

放射性廃棄物の地層処分に対する シミュレーション研究と ナチュラルアナログ研究の意義

鹿園直建¹⁾

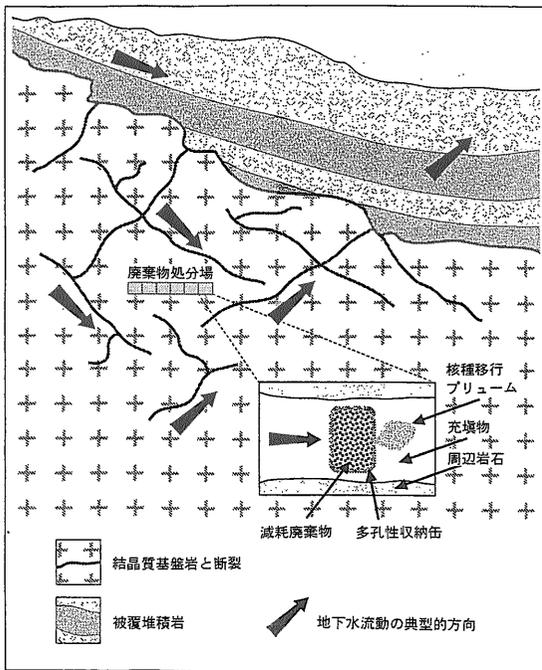
1. はじめに

高レベル放射性廃棄物を地下深所に処分した時、最も問題となるのは、廃棄物体から放射性核種が岩石圏内を移行し、地表近くの人間圏、生物圏へ到達し、多大な影響を与える可能性があることである(第1図)。

高レベル放射性廃棄物体の放射線量レベルが自然(ウラン鉱床)のレベルに達するまでには、非常に長

期間(~1万年)かかる。従って、この長期間の放射性核種の移行のプロセスとメカニズムが明らかにされないといけない。このための研究方法として、シミュレーション研究とナチュラルアナログ研究が有効であると思われる。そこで、以下ではこれらの研究の意義について述べてみたい。

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究は欧米を中心に1980年代から行われてきた。これらの研究では、様々な事象の影響が考慮されている(第1表)。多くのシナリオが想定されているが、その中でも地下水移行シナリオに基づく研究が主になされてきたといえる。それは、欧米諸国の地質が地層、火山、断層などの変動現象があまり生じない安定な地質体から構成されているからである。ところが、我が国では、火成活動と地震活動が盛んに起こり、地下には熱水が広く存在している。第2図は、我が国の温泉の分布を示している。これより、この分布は火山の分布と大まかには一致しているが、非



