人工地熱系の変質帯バリア

—放射性廃棄物の地層処分を対象として—

高橋 洋*

The Alteration Barrier in “Artificial Geothermal System” around a Repository of High-Level Radioactive Waste

Hiroshi TAKAHASHI*

Key words : 高レベル放射性廃棄物 high level radioactive waste, 変質帯バリア alteration barrier,
人工バリア engineered barrier, 天然バリア natural barrier

Abstract

The multibarrier system for deep geologic disposal of high-level, long-lived and heat generating radioactive waste has been devised in order to keep them away from human being. This system consists of engineering barrier and geological natural barrier. After burying the waste, an “artificial geothermal system” may be constructed because of heat from radioactive waste, and the artificial geothermal system would make some hydrothermal minerals and alteration zone, in host rocks.

Hosokura ore deposits were made by an “old geothermal system”, and have impermeable zones developed along some ore veins. In some active geothermal area in Japan, geothermal alteration zones seem to play as caprocks. That is, a part of geothermal alteration zones sometimes work as hydraulic barrier (alteration barrier), which is very important for hydrology of that area. In this paper, the possibility about formation of the “artificial alteration zone” at geologic disposal is considered.

Smectite, α -cristobalite, clinoptilolite, mordenite and stilbite are possibly formed by the interaction between neutral hot water and volcanic glass at temperatures below 100°C in an artificial geothermal system. These minerals have high adsorption capacity of radionuclides and low permeability. Because of these properties, the alternative minerals may form an “alteration barrier” which supports the multibarrier system.

Nowadays, a large amount of bentonite is necessary for buffer and backfill material. Mixing volcanic glasses with bentonite may reduce the amount of bentonite, because volcanic glasses may change to smectite and form a part of alteration barrier in a long time.

1. はじめに

現在、原子力発電に伴う放射性廃棄物が重大な社会問題になりつつある。このため、高レベル放射性廃棄物を地下数百 m に埋設する地層処分計画が進んでいる¹⁾。

埋設後、高レベル放射性廃棄物は崩壊し発熱するため、放射性廃棄物処分場には低温の『人工地熱系』が発生

* 大手開発㈱ 地殻熱開発部 Bishimetal Exploration Co., Ltd., Geothermal Dept.

し、そこに変質作用が生じることが予想される。

『化石地熱系』である細倉鉱床では、鉱脈周辺に熱水変質により不透水帯が形成されている²⁾。また、『活地熱系』の調査・開発では不透水性の岩石であるキャップロックの存在が重要視されている。キャップロックは初生的な岩相に由来するものだけでなく、2次的な熱水変質によっても形成される³⁾。多くの活地熱系では不透水性の熱水変質帯がキャップロックの役割を果たしている⁴⁾。このように、地熱系の変質帯の一部は水理構造を規制する水理学的バリアの機能を有している場合がある。本論文では、変質作用により形成された不透水帯（水理学的バリア）を変質帯バリアと呼ぶことにする。

千木良⁵⁾は、活地熱系での現象をヒントに「高温の放射性廃棄物処分場から低温の周辺域へ熱水が流動することを想定し、熱水からのシリカ鉱物の沈殿により周辺岩石のフラクチャーを充填をするシステム」の研究を行っている。

本論文では、細倉鉱床、化石地熱系、活地熱系の変質帯の産状をもとに、高レベル放射性廃棄物処分場に予想される変質作用と変質帯バリアについて考察する。

2. 高レベル放射性廃棄物処分場の人工地熱系

2.1 高レベル放射性廃棄物処分場

高レベル放射性廃棄物を地下深部の地層中に処分し、将来にわたって人間とその生活環境から安全に隔離することが地層処分の考え方である。高レベル放射性廃棄物処分場（以下、処分場とする）は地上施設と地下施設から成り、地下施設へのアクセスは立坑・斜坑・スパイラル坑などが考えられている。地下施設には処分坑道が掘削され、廃棄物体の定置方式は坑道横置方式、処分孔縦置方式がある⁶⁾（図-1）。処分後は周辺の地層（後記の天然バリア）の本来の性能を保持するため、地下施設を閉鎖する必要がある。坑道を閉鎖する埋め戻し材には、低透水性、長期健全性が要求され、ベントナイト（スメクタイトを主成分とする粘土）などが検討されている⁶⁾。

地層処分では地下水の影響、地殻変動を考慮する必要がある。放射性核種が地下水に溶解し人間環境に運ばれる可能性もある。また、地殻の大規模な変動により人間環境に近づくことも考えられる⁷⁾。このため、高レベル廃棄物を安全に隔離する多重バリアシステムが考案されている。このシステムは工学的な多重の防護（人工バリア）、地質学的な環境による防護（天然バリア）からなる^{1),7)}（図-1）。

人工バリアはガラス固化体、オーバーパック、緩衝材から構築される^{1),7)}。ガラス固化体とオーバーパックを

含めて廃棄物体と呼ばれている。高レベル放射性廃棄物はガラス固化され、キャニスター（ステンレス鋼製の容器）に封入される。オーバーパックはキャニスターに入ったガラス固化体を覆うもので、地圧等の外圧からガラス固化体を保護する容器である。緩衝材には地下水の遮断が期待され、廃棄物体を地圧や熱の集中から守ることも要求される。候補材料としては、止水性・自己シール性・核種吸着性などからベントナイトが有力である^{1),8)}。

天然バリアは、人工バリアを取り巻く地下深部の地層とそこに含まれる物質の総称である。天然バリアとなりうる地層には、地表に比べてはるかに外的要因による影響を受けにくく、極めて長期にわたって安定であること、地下水の移動が緩慢であることが要求される^{1),7)}。

2.2 人工地熱系の発生

(1) 人工地熱系の熱源

処分坑道周辺には埋設後に高レベル放射性廃棄物から崩壊熱が放出され、廃棄物体を熱源とする低温の地熱系が発生する。廃棄物体の埋設密度により人工地熱系の温度をコントロールできる。緩衝材の有力材料であるスメクタイトがイライトに変質すると、緩衝材の性能が劣化するところが懸念される⁸⁾。このため、廃棄物体を取り囲む緩衝材の埋設後の温度を100℃以下にするように計画している⁶⁾。

