, M. Inagaki, M. Kawamura, T. Ebina, ““What-if?” calculations to illustrate fault-movement effects on a HLW repository,” *Proc. IHLRWM 2008*, Las Vegas, United States of America, Sep. 7-11, 2008, 593-599 (2008), [CD-ROM].
- 10) Posiva Oy, *Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto — Formulation of Radionuclide Release Scenarios 2012*, POSIVA 2012-08 (2013).
- 11) H. Kimura, *The MIG2DF Computer Code User's Manual*, JAERI-M 92-115, Japan Atomic Energy Research Institute (1992), [in Japanese].
- 12) T. Miyauchi, *1:25,000 Toshiken Katsudansozu Noshiro Dansotai to sono Syuhen “Noshiro” “Moritake” Kaisetsusho*, Technical Report D1-No.604, Geospatial Information Authority of Japan (2012), [in Japanese].
- 13) H. Sato, T. Ishiyama, N. Kato, S. Abe, K. Shiraishi, H. Saito, M. Inaba, T. No, S. Sato, S. Kodaira, T. Takeda, M. Matsubara, “Tanshuku henkei wo koumutta haiko lift Niigata taiseki bonchi no tikaku kozo,” *Seismological Soc. of Jpn. Fall meeting*, Niigata, Japan, Nov. 24-26, 2014, 77 (2014), [in Japanese].
- 14) M. Takahashi, H. Hayashi, K. Kasahara, H. Kimura, “Geologic interpretation of the seismic reflection profile along the western margin of the Kanto Plain — With special reference to the Yoshimi metamorphic rocks and western extension of the Tonegawa Tectonic Line —,” *Jour. Geol. Soc. Jpn.*, **112**[1], 33-52 (2006), [in Japanese].
- 15) K. Ueda, *Kinematic Evolution of Fold and Thrust Belts: Insights from Experimental Modeling*, CRIEPI Research Report N10049, Central Research Institute of Electric Power Industry, (2011), [in Japanese].
- 16) K. Kano, A. Murata, *Kozo Chishitsu Gaku*, Asakura Publishing Co., Ltd., Tokyo, 298p., ISBN 4254162375 (1998), [in Japanese].
- 17) Japanese Society for Active Fault Studies, *Shinpen Nihon no Katsudanso — Bunpuzu to Shiryō*, University of Tokyo Press, Tokyo, 437p., ISBN 4130607006 (1991), [in Japanese].
- 18) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, *Tokachi Heiya Dansotai (Kochiendanso) no Katsudosei oyobi Katsudoreiki Tyosa*, “Katsudanso no hokan tyosa” Seika hokokusyo No.H24-1, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, (2013), [in Japanese].
- 19) T. Echigo, T. Miyauchi, T. Kawamura, H. Sato, E. Kurashimo, H. Kato, T. Ikawa, T. Kawanaka, M. Orito, T. Hasegawa, T. Ito, “Shallow seismic reflection profiling across the central part of the Tokachi active fault zone, Hokkaido, Japan,” *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **76**, 129-134 (2001), [in Japanese].
- 20) K. Tanai, K. Iwasa, H. Hasegawa, M. Gouke, M. Horita, M. Noda, *Investigations on Repository Layouts*, JNC TN8400 99-044, Japan Nuclear Cycle Development Institute (1999), [in Japanese].
- 21) E. Ishii, K. Yasue, T. Tanaka, R. Tsukuwi, K. Matsuo, K. Sugiyama, S. Matsuo, “Three-dimensional distribution and hydrogeological properties of the Omagari Fault in the Horonobe area, northern Hokkaido, Japan,” *Jour. Geol. Soc. Jpn.*, **112**[5], 301-314 (2006), [in Japanese].
- 22) H. Imai, I. Shiozaki, R. Yamashita, H. Kurikami, T. Niizato, Y. Kenichi, K. Maekawa, *The Effects of Long Term Evolution of Geological Environment on Groundwater Flow — A Case Study on Horonobe Area* —, Technical research report of Hazama Corporation, 39, Hazama Ando Corporation (2007), [in Japanese].
- 23) H. Kurikami, R. Takeuchi, S. Yabuuchi, S. Seno, G. Tomura, K. Shibano, M. Hara, T. Kunimaru, “Hydrogeological investigations of surface-based investigation phase of Horonobe URL project,” *Jpn. Soc. Civil Eng. C*, **64**[3], 680-695 (2008), [in Japanese].
- 24) Japan Nuclear Cycle Development Institute, *H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 3*, JNC TN1410 2000-004 (2000), [in Japanese].
- 25) ICRP, *Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations*, ICRP Publication 107. Ann. ICRP **38**[3], (2008).

- 26) T. Ogawa, H. Matsui, *Measurement of Seismic Wave Velocities on Soft-Sedimentary Rocks from Horonobe Under Confining Pressure*, JNC TN8400 2005-011 (2005), [in Japanese].
- 27) T. Hokari, *Estimation of In-situ Deep Groundwater Conditions Based upon Chemical Equilibrium Analysis*, Technical research report of Shimizu Construction Co., Ltd., 87, Shimizu Construction (2010), [in Japanese].
- 28) R. Sakai, M. Munakata, H. Kimura, *Study on Evaluation Methodology for Groundwater Flow Based on Geochemical Data — Case Study for Horonobe Area — (Contract Research)*, “JAEA-Research 2011-054, Japan Atomic Energy Agency (2011), [in Japanese].
-