第1図 結晶質基盤岩中に処分された放射性廃棄物固化体と地下水の流れ。地下水が廃棄物体を溶かし、放射性核種が岩石内を移行し、地表に達する。

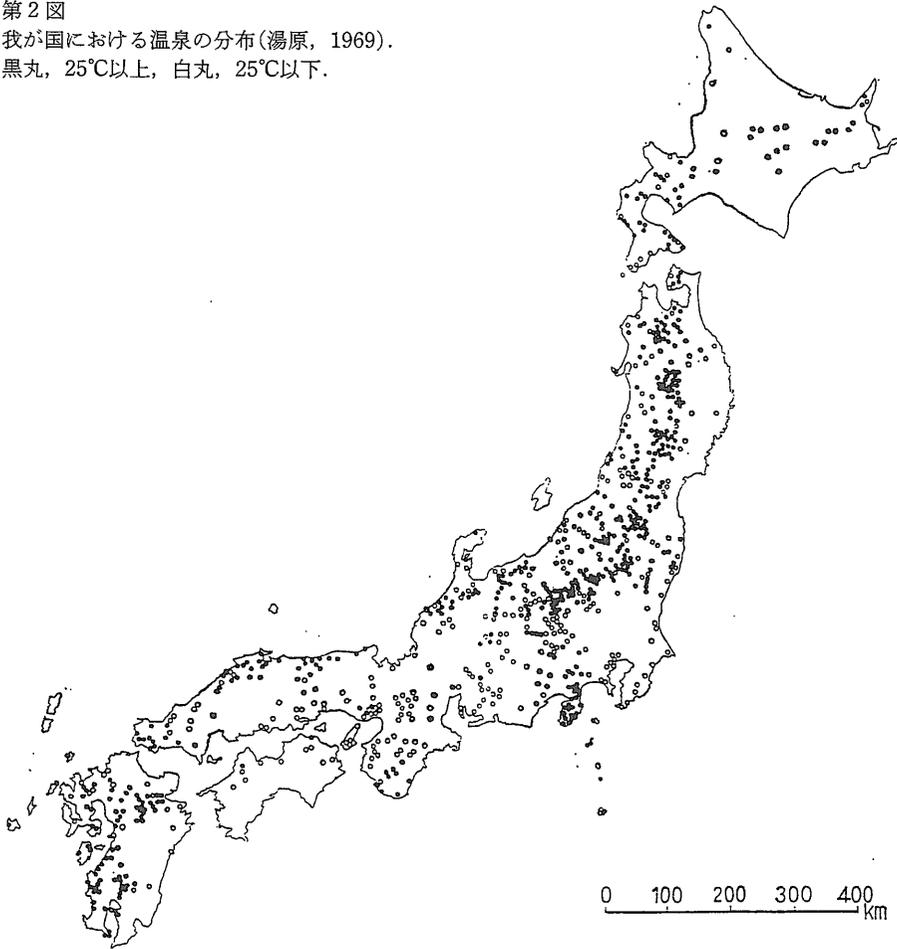
第1表 P. A. G. I. S. (1984)で扱った地質事象

- ・ 気候変動
- ・ 海面レベルの変動
- ・ さくはく作用
- ・ 流れ侵食
- ・ 海底侵食
- ・ ダイアピリズム
- ・ 隕石
- ・ マグマ
- ・ 氷食

1) 慶應義塾大学理工学部：
〒223 横浜市港北区日吉 4-1-1

キーワード：高レベル放射性廃棄物、ナチュラルアナログ、地層処分、放射性核種、地下水、熱水

第2図
我が国における温泉の分布(湯原, 1969).
黒丸, 25°C以上, 白丸, 25°C以下.



火山地域にも分布していることがわかる。放射性廃棄物を地下深所(数100 m~1 km)に処分する予定であるが、この地下深所には、温泉水、熱水が広く分布している可能性もある。熱は、廃棄物からも放出され、廃棄物外側の岩盤の温度は最大70°C位と考えられている(動力炉・核燃料開発事業団, 1992)。この熱により地下水が熱水となることも考えられる。

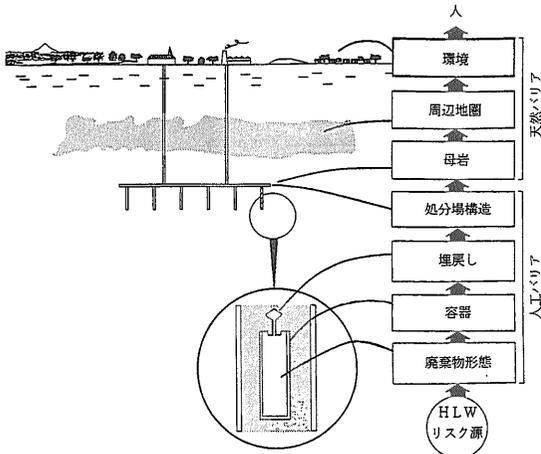
これらの熱水が流動し、放射性廃棄物と接し、放射性核種を溶解し、運搬する可能性もある。また、地下深所では、地下水の流動が通常に行われているので、地下水による放射性核種の運搬について考えることも重要である。

第2表に我が国で考慮すべき地質事象の例を示した。この表の中で熱水や温泉による放射性核種の移動に関する研究は今までにほとんどなされてこなかったといえる。

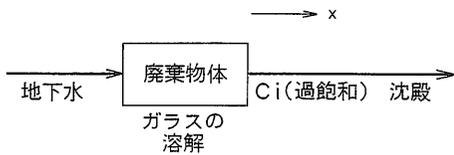
第2表 我が国で考慮すべき地質事象

- 地震活動
- 断層活動
- 隆起・侵食
- 火成活動
- 熱水作用, 温泉
- 気候変動と海面変化
- 地下水流動

放射性廃棄物から放射性核種が人間圏, 生物圏にまで移動する間には多くのバリアが存在する。これを多重バリアシステムと呼ぶ(第3図)。この全体のシステムにおける放射性核種の移行を知るには、それぞれのバリア(サブシステム)における移行が明らかにされないといけない。この多重バリアシステムは大きく人工バリアと天然バリアに分けられ



第3図 多重バリアシステムの概念(P. A. G. I. S., 1984)



第4図 移流-沈澱カインेटィックスモデル(鹿園, 1995)