石川はか⁹⁾は処分坑道（深度1,000 m）の初期温度を45℃と仮定し、3ケースの廃棄物体の埋設密度で埋設後の緩衝材の温度変化をシミュレーションしている。石川はか⁹⁾に従って、緩衝材内側（オーバーパックとの境界部）の最高温度が100℃になるケースの経年の温度変化の例を以下に示す。

・初期温度； 45℃	・ 1年後； 80℃
・ 20年後； 100℃	・ 100年後； 90℃
・ 1000年後； 60℃	・ 10000年後； 50℃

人工地熱系の温度は数十年で最高温度の100℃となり、その後徐々に低下し、1万年後には50℃程度になると推定される。

(2) 人工地熱系の熱水性状

処分場は建設時には地下水が一旦不飽和状態となるが、埋設後再び深部地下水で飽和される再冠水が起こる。周辺のこの深部地下水が廃棄物体からの放熱により加熱され、人工地熱系を満たす熱水となる。

多くの活地熱系では深部熱水は中性を示すが、酸性の深部熱水がしばしば確認されている。その成因としては硫黄鉱床の変質、 H_2S ガス、 SO_2 ガスの地下水への混入が挙げられる¹⁰⁾。硫黄鉱床の変質は中性熱水と岩石中の硫黄の酸化還元反応によって生成されたと考えら

図-1 放射性廃棄物処分場の概念図

れ、八丁原・霧島地域で確認されている^{11),12)}。この酸性熱水は中性変質帯内に局所的に存在し、近傍には中性熱水が貯留されている場合が多い¹¹⁾。また、深部熱水の沸騰により放出される H_2S ガスの地下水への混入、およびマグマ性の SO_2 ガスの地下水への混入により大量の酸性熱水が生成されることがある。

処分坑道の掘削により地下に酸素が供給されると、黄鉄鉱の酸化による酸性水の生成も考えられるが¹³⁾、処分場には火山活動がなく、黄鉄鉱が大量に存在しない地域が選定されるため、人工地熱系の熱水性状は中性と想定される。

3. 人工地熱系の変質作用

3.1 細倉鉱床周辺の広域変質作用の実例

人工地熱系で想定される低温の中性熱水環境下の変質作用は、細倉鉱床周辺の広域変質帯で観察できる。

(1) 細倉鉱床周辺の地質

細倉鉱床は宮城県北部にある熱水性鉱脈型の鉛・亜鉛鉱床である(図-2)。鉱床は東北グリーンタフ地域に位置し、鉱床周辺の地質は新第三系中新統、鮮新統～更新統からなる(図-3)。

下・中部中新統(細倉層)は鉱床域(鉱脈分布域)に広く分布し、主要な鉱床母岩となっている。岩相は安山岩溶岩・火砕岩・凝灰質泥岩から成る。その上位には不整合で、中部中新統(花山層)が鉱床域周辺に分布する。岩相は軽石凝灰岩・安山岩溶岩・凝灰質砂岩から成る。それらに不整合に上部中新統(文字層)が分布し、岩相は軽石凝灰岩・シルト岩・デイサイト溶岩から成る。さらに鮮新統～更新統(北川層)が鉱床域外に広く分布する。岩相はデイサイト質溶結凝灰岩・軽石凝灰岩から成る火砕流堆積物である^{14),15)}。

図-2 化石・活地熱系の位置図

(2) 広域変質帯の変質分帯

細倉鉱床周辺の広域変質は、肉眼では下位の地層ほど緑色化変質が強くなっている。各層準から採取した岩石のX線分析、顕微鏡による薄片観察をもとにした変質鉱物の組合わせにより、広域変質帯を火山ガラス帯、αクリストバライト帯、スメクタイト帯、緑泥石帯に分帯した(図-4)。

1) 火山ガラス帯

肉眼では新鮮で、顕微鏡下でも火山ガラスに変質が認められない未変質帯である。火山ガラス帯に属する層準は鮮新統～更新統の一部である。

2) αクリストバライト帯

肉眼では新鮮で、顕微鏡下では火山ガラスの一部がαクリストバライトに変質している。αクリストバライト帯に属する層準は鮮新統～更新統の一部、上部中新統である。

3) スメクタイト帯

肉眼では弱い緑色化変質が認められ、顕微鏡下では変質鉱物としてスメクタイト・αクリストバライトが生じ、モルデン沸石・斜ブチロル沸石をしばしば伴う。スメクタイトは火山ガラスを交代し、角閃石類・輝石類の結晶表面に認められることもある。αクリストバライト・沸石鉱物は火山ガラスを交代しているほか、空隙にも晶出している。スメクタイト帯に属する層準は中部中

時代	地層名	地質柱状図	主要岩相	広域変質帯
更新世～鮮新世	北川層	~~~~~ ~~~~~ ~~~~~ ~~~~~	デイサイト質溶結凝灰岩・軽石凝灰岩	Gl
中期	後文字層	~~~~~ ~~~~~ ~~~~~ ~~~~~	デイサイト溶岩 シルト岩 軽石凝灰岩	Sm
新中期	花山層	~~~~~ ~~~~~ ~~~~~ ~~~~~	凝灰質砂岩 軽石凝灰岩 安山岩溶岩	Ch
世前期	細倉層	~~~~~ ~~~~~ ~~~~~ ~~~~~	凝灰質泥岩 安山岩溶岩 安山岩質火砕岩	