る。人工バリアシステムにおける放射性核種の移行解析については、多くの研究がある(例えば、動力炉・核燃料開発事業団, 1992)。ここでは、人工バリアについては取り上げず、天然バリア、特に岩石圏内における地下水と熱水による放射性核種の移行について考える。この移行期間は長期にわたる。従って、室内実験や地下施設における放射性核種移行に関する研究だけでは、この長期の時間スケール、広範囲の空間スケールの核種移行の解析と予測が行えない。このことを可能にするのは以下に紹介するシミュレーション研究とナチュラルアナログ研究である。

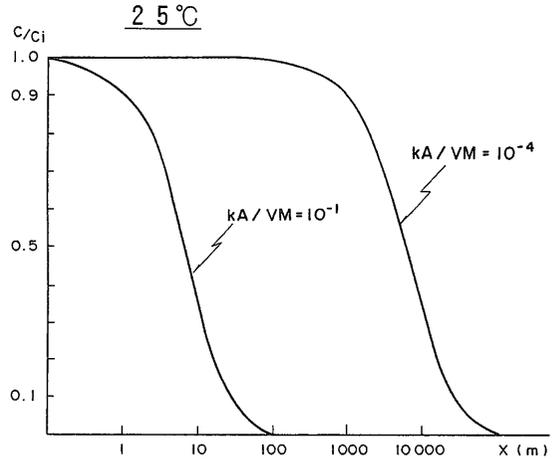
2. シミュレーション研究

2-1 地下水・熱水による物質移行

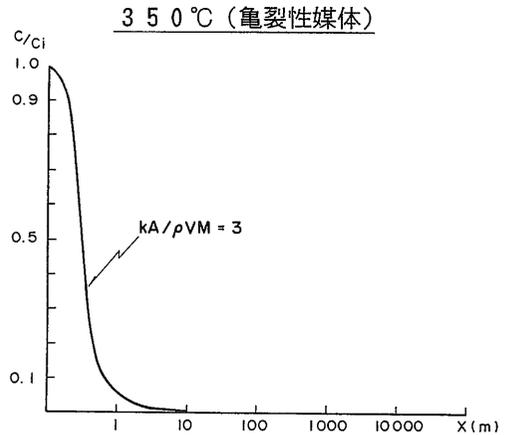
地下水移行に関する今までの研究は主として以下で表される移流-分散モデルに基づいている(例えば、P. A. G. I. S., 1984)

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -V \frac{\partial C_i}{\partial X} + D \frac{\partial^2 C_i}{\partial X^2} - \lambda_i C_i + \lambda_{i-1} C_{i-1} - \partial S_i / \partial t \quad (1)$$

ここで、左辺：水溶液(地下水)中の放射性核種*i*の濃度変化率、右辺第1項：移流による変化、第2



第5図 地下水中のC/C_i(濃度/初期濃度比)とx(廃棄物体からの距離)との関係(鹿園, 1995)



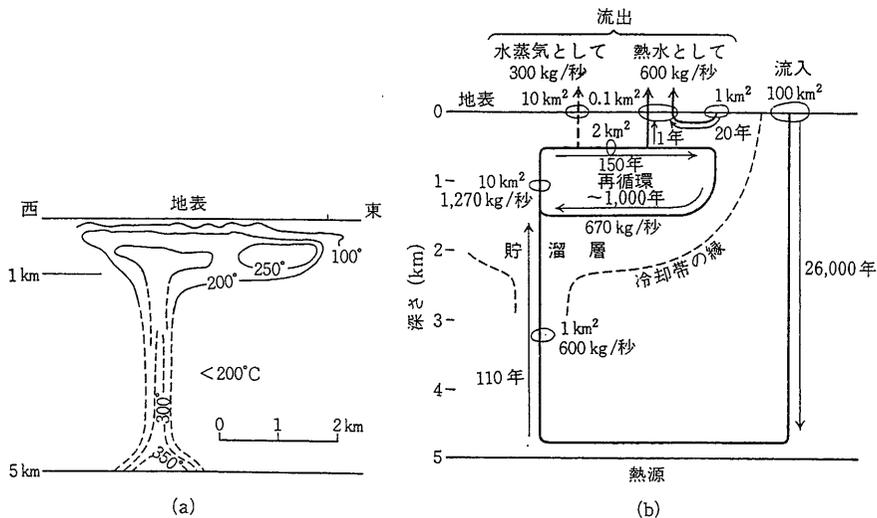
第6図 熱水中のC/C_i(濃度/初期濃度比)とx(廃棄物体からの距離)との関係(鹿園, 1995)

項：分散による変化、第3・第4項：放射性核種の壊変、第5項の相互作用として放射性核種の吸着平衡と分配を考える。

しかしながら、長期にわたる放射性核種の移行の場合は、吸着・分配だけでなく地下水からの鉱物の生成がこの移行に大きな影響を与える場合があるであろう。そこで、筆者(1995)は、第4図に示す移流-沈澱モデルに基づいて地下水・熱水からの鉱物の沈澱の問題について考えた。その際、以下の式に基づいて計算を行った。

$$C/C_i = \exp\{- (Ak/M\rho v)x\} \quad (2)$$

ここで、C_i：水溶液中のある成分の初期濃度、C：水溶液中のある成分の濃度、ρ：水溶液の密度、x：距離、v：流速、A/M：反応表面面積/水溶液の体



第7図 熱水系の例(Elder., 1966を一部簡略化)ワイラケイ地熱地帯における地下温度分布(a)とパイプモデルによる熱水の働きの解釈(b), 数字中, 年は矢印の間が水が移動するのに要する年数, Kg/秒は水の流量, km^2 はパイプの断面積.

積, k : 沈澱速度定数.

なお, この場合, 一成分・定常状態を仮定し, 拡散が効かないとした.

ここでは, 地下水が流れてきて, ガラス廃棄物固化体と反応し, ガラスからシリカを溶解し, SiO_2 に過飽和な地下水が流動する時, 地下水から SiO_2 が沈澱をし, 地下水中の C/C_i (初期シリカ濃度 (C_i) に対する地下水中のシリカ濃度 (C) の比) と放射性廃棄物からの距離 (x) との関係が求められた(鹿園, 1995). $k, A/M, v$, 温度をパラメータとしてとり, 計算をした結果を第5, 6図に示す. これらのことから以下の2つのことがいえる. (1) kA/vM が 10^{-1} の時は, $x=100 \text{ m}$ 位で地下水中に含まれているシリカのほとんどは沈澱をする. このシリカが沈澱をすれば, 地下水通路がシリカによって充填され, 地下水が流れにくくなる. また, シリカ鉱物に放射性核種が吸着をする. 従って, シリカ鉱物の沈澱が, 放射性核種移行の遅延効果となる. (2) kA/vM が 10^{-4} の時は, C/C_i が 0 に近くなるのは 10^5 m 位であり, シリカの地下水による運搬距離は大きい. 放射性廃棄物と人間圏, 生物圏間の距離は 10^3-10^4 m 以上であろうから, この場合, シリカ鉱物の沈澱による核種の遅延効果は期待できない. (3) 以上の結果より, 放射性廃棄物体の堆積サイトの kA/vM の値を明らかにすることが重要といえ

る.

熱水に対しては, 以下の点がいえる. (1) 350°C という高温の場合, SiO_2 は放射性廃棄物体近傍で沈澱をする. (2) 貯溜層であれば 100°C でも SiO_2 は放射性廃棄物体の近くではほとんどが沈澱をする. (3) しかし, 亀裂性媒体で流速が大きく, かつ低温の場合はシリカの沈澱は遠距離に至るまで起こらず, 人間圏, 生物圏にまで達することも考えられる.

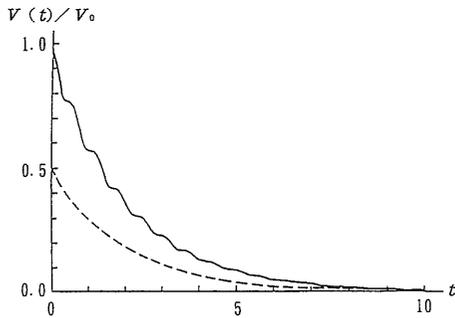
2-2 地球科学分野におけるシミュレーション研究

地球科学の分野においては, 長期の地球科学現象の解析が多くなされている. ここでは, 第2表にまとめた地質現象に関して今までになされてきたシミュレーション研究の簡単な紹介をする.

2-1 で述べたことは, 流動する地下水や熱水から SiO_2 が沈澱する場合の研究例である. 地下水や熱水が流動した場合, 一方向的に鉱物がこれらから沈澱をするだけではなく, 地下水, 熱水が岩石と鉱物を溶解する現象も起こる. 水-岩石相互作用の研究は放射性核種移行に関するシナリオ解析では, ほとんど今までになされてこなかった. しかし, 地球科学の分野では, 今までに多くの水-岩石相互作用に関するコンピュータシミュレーションが行われている.