広域変質帯の変質分帯：Gl；火山ガラス帯，Cr；αクリストバライト帯，Sm；スメクタイト帯，Ch；緑泥石帯。

図-3 細倉鉱床周辺の模式地質柱状図

変質鉱物	変質母材	変質分帯			
		火山ガラス帯	αクリストバライト帯	スメクタイト帯	緑泥石帯
αクリストバライト	Gl				
2次石英	Gl				
スメクタイト	Gl Mm				
緑泥石	Gl Mm				
セリサイト	Gl Pl				
モルデン沸石	Gl				
斜ブチロル沸石	Gl				
方解石	Gl Mm Pl				
アルバイト	Gl Pl				

Gl；火山ガラスを交代，Mm；角閃石類・輝石類を交代，Pl；斜長石を交代

——；普遍的に認められる，-----；しばしば認められる，-----；まれに認められる。

図-4 細倉鉱床周辺の広域変質帯の変質鉱物組合せ

新統である。

4) 緑泥石帯

肉眼では緑色化変質が顕著で、顕微鏡下では火山ガラス、角閃石類・輝石類・斜長石の結晶に変質が認められる。変質鉱物は緑泥石・アルバイト・石英・方解石から成り、スメクタイトを伴うこともある。緑泥石帯に属する層準は下・中部中新統である。

(3) 広域変質帯の特徴

顕微鏡による薄片観察から、火山ガラスが最も変質に弱い物質であることがわかる。鉱物の変質しやすさは、角閃石類・輝石類＞斜長石＞石英の順である。また、斑晶よりも石基の鉱物の方がより変質を受けている。

広域変質作用には層準規制が認められ、代表的な変質鉱物は上位層より下位層に向かって、火山ガラス→αクリストバライト→スメクタイト・低温型沸石鉱物→緑泥石となる(図-3)。このように、上位層から下位層に向かってより高温の変質鉱物が生成されている。こ

の広域変質作用は局所的な熱水活動によるものではなく、続成作用と考えられる。

3.2 人工地熱系に予想される変質鉱物

50~100℃の中性熱水環境下の人工地熱系で生成される変質鉱物は、油田地域の続成作用、活地熱地域の熱水変質作用を参考に予想できる(図-5)。我が国の油田地域では凝灰岩が多く存在し、火山ガラスが続成作用でスメクタイト・斜ブチロル沸石などに変質している。火山ガラスのスメクタイトへの転換温度は50℃以下、斜ブチロル沸石への転換温度は約55℃と推定される¹⁶⁾。森ほか¹⁷⁾、HENLY *et al.*¹⁸⁾は活地熱地域での変質鉱物の安定温度を示しているが、50~100℃で安定な変質鉱物は油田地域の続成作用で生成される鉱物と同様である。これらのデータをもとにすると、細倉鉱床周辺の広域変質帯のスメクタイト帯は50~100℃で生成されたと推定される。

黒曜石(流紋岩質~デイサイト質火山ガラス)と純水による閉鎖系100℃の水熱反応では、90日以降に黒曜石の表面にスメクタイトの生成(部分変質)が確認されている¹⁹⁾。この実験から火山ガラスが100℃程度の低温熱水との反応により短時間でスメクタイトに部分変質することがわかる。

細倉鉱床周辺のスメクタイト帯の被変質岩はデイサイト質~安山岩質火山岩類である。流紋岩質・デイサイト質・安山岩質火山岩類では変質鉱物種は同様であるが、玄武岩質の場合は前記のものに加えてシリカに乏しい沸石鉱物(束沸石)が出現することが知られている²⁰⁾。

これらのことから、火山ガラスを母材に以下の変質鉱物の生成が予想される。

①スメクタイト、②αクリストバライト、③斜ブチロル沸石、④モルデン沸石、⑤束沸石(玄武岩質火山ガラスの場合)

変質鉱物	出典	安定温度(℃)	
		50	100
スメクタイト	*1	—	—
	*2	—	—
モルデン沸石	*1	—	—
	*2	—	—
斜ブチロル沸石	*1	—	—
	*2	—	—
束沸石	*1	—	—
	*2	—	—
αクリストバライト	*1	—	—
	*2	—	—

図-5 50~100℃で安定な変質鉱物
(出典 *1:青柳ほか(1979). *2:森ほか(1980).)

4. 人工地熱系の変質帯バリア

4.1 細倉鉱床の変質帯バリアの実例

(1) 細倉鉱床中央部の地質・鉱床

細倉鉱床は化石地熱系で、鉱床生成年代は中新世後期と推定される²¹⁾。本論文では鉱床中央部の主要鉱脈である富士本脈の熱水変質帯を紹介する。鉱脈は正断層性の断層・裂隙に形成されているもので、硫化鉱物、石英、セリサイトなどの粘土鉱物で充填されている。また、鉱脈周辺には断層運動に伴う断層角礫帯(礫径10~50 cm)が発達し、剪断面にはしばしば鏡肌が認められる。

富士本脈周辺の地質は、細倉層の安山岩溶岩・火砕岩から成る(図-6)。溶岩は浅部レベルに分布し、節理に乏しく塊状であるが、溶岩の上面に近い0Mレベルの鉱脈上盤側には自破砕質角礫帯が分布する。自破砕質角礫帯は礫径10~20 cm程度の凝灰角礫岩様の岩相を示し、溶岩流の冷却・流動によってその上面に形成されたものと考えられる。火砕岩は深部レベルに分布し、凝灰角礫岩~火山凝灰岩から成り、全般には塊状である。

1. 安山岩溶岩, 2. 安山岩質火砕岩, 3. 断層角礫帯, 4. 自破砕質角礫帯, 5. 坑道レベル。

図-6 富士本脈周辺の地質断面図

(2) 熱水変質帯の変質分帯

鉱床母岩は緑泥石帯に属する広域変質作用を受け、鉱脈周辺ではその後の鉱化作用を伴う熱水変質を受けている¹⁵⁾。鉱脈周辺で採取した熱水変質岩のX線分析、薄片観察をもとに、鉱脈際よりカリウム質変質帯、粘土化変質帯、弱変質帯に分帯した(図-7)。これらの熱水変質帯はカリ長石・セリサイト・スメクタイトで特徴づけられ、歌田²⁰⁾の中性変質帯に当たる。