(1) 熱水系における物質移動

地球科学の分野では, 地熱, 鉱床などを研究する



第8図 山体の体積の経時変化、波線は侵食不可能な部分の体積の変化(Kashiwaya, 1986)

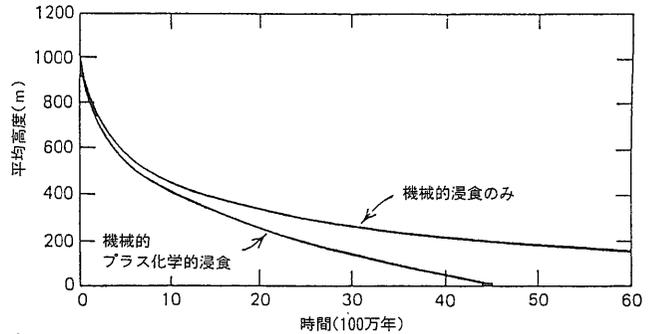
目的で、以下のシミュレーション研究がなされてきた。(1)熱水の流動に関する研究(Cathles, 1983; Norton, 1984)。(2)熱水-岩石間化学平衡(Shikazono, 1978)。(3)熱水-岩石反応カインेटィックス(Lasaga, 1984)。(4)反応-流動カップリングモデル(Cathles, 1983; Lasaga, 1984; Lichtner, 1985, 1988; Steefel and Lasaga, 1994)。

これらの研究の目的と、放射性核種の移行を明らかにする目的では、扱う空間・時間スケールが異なっている。

例えば、熱水作用の行われている範囲(熱水系の空間スケール)の最大値としては、ワイラケイ地熱系(ニュージーランド)の例をみるとよい(第7図)。この熱水系をいくつかのサブシステムに分けることができる。すなわちこれは、流入帯、貯溜層、流出帯からなる(第7図)。それぞれの場における熱水-岩石相互作用、熱水流動は異なる。貯溜層では、熱水はゆっくりと流動し、流出帯では速い。熱水が急速に流動し、割れ目が鉱物で充満し、熱水が流出できなくなる。ここでは、熱水の流出は、100-1000年で終わると考えられている。しかし、1つの熱水系全体の寿命はもっと長く、200万-300万年続くこともある。

(2)風化・隆起・侵食

風化、隆起、侵食作用により地表の状態が変化すると地下水流動が変化をする。また、長時間経つとこれらの作用により放射性廃棄物体が地表に出てくることもあり得る。従って、これらの作用についての定量的評価が重要である。雨水が地表に降り、地下に浸透し、土壌水、地下水となる。表面を流れる表面流水もある。この様な水、大気に岩石がさらされると、岩石は風化作用を受ける。化学的風化作



第9図 機械的侵食のみおよび機械的と化学的侵食の複合による大陸高度の減少(Holland, 1979)

用によって、岩石から元素が溶解をする。化学的風化作用については、水の流動-溶解、沈澱カインेटィックスをもとに解かれている(Lasaga, 1984; Brimhall et al., 1985; Auge and Brimhall, 1989)。

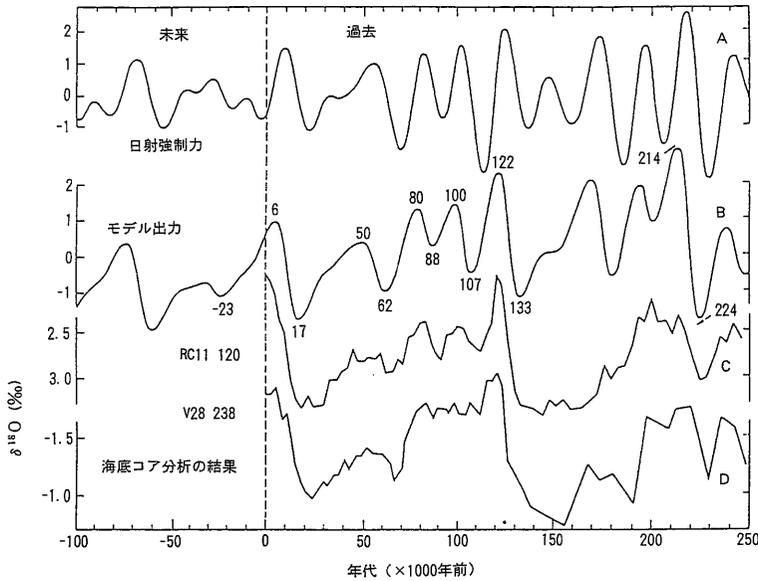
化学的風化には鉱物の溶解度、溶解速度、沈澱速度、水の流動速度が効く(Stumm and Morgan, 1979)。

隆起、侵食は、内的営力と地形を構成する材料の物性とそれに働く侵食力(地形形成営力)によって規定される。内的営力を考慮しないで地形形成営力だけで山体の侵食過程を論じた研究がいくつかなされている(例えば、Kashiwaya, 1986, 1987, 柏谷, 1992)(第8図)。侵食には、機械的侵食と化学的侵食がある。両者を組み合わせた長期間にわたる侵食の計算がなされている(第9図)(Holland, 1979)。

(3)古気候変動

気候変動サイクルとは、“地球の軌道要素の変化に伴う日射量変動という外部強制振動と、気候システムそのものの内部で発生した振動”の相互作用の結果と解釈できる(福山, 1992)。Imbrie and Imbrie (1986)は、氷床の成長に比べて消失は極めて短時間に起こることにより、外部強制力に対して非対称的な応答が導き出されるとして、気候変動の時間発展を導いた(第10図)。これより、10万年サイクルが離心率サイクルであることを示した。

気候システムの中で1-10万年の時間スケールで作用する全球温度や氷床体積などの複数の物理メカニズムを考えにいった非線形気候振動子モデル(Letreat and Ghil, 1983)では、太陽放射の変化がない場合、自由振動の周期は1万年程度にしかならない。ところが、天文周期(外部強制)を加えると、10万年サイクルになる。この1.8-41万年周期のミランコヴィッチサイクルに関しては多くの研究があ



第10図 「鋸歯状」変動を再現した簡単な強制応答モデル(Imbrie and Imbrie, 1980)

る。

以上あげた地質事象以外にも、海面変動、堆積作用、堆積盆地内の流体移動、これらにともなう淡水/塩水境界の変化等の長期(1万年-100万年)にわたる地質事象に関するコンピュータシミュレーションがなされているが、これらについては省略した。

3. ナチュラルアナログ研究

将来の自然現象がシミュレーション計算の結果になるかどうかを証明することは特に長期の場合は難しい。天然のバリアでの長期にわたる放射性核種の移行はいくつもの地質現象の重なった複雑なプロセスである。この様な複雑なプロセスのシミュレーションを行うことは難しい。そこで、天然の廃棄物類似体(ナチュラルアナログ)を見出し、この廃棄物類似体からの長期にわたる複合的な物質移動のプロセスとメカニズムについての研究を行う必要がある。この種の研究をナチュラルアナログ研究という。

Millerほか(1994)は、ナチュラルアナログ研究を以下の3つに分けている。(1)ファーフィールド(天然バリア)の研究、(2)ニアフィールドの研究(廃棄物体—ガラス、金属、ベントナイト、コンクリート、セメント、セルロース等—の研究)、(3)放射性

核種の放出と運搬プロセスに関する研究(溶解度、水溶液中の存在状態、吸着、遅延(吸着、イオン交換、沈澱等)、マトリックス拡散、コロイド、還元フロント、微生物、ガス放出等)。

この様にナチュラルアナログ研究は、最近では広い意味で用いられているが、ここでは、(1)の研究について簡単にまとめる。

天然では、様々な廃棄物類似体があり、これに影響を与える地質現象は多い。それらとして、第2表にあげた地震活動、隆起・侵食、火成活動、熱水流動、気候変動、海面変動、地下水流動が我が国では特に考慮すべき地質現象である。それぞれの事象に対するナチュラルアナログ研究が行われているが、ここでは熱水流動、地下水流動に対するナチュラルアナログ研究の例を第3, 4表にまとめた。それは、地下深所での放射性核種の移行が主として低温から高温の水(地下水、熱水)によってなされると考えられるからである。

第3表には熱水系における変質、流動、反応に対する研究例がまとめられている。廃棄物の類似体としては、ウラン鉱床、種々の貫入岩体、深成岩体、活地熱系、過去の地熱系が考えられてきた。これらの研究では廃棄物類似体からの距離による様々な元素組成や酸素同位体組成の変化が求められている。例えば、オクロ鉱床(ガボン)は天然原子炉とい

第3表 今までのナチュラルアナログ研究(高温条件;主に熱水シナリオ)の代表例(Brookins, 1987; 鹿園, 1995など)