1) カリウム質変質帯

変質鉱物は鉱脈の構成物と類似し、石英・カリ長石・セリサイト・セリサイト/スメクタイト混合層鉱物(以下、混合層鉱物とする)から成る。カリウム質変質帯は鉱脈際に分布し、-5Lレベルから-3Lレベル間では強い珪化が認められる。

2) 粘土化変質帯

変質鉱物は混合層鉱物・スメクタイトから成る。粘土化変質帯はカリウム質変質帯の外側に分布し、0Mレベルの鉱脈上盤側に広く分布する。

3) 弱変質帯

変質鉱物は広域変質帯(緑泥石帯)と類似するが、少量の混合層鉱物を伴う。弱変質帯は粘土化変質帯の外側に分布する。

図-7 富士本脈周辺の熱水変質分帯図

(3) 鉱脈周辺の水理構造

カリウム質変質帯と粘土化変質帯の幅とその母岩の岩相を表-1に示す。カリウム質変質帯は主に断層角礫帯に分布し、鉱脈際の安山岩溶岩・火砕岩にも小規模に認められる。粘土化変質帯は0Mレベルの鉱脈上盤側の自破碎質角礫帯に層状に広がる。安山岩溶岩・火砕岩の粘土化変質帯の幅は10~20mである。

変質帯の幅を規制するパラメーターは作用する熱水の流速(主に透水性)・反応速度(主に温度・pH)・接触面積などであるが、流速が最も重要なパラメーターである²²⁾。岩石の透水性はフラクチャーの発達状態に支配され、断層角礫帯は-3オーダー(透水係数をオーダーで表現する;例として、 10^{-3} cm/sは-3オーダー)程度、自破碎質溶岩には-2オーダー程度の透水性を有しているものもある²³⁾。細倉鉱床の熱水活動初期の岩石の透水性を推定すると、断層・裂隙(その後の鉱脈)、断層角礫帯、自破碎質角礫帯は透水性が良好で、一方、安山岩溶岩・火砕岩は透水性は不良であったと考えられる。

(4) 変質帯バリアの形成

細倉鉱床周辺では中新世後期に熱源が発生し地熱系が形成された。地表より浸透した天水が地下深部の熱源により加熱され、中性の深部熱水が生成された²⁾。深部熱水はフラクチャー帯(断層・裂隙、断層角礫帯)を上昇し、自破碎質角礫帯に流動した。

熱水の流動により、断層・裂隙は硫化鉱物・石英・粘土鉱物により完全に充填され鉱脈となった。断層角礫帯はカリウム質変質を受け網状脈(幅10mm以下)が発

表-1 富士本脈上盤側の熱水変質帯の幅と岩相の関係

坑道レベル	熱水変質帯の幅	
	カリウム質変質帯	粘土化変質帯
0M	20m (断層角礫帯)	85m以上 (自破碎質角礫帯)
-3L	8m (断層角礫帯)	14m (安山岩溶岩)
-4L	12m (断層角礫帯)	13m (安山岩溶岩)
-5L	9m (断層角礫帯)	12m (安山岩溶岩)
-6L	1m (安山岩溶岩)	6m (安山岩溶岩)
-10L	4m (火砕岩)	13m (火砕岩)

() ; 変質母岩

達し、フラクチャーは主に石英・カリ長石・粘土鉱物などにより完全に充填されている。自破碎質角礫帯は安山岩角礫の周囲が強い粘土化変質を受け礫間（幅10 mm以下）は完全に粘土鉱物などにより充填されている。このように熱水活動の進行により、フラクチャーや空隙は石英・粘土鉱物などによって充填され、透水性が低下したと推定される。この傍証として、鉱脈上盤側の0Mレベルの弱変質帯中では地下水が坑道天盤からしみ出しているが、カリウム質変質帯・粘土化変質帯では天盤の浸水は認められない。

また、フラクチャー帯（断層・裂隙、断層角礫帯）に接する塊状の安山岩溶岩・火砕岩にもカリウム質変質帯・粘土化変質帯が認められる。溶岩にはまれに節理が発達するが、節理は粘土鉱物などによって充填されている。火砕岩は基質が特に強い変質を受け、地下水のしみ出しは認められない。

このように、熱水の流動により不透水性の変質帯バリアがフラクチャー帯とその周囲に形成されたと推定される（図-8）。

4.2 化石地熱系の変質帯バリアの実例

豊羽や菱刈などの熱水性鉱脈鉱床（化石地熱系）でも変質帯バリアが存在する（図-2、表-2）。

（1）豊羽鉱床

豊羽鉱床は北海道札幌市にあり、新第三系に胚胎する熱水性の鉱脈型銀・鉛・亜鉛鉱床である。主要鉱脈の上位にはセリサイト・スメクタイト・カオリナイトから成る粘土化変質帯が分布し²⁴⁾、この粘土化変質帯が変質帯バリアとなっている。

図-8 細倉鉱床における変質帯バリア形成の概念図

豊羽鉱床の一部は現在でも熱源が保持されている活地熱地域で、鉱脈の充填は完全ではなく熱水が存在し、粘土化変質帯の直下の鉱脈内では熱水の沸騰状態が確認されている²⁴⁾。

（2）菱刈鉱床

菱刈鉱床は鹿児島県北部にある熱水性の鉱脈型金鉱床である。鉱脈は先第三系の四万十累層群と第四紀の火山岩類に胚胎し、主に四万十累層群中に発達する。

鉱脈は含金石英により充填され、鉱脈の直上の火山岩類の角礫化帯がスメクタイト・混合層鉱物から成る強い粘土化変質を受け^{25),26)}。含金石英脈・強粘土化変質帯が変質帯バリアとなっている。

4.3 活地熱系の変質帯バリア

森、大沼・澄川、松川、鬼首、奥会津、滝上、大岳・八丁原、霧島などの多くの活地熱系で変質帯バリア（変質帯キャップロック）の存在が報告されている（図-2）。これらの変質帯バリアは浅層地下水層と深部の地熱貯留層を分離している⁴⁾。トリチウム（³H）濃度は、浅層地下水（新しい水）の地熱貯留層中の地熱水（古い水）への混合の目安となる。地熱水の³H濃度が低い場合は、変質帯バリアが水理学的バリアとして機能していると解釈できる。

熱水変質帯は関与する熱水により、中性変質帯・酸性変質帯に区分できる。変質帯バリアを形成する中性変質帯の変質鉱物はスメクタイトが主体で、その他はモルデン沸石・濁沸石・方解石である。酸性変質帯ではカオリ

表-2 地熱系の変質帯バリアの特徴

地 域 名	変質帯バリア の変質鉱物	地 熱 系 種 類
細 倉	Smc, Mix, Qtz	熱水性鉱床
豊 羽	Ser, Smc, Kao	熱水性鉱床・活地熱地域
菱 刈	Smc, Mix, Qtz	熱水性鉱床
森	Smc	活地熱地域
大沼・澄川	Smc	活地熱地域
松 川	Pyr, Kao, Smc	活地熱地域
鬼 首	Smc, Mrd, Lou	活地熱地域
奥 会 津	Smc, Mrd, Ser	活地熱地域
滝 上	Kao, Pyr, Smc	活地熱地域
大岳・八丁原	Pyr, Kao, Smc	活地熱地域
霧 島	Smc, Mrd, Cal	活地熱地域

Ser; セリサイト, Smc; スメクタイト, Mix; 混合層鉱物, Kao; カオリナイト, Pyr; パイロフィライト, Lou; 濁沸石, Mrd; モルデン沸石, Cal; 方解石, Qtz; 石英.

ナイトとスメクタイトが主体をなしている(表-2)。

(1) 森地熱地域

森地域は北海道南西部に位置し、第四系が熱水変質を受けている。この地域では多数の地熱井が掘削され、じょうご型カルデラの存在が確認されている。このカルデラの形成期は1万2千年前と推定され、カルデラ内は1度噴き上げられた爆発堆積物が火口近くに落下したカルデラ堆積物により埋められている²⁷⁾。カルデラ堆積物は周辺岩石の岩片と軽石から成り²⁸⁾、透水性は良好であったと推定される。その後の熱水活動によってスメクタイトなどの変質鉱物がカルデラ堆積物の一部に生成され²⁹⁾、現在はカルデラ堆積物の一部は変質帯バリアとなっている。このことは、スメクタイトなどから成る変質帯バリアが1万2千年以内で形成されていることを表している。高橋ほか³⁰⁾のデータをもとにすると、変質帯バリアは地温50~180℃の範囲に分布し、厚さは約400 mである。

(2) 大沼・澄川地熱地域

大沼・澄川地域は秋田県北東部に位置する。この地域では地熱貯留層の直上にスメクタイトなどから成る中性変質帯が分布し³¹⁾、変質帯バリアを形成している。窪田³¹⁾のデータをもとにすると、変質帯バリアは地温120~200℃の範囲に分布し、その厚さは約50~200 mである。変質帯バリア内では地熱井掘削中の循環泥水の逸泥は少量である³²⁾。

(3) 松川地熱地域

松川地域は岩手県北西部に位置する。この地域ではパイロフィライト・カオリナイト・スメクタイトなどから成る酸性変質帯が地表下約700 mまで分布し³³⁾、変質帯バリアを形成している³⁴⁾。角³³⁾のデータをもとにすると、変質帯バリアは地温100~200℃の範囲に分布し、その厚さは約200 mと推定される。

(4) 鬼首地熱地域

鬼首地域は宮城県北部に位置する。この地域では地熱貯留層の直上にスメクタイト・モルデン沸石・濁沸石などから成る中性変質帯が分布し³⁵⁾、変質帯バリアを形成している可能性がある。高島³⁵⁾のデータをもとにすると、変質帯バリアは地温50~150℃の範囲に分布し、その厚さは150~300 mである。

(5) 奥会津地熱地域

奥会津地域は福島県西部に位置する。この地域では地熱貯留層の直上にスメクタイト・モルデン沸石などから成る中性変質帯が変質帯バリアを形成している³⁶⁾。SEKI³⁷⁾のデータをもとにすると、変質帯バリアは地温70~200℃の範囲に分布し、その厚さは約650 mであ

る。地熱水の³H濃度は低い値を示す³⁶⁾。

(6) 滝上地熱地域

滝上地域は大分県南西部に位置する。この地域ではカオリナイト・パイロフィライト・スメクタイトなどから成る酸性変質帯が変質帯バリアを形成している³⁸⁾。変質帯バリアは地温50~160℃の範囲に分布し、その厚さは100~1,700 mである。地熱水の³H濃度は低い値を示す。

(7) 大岳・八丁原地熱地域

大岳・八丁原地域は大分県南西部に位置する。この地域では、パイロフィライト・カオリナイト・スメクタイトなどから成る酸性変質帯が変質帯バリアを形成している³⁹⁾。松本ほか⁴⁰⁾・馬場ほか⁴¹⁾のデータをもとにすると、変質帯バリアの分布域は地温80~200℃の範囲で、その厚さは約300~400 mである。地熱水の³H濃度は低い値を示す⁴¹⁾。

(8) 霧島地熱地域

霧島地域は鹿児島県北部に位置する。この地域ではスメクタイト・モルデン沸石・方解石などの変質鉱物が節理などのフラクチャーを充填し変質帯バリアを形成している⁴²⁾。変質帯バリアは地温50~200℃の範囲に分布し、その厚さは200~400 mである。地熱水の³H濃度は低い値を示す。