研究対象	研究例	
貫入岩体		
・エルドラ・ブライアン岩株とアイダホ・スプリングス層	コロラド州	Brookins (1982)
・アラモサ・リバー岩株-ブラトロ・コンプレクス	コロラド州	Brookins et al.(1983)
・WIPP地区蒸発岩中へのランプロファイア貫入岩		Brookins (1981b)
ウラン鉱床		
・メリースペイル・ウラン鉱脈と変成岩の接触面	アメリカ合衆国ユタ州	Shea(1982)
・オクロ・ウラン鉱床	ガボン	Brookins (1978), (1981a)・日高・増田(1991)
・ニードルスイ・ウラン鉱脈	スコットランド	MacKenzie et al.(1989, 1991)
・ジャレリース・ウラン鉱脈	フランス	Menager et al.(1992b)
・サウステラス・ウラン鉱床	コーンウォール, イギリス	Hooker et al.(1989)
・バルモットゥ・ウラン-トリウム鉱床	フィンランド	Jaakkola et al.(1989)
熱水変質		
・フェントン・ヒル高温岩体発電試験孔熱水変質岩	ニューメキシコ州	Brookins and Laughlin(1983)
・村上粘土鉱床	日本	亀井ほか(1993)
・オーリアト花崗岩体の熱水変質	フランス	Parneix(1992)
堆積岩		
・ロホロモンド粘土質堆積岩層	スコットランド	MacKenzie et al.(1990)
・ブループスター石灰岩	スコットランド	Read(1988), Higgs(1989)

第4表 今までのナチュラルアナログ研究(低温条件;主に地下水シナリオ)の代表例

研究対象	研究例	
ウラン鉱床		
・アリゲーター・リバー・ウラン鉱床	オーストラリア	Isobe et al.(1992) Murakami et al.(1992) Hardy and Duerden (1989) Cramer(1989)
・シガー・レイク・ウラン鉱床	カナダ	Jakubick and Church (1986)
・オクロ・ウラン鉱床	ガボン	Loss et al.(1989) Brookins (1990)
地下水		
・アルカリ性鉱泉	オマーン	Bath et al.(1987a, b) McKinley et al.(1988)

われ, 多くの研究がなされている(Jakubick and Church, 1986; Curtis et al., 1989; Loss, 1989; Brookins, 1990). ここでは鉱床周辺の岩石の化学組成と同位体組成が多く求められている. その結果, ウラン鉱床は堆積岩類の続成過程で酸化的なウランを含む鉱液が還元され出来たと考えられている. 生成温度としては120-180°C位と考えられている(Ganthier-Lafage et al. 1989). ここでは, 核分裂の時に発生した熱により熱水循環が起こったといわれている(Ganthier-Lafage et al. 1989). この様な熱水循環が起こったが, 鉱床母岩中の化学組成, 同位体組成はあまり変化をしていない. 例えば, 核分裂由来の元素であるアクチノイド, 鉛, ビスマスの移動距離は短く, オクロ鉱床の母岩がこれらの元素の保持に有効であると指摘されている(ブルッキンズ, 1987).

花崗岩体に関するナチュラルアナログ研究は多く

なされている. それは, ヨーロッパ, カナダ等で花崗岩体中に放射性廃棄物体を処分する計画があるためである. 熱水と花崗岩が反応を起こした時に生じる変質鉱物の分布に関する研究がなされている(Menager et al., 1989, 1992a, b; Parneix, 1992). これらの研究では希土類元素, ウランなどの重元素が変質鉱物に濃集し, 熱水変質を受けた花崗岩が天然バリアとして有効に働くことが示唆されている.

我が国では熱水流動のことを特に考慮したナチュラルアナログ研究がなされる必要があるが, ほとんど行われていない(亀井ほか, 1993). 例えば, 2-1で示したシミュレーションの結果を評価するナチュラルアナログ研究(例, 熱水系におけるシリカの分布)がなされることが望まれる.

第4表には地下水流動に関するナチュラルアナログ研究の例をまとめた. 今までになされた低温のナチュラルアナログ研究の多くは, ウラン鉱床の二

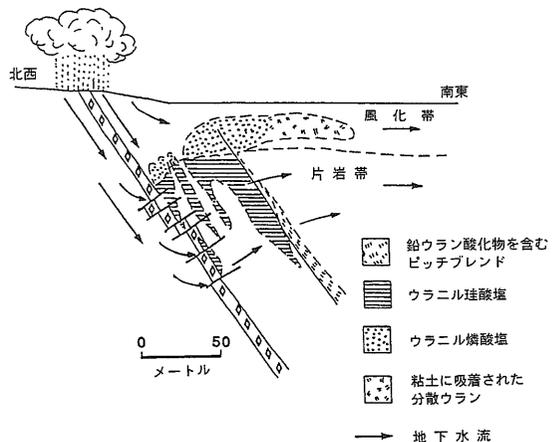
次の元素移動に関するものである。例えば、オーストラリアのアリゲータ・リバー・ウラン鉱床では、酸化された地下水によってウランが二次的に移動するが、長距離は移動しないと考えられている(第11図)。ウラン鉱床が有機物の多い還元的条件で生成した場合、地下水によってウランはあまり移動せず長時間保持されると示されている(例、日本の東濃鉱床)(動力炉・核燃料開発事業団, 1992; Shikazono, 1993)。