4.4 人工地熱系に予想される変質帯バリア

(1) 変質鉱物の特徴

人工地熱系に火山ガラスが大量に含まれる場合、スメクタイトなどの生成が予想される。予想される変質鉱物の特徴を以下に示す。

1) スメクタイト

膨潤性・陽イオンの交換性を有する特異な性格を持つ粘土鉱物である。その化学式は $(\text{Na}_2 \cdot \text{K}_2 \cdot \text{Ca}) (\text{Al}_{10} \cdot \text{Mg}_2) \text{Si}_{24} \text{O}_{60} (\text{OH})_{12} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ である。細倉鉱床周辺の広域変質帯では火山ガラスを交代して存在する(図-4)。

油田地域ではスメクタイトがより高温で生成されるイライトに変化する際に放出される層間水が石油の移動の営力になることが指摘され^{43),44)}、スメクタイトには層間水の吸着による保水の能力がある。スメクタイトの生成によりその保水性による低透水性化が予想される。また、Csなどの陽イオンに対して優れた吸着特性を示す⁴⁵⁾。

2) α クリストバライト

シリカ鉱物で、化学式は SiO_2 である。シリカ鉱物は堆積物のセメント物質となり、シリカ鉱物による交代が進むと緻密堅硬となるのが珪化である。細倉鉱床周辺の広域変質帯では α クリストバライトは火山ガラスを交

代して存在するほか、空隙にも晶出している（図-4）。 α クリストバライトの生成により空隙の充填による低透水性化が予想される。

3) モルデン沸石

沸石鉱物で、化学式は $(\text{Na}_2 \cdot \text{K}_2 \cdot \text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_{10}\text{O}_{24} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ である。細倉鉱床周辺の広域変質帯では火山ガラスを交代して存在するほか、空隙にも晶出している（図-4）。モルデン沸石の生成により空隙の充填による低透水性化が予想される。また、Csなどの陽イオンに対して優れた吸着特性を示す⁴⁵⁾。

4) 斜ブチロル沸石

沸石鉱物で、化学式は $(\text{Na}_2 \cdot \text{K}_2 \cdot \text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ である。細倉鉱床周辺の広域変質帯では火山ガラスを交代して存在するほか、空隙にも晶出している（図-4）。

油田地域では斜ブチロル沸石がより高温で生成される方沸石に変化する際に結晶水が放出されることが指摘され⁴⁶⁾、斜ブチロル沸石には結晶水の吸着による保水の能力がある。斜ブチロル沸石の生成により、その保水性および空隙の充填による低透水性化が予想される。また、Csなどの陽イオンに対して優れた吸着特性を示す⁴⁵⁾。

5) 東沸石

沸石鉱物で、化学式は $(\text{Ca} \cdot \text{Na}_2 \cdot \text{K}_2)\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ である。他の沸石鉱物同様に、東沸石の生成により空隙の充填による低透水性化が予想される。

(2) 変質バリア

人工地熱系に予想される変質帯バリアの概念図を図-9に示す。

1) 人工バリア

緩衝材として有力候補のベントナイトの人工地熱系での変質に関しては、ナチュラアナログ研究⁴⁷⁾や変質シミュレーション⁹⁾が行われている。これらの結果では、100℃程度の温度条件ではスメクタイトは安定で、顕著なイライト化は生じないと判断されている。

緩衝材はベントナイト単一材料のほか、米国などでは

図-9 人工地熱系における変質帯バリア形成の概念図

ベントナイトに沸石類・シリカなどの混合が検討されている⁴⁵⁾。複合材料にもベントナイト単一材料同様に低透水性（透水係数；-8オーダー）であることが第一に要求される。人工地熱系では火山ガラスの変質でスメクタイトなどが生成される可能性があることより、ベントナイトと火山ガラスの複合材料の検討も興味深いと考えられる。

2) 埋め戻し部

床次⁴⁸⁾は、処分坑道などが水の通路とならないようにする密封技術の重要性を指摘している。処分坑道を閉鎖する埋め戻し材には、低透水性、核種吸着、長期健全性が要求される。設計研究では埋め戻し部の透水係数を-5オーダーと仮定している⁶⁾。埋め戻し材としては、ベントナイト単一材料、およびベントナイトに珪砂・泥岩岩片などを混合した複合材料が検討されている⁶⁾。

細倉鉱床の粘土化変質を受けた自破碎質角礫帯では、礫径10 cm程度の安山岩角礫の間隙を粘土鉱物（混合層鉱物・スメクタイト）が充填している。坑道掘削ずりをこの角礫とみなすと、坑道掘削ずりの間隙に火山ガラスからスメクタイトを主とする変質鉱物を生成させると変質帯バリアが形成される可能性がある（図-10）。

国内のフィルダムの土質材料⁴⁹⁾では、粒径は50 mm程度のものが40～70%であるが、しゃ水性（透水係数；-5オーダー程度）を確保するために、一般に粒径0.074 mm（#200）以下の細粒材の含有比が一つの目安にされ、10～20%程度が適当とされている。フィルダムの材料データを参考に、埋め戻し材の調整の一例を次に示す。

- ・坑道掘削ズリ、粒径 50 mm 以下、含有比約80%
 - ・ベントナイト、粒径 0.074 mm 以下、含有比約10%
 - ・火山ガラス、粒径 0.074 mm 以下、含有比約10%
- 火山ガラスとベントナイトの細粒材を20%程度とし、その他を坑道掘削ずりとする。

図-10 埋め戻し部における変質過程の概念図

3) 天然バリア

火山ガラスを含む地層が天然バリアとなっている場合、人工地熱系にスメクタイトなどが生成され変質帯バリアが形成される可能性がある。細倉鉱床では変質帯バリアは透水性が良好な箇所が発達している。周辺より透水性が良好なフラクチャーや緩み部に変質帯バリアが広く生成されて透水性が低下する可能性がある。

5. 処分場における変質帯バリア形成の意義

5.1 多重バリアシステムの補強

半定量的に表現した多重バリアシステムの機能時間を表-3に示す。高レベル放射性廃棄物はCs-137, S-90等の半減期の短い核種を多量に含むため、放射能レベルは初期に極めて高い。千年経過すると、放射能は約数千分の1になる。高レベルの放射能が減衰した後に、長期にわたって低レベルの放射能が残る⁸⁾。人工バリアには数千年の性能の維持が必要になり、天然バリアには数万年の安定性が要求される^{50), 51)}。

100℃での水熱反応実験¹⁹⁾から、火山ガラスは短時間でスメクタイトに部分変質すると解釈される。また、活地熱地域ではスメクタイトなどから成る変質帯バリアが1万2千年以内で形成されている実例がある。これらのことから、人工地熱系の100℃以下の中性熱水環境下では火山ガラスにスメクタイトなどが生成し、これらの変質鉱物から成る変質帯バリアは1万年程度で形成される可能性がある。この変質帯バリアの変質鉱物には低透水性化・核種吸着の機能があり、多重バリアシステムの補強になることが期待される。

5.2 ベントナイトの使用の減量

現段階の計画では、処分坑道などの埋め戻し材や緩衝材に大量のベントナイトが必要である。埋設後の変質作用により2次的なスメクタイトが生成可能と考えられ、ベントナイトの節約が図られると考えられる。また、埋め戻し材に坑道掘削りを利用できれば建設コストの削減になると考えられる。

5.3 火山ガラスを含有する天然バリアの評価

処分場の周辺母岩である天然バリアが火山ガラスを含有する場合にのみ、天然バリア中に変質帯バリアが形成される可能性がある。火山ガラスを多く含む岩石としては、火砕流堆積物・火砕岩、泥岩が挙げられる。天然バリアとして、火山ガラスを含有する地層の評価も興味深いと考えられる。

6. おわりに

細倉鉱床などの化石地熱系の熱水変質の研究は、放射

表-3 多重バリアシステムの機能時間

バリアの種類	機 能 時 間 (年)					
	10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
人工バリア	—————	—————	—————	—————	—————	—————
変質帯バリア	—————	—————	—————	—————	—————	—————
天然バリア	—————	—————	—————	—————	—————	—————

————— 本格的な機能が期待される期間.

----- 補助的な機能が期待される期間.

性廃棄物処分場のナチュラアナログ研究に応用でき、地層処分の計画・設計に役立つと考えられる。

人工地熱系で想定される50~100℃程度以下の中性熱水環境下での変質作用で、火山ガラスにはスメクタイト・αクリストバライト・斜プロチロル沸石・モルデン沸石などの生成が予想される。これらの変質鉱物は低透水性化・核種吸着の機能を有しており、多重バリアシステムを補強する変質帯バリアを形成する可能性がある。

処分坑道などの埋め戻し材や緩衝材の主成分となるスメクタイトは変質作用による2次的な生成が可能と考えられ、ベントナイトの節約になると考えられる。

本論文はまだ定性的な考察が多く、定量的研究は今後の課題としたい。

謝辞 大手開発(株)柏木高明社長、永松武彦調査本部長からは論文発表の機会をいただいた。そのほかの関係各位にも感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 佐久間秀樹 (1992) : 高レベル放射性廃棄物と地層処分, 応用地質, Vol. 32, No. 6, pp. 272-280.
- 2) 高橋 洋 (1995) : 変質帯キャップロックの形成機構—細倉鉱床を実例として—, 日本地熱学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 271-284.
- 3) WHITE, D. E., MUFFLER, L. J. P. and TRUESDELL, A. H. (1971) : Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems. Econ. Geol., 6, 101-120.
- 4) 高橋 洋 (1996) : 地熱系の変質帯キャップロックの分類, 日本地熱学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 1-15.
- 5) 千木良雅弘 (1995) : 風化と崩壊—第3世代の応用地質—, 近未来社, 204p.
- 6) 原 啓二・五月女敦・藤田朝雄・棚井憲治・杉田 裕 (1992) : 処分施設の技術開発, 動燃技報, No. 85, pp. 112-126.

- 7) 内藤守正・梅木博之 (1992): 地層処分研究開発の考え方と進め方, 動熱技報, No. 85, pp. 10-13.
- 8) 柴田雅博・佐々木康雄・佐藤治夫・澁谷朝紀・亀井玄人・三ツ井誠一郎 (1992): ベントナイトの化学的緩衝性および核種と相互作用に関する研究, 動熱技報, No. 85, pp. 34-41.
- 9) 石川博久・柴田雅博・藤田朝雄 (1994): 放射性廃棄物処分における緩衝材のイライト化変質シミュレーション, 粘土科学, Vol. 34, No. 3, pp. 149-156.
- 10) HENLEY, R. W. and ELLIS, A. J. (1983): Geothermal systems ancient and Modern: A geochemical review, *Earth - Sci. Rev.*, Vol. 19, pp. 1-15.
- 11) 島田寛一・藤野敏雄・古賀昭人・広渡和緒 (1985): 八丁原地熱地帯の酸性熱水の成因と対策, 地熱, Vol. 22, No. 4, pp. 276-292.
- 12) 御生和則・清水 明 (1992): 霧島地域白水越地区に存在する酸性地熱流体, 日本地熱学会平成4年度学術講演会講演要旨集 B1.
- 13) 内藤守正・梅木博之 (1992): シナリオ解析, 動熱技報, No. 85, pp. 14-22.
- 14) 通産省資源エネルギー庁 (1976): 昭和50年度広域調査報告書 (栗原地域), 38p.
- 15) 高橋 洋 (1988): 細倉鉱床の鉱化変質分帯と生成モデル, 鉱山地質, Vol. 38, No. 4, pp. 335-346.
- 16) 青柳宏一 (1979): 堆積岩中の自生鉱物を用いた古地温の解析法, 石油技術協会誌, Vol. 44, No. 6, pp. 367-371.
- 17) 森 康夫・陶山淳治 (1980): 地熱エネルギー読本, オーム社, 92p.
- 18) HENLEY, R. W., TRUEDELL, A. H. and BARTON, P. B., Jr (1984): Fluid - mineral equilibria in hydothermal systems, *Reviews in Econ. Geol.*, Vol. 1, pp. 65-82.
- 19) 河野元治・富田克利 (1994): 低温水熱反応による黒曜石からの粘土鉱物の生成 (その3) — 純水閉鎖系100°Cでの反応 —, 粘土科学, Vol. 34, No. 2, pp. 80-88.
- 20) 歌田 実 (1977): 鉱床母岩の変質作用, 現代鉱床学の基礎 (立見辰雄編), 東京大学出版会, pp. 145-159.
- 21) 鹿園直建・網川秀夫 (1982): 細倉・佐渡鉱床の K-Ar 年代, 鉱山地質, Vol. 32, pp. 479-482.
- 22) 藤本光一郎 (1987): 部分的変質帯の幅を規制する要因, 鉱山地質, Vol. 37, No. 1, pp. 45-54.
- 23) 土木学会編 (1979): ダムの地質調査, pp. 91-96.
- 24) 三箇智二・神原 洋・庄司敏行・岳山輝夫 (1992): 豊羽鉱床における後期鉱化作用の特性と裂隙系, 資源地質, Vol. 42, No. 2, pp. 85-100.
- 25) 阿部一郎・鈴木英雄・磯上篤生・後藤寿幸 (1986): 菱刈鉱山の地質と探鉱開発, 鉱山地質, Vol. 36, No. 2, pp. 117-130.
- 26) 茨城謙三・鈴木良一 (1990): 菱刈鉱山鉱床母岩の熱水変質について, 鉱山地質, Vol. 37, No. 4, pp. 227-236.
- 27) 安藤重幸 (1983): ボーリング結果からみた濁川カルデラの構造, 月刊地球, Vol. 5, pp. 31-36.
- 28) 黒墨秀行・土井宜夫 (1993): 濁川カルデラの内部構造, 日本火山学会予稿集1993年秋季大会 A14.
- 29) 小松 亮 (1991): 北海道森地域の熱水変質について, 日本地熱学会平成3年度学術講演会講演要旨集 A7.
- 30) 高橋昌宏・池内 研・武田義則・伝法谷宜洋 (1992): 北海道森地熱地域の観測井 N2-KX-3 における熱水の坑井内自然上昇流動, 第2回地下き裂のキャラクタリゼーションワークショップ論文集, pp. 32-47.
- 31) 窪田康宏 (1979): 八幡平北部地区の地熱変質, 地熱, Vol. 16, No. 4, pp. 195-211.
- 32) 窪田康宏・谷下田雅之・番場光隆・加藤久遠 (1989): 大沼-澄川地域における熱水対流系とそれに関連した変質鉱物の分布, 日本地熱学会平成元年度学術講演会講演要旨集 A11.
- 33) 角 清愛 (1966): 岩手県松川地熱地帯における岩石の熱水変質 — その1: 地表から深度400 m までの変質 —, 鉱山地質, Vol. 16, pp. 261-271.
- 34) 金原啓司 (1983): 八幡平東部地域における地熱変質帯と地熱系, 岩鉱, Vol. 78, pp. 479-490.
- 35) 高島 勲 (1988): 鬼首地熱地域の變質と熱水系, 地質調査所報, Vol. 286, pp. 229-244.
- 36) 新田富也・寿賀祥五・塚越重明・安達正敏 (1987): 福島県奥会津地域の地熱資源について, 地熱, Vol. 24, No. 4, pp. 340-370.
- 37) SEKI, Y. (1991): The physical and chemical structure of the Oku-aizu geothermal system, Japan. *Geochem. J.*, Vol. 25, pp. 245-265.
- 38) 林 二郎・本松利郎・近藤 充 (1988): 大分県滝上地区の地熱資源について, 地熱, Vol. 25, No. 2, pp. 111-137.
- 39) 真鍋 考・江島康彦 (1984): 八丁原地熱帯における裂か型貯留層の地質構造特性および熱水系, 地熱, Vol. 21, No. 2, pp. 101-118.
- 40) 松本 正 (1989): 大岳・八丁原発電所の運転実績と貯留層管理, 地熱, Vol. 26, No. 4, pp. 239-261.
- 41) 馬場敬之・川副聖規・末吉喜和 (1991): 大岳・八丁原地帯における坑井掘削について, 地熱, 28, 4, pp. 273-296.
- 42) 児玉牧夫・中島 完 (1988): 霧島地域の地熱開発調査, 地熱, Vol. 25, No. 3, pp. 201-230.
- 43) 青柳宏一・浅川 忠 (1977): 継変作用下における炭化水素の第一次移動, 石油技誌, Vol. 42, pp. 76-89.
- 44) 星野一男 (1981): 圧密と流体移動, 堆積盆中の流体移動 (杉山隆二・池辺 稔・星野通平・崎崎達雄編集), 東海大学出版会, pp. 65-77.
- 45) 原 啓二・五月女敦・藤田朝雄・本田 明・柴田雅博・竹内真司・茂呂吉司 (1992): 人工バリア技術の研究開発, 動熱技報, No. 85, pp. 96-111.
- 46) 根岸敏雄 (1981): クリノプチロル沸石の脱水機構とそれの石油探鉱への応用, 石油技誌, Vol. 46, pp. 75-88.
- 47) 伊藤雅和 (1994): ベントナイト利用の現状と新展開, 粘土科学, Vol. 33, No. 4, pp. 193-201.
- 48) 床次正安 (1994): 高レベル放射性廃棄物と鉱物学, 鉱物学雑誌, Vol. 23, No. 4, pp. 151-156.
- 49) 土木学会編 (1979): ダムの地質調査, pp. 134-143.
- 50) 中野啓二・小出 仁 (1991): 高レベル放射性廃棄物地層処分における天然バリアー性能評価システムについて, 地質ニュース, Vol. 439, pp. 19-29.
- 51) 小出 仁 (1992): 放射性廃棄物と地層問題, 応用地質, Vol. 32, No. 6, pp. 281-288.

(1995年8月7日受付, 1996年5月8日受理)