ある地域における過去から現在までの地下水の挙動について明らかにすることによって、未来の地下水挙動を明らかにすることも可能となるであろう。この古水理地質学の研究として Chapman and McEwen (1993)は以下をあげている。

- (1)地球化学；古気候，水-岩石相互作用，地下水流動，地下水年代，地下水混合，深部地殻における現象，核種移動速度，地下水流動を決めるパラメータの研究，
- (2)鉱物学；断裂の充填鉱物，孔隙構造，孔隙の大きさの研究，
- (3)地史；古気候変動，テクトニクス，堆積，鉱化作用の研究，

過去の地下水の性質を明らかにすることは、地下水を直接分析することが出来ないで難しい。しかし、地下水から出来た鉱物の同位体組成は地下水の同位体組成を反映している。従って、鉱物の同位体組成を分析し、地下水の同位体組成を求める研究が最近多くなされている。例えば、アメリカ合衆国ネバダ州ユッカマウンテン地域の不飽和帯，飽和帯の方解石の同位体組成(炭素，酸素，ストロンチウム，ウラン同位体組成)を求め、地下水面の変化の推定がなされている(Bottomley, 1993; Marshall et al., 1993)。しかしながら、長期にわたる地下水流動，地下水水質の変化を明らかにすることは、地下水の分析を直接行えないで難しい。そこで、現在の地下水の研究が多くなされている。この種の研究が地下実験施設でなされている(例えば、モル(ベルギー)，東濃，釜石(日本)，ストリップ(スウェーデン)，グリムゼル(スイス))。これらでは地下水の化学組成，同位体組成，年代，広域流動パターンが求められている。

地下実験施設以外に、様々な岩石と地下水反応に関する研究が最近行われている(Frape et al., 1993;



第11図 アリゲーター・リバー・クーンガラ鉱体の断面図。ウラン鉱物の分布を示す(Payne, 1991)。

Toulhoat et al., 1993; 動力炉・核燃料開発事業団, 1992)。これらの研究では、地下水の化学組成が鉱物と水溶液の化学平衡を基に解釈されている。深層地下水の場合は、化学平衡に達している場合もあるが、浅層地下水では一般には化学平衡に達しない。そこで、鉱物と地下水反応に関するカイネティックスの研究が重要である。本稿では、廃棄物反応後の地下水組成を与えたが、廃棄物と反応する前の地下水がどのような組成を持っているのかによって、地下水-廃棄物間反応も変わるであろう。従って、地下水水質の支配要因に関する研究も重要である。

4. 今後の研究

以上、地下水・熱水に関するシミュレーション研究とナチュラルアナログ研究の現状について簡単にまとめた。このことから、今後行うべき研究が多くあることが分かるが、主な研究として以下があげられる。

(1)地質学的な場所の条件

場所の条件によって、物質移行が大きく異なることを2-1で示した。従って、それぞれの場所の特性に関する研究が必要であるといえる。例えば、岩石物性(透水係数，化学物性等)，深層水の特性はそれぞれの場で異なる。

(2)温度条件

今までの地球科学分野におけるナチュラルアナログ研究，シミュレーション研究では、低温条件

(25°C), 高温条件(200°C以上)に関する研究がなされている。しかし, 中温(25-200°C)条件の研究はほとんど行われていない。しかし, 地下深所(1 km位まで)では, 中温になる可能性が大きい。これらは水を介在したマグマの熱, 地温勾配, 放射性廃棄物体からの熱によってもたらされる。

(3)時間尺度

地球科学分野におけるシミュレーション研究, ナチュラルアナログ研究では, 1万年-100万年位の長期間に対する研究が多くなされてきた。しかし, 短期間の研究例は少ない。今後は10年-1万年位の研究を多く行う必要がある。

(4)突発事象・シナリオ

今までの研究は, 時間に対してあまり変動のない定常的シナリオを考えている。この他に突発事象(地震, 火山噴火, 地すべりなど)にともなう変動の研究が我が国では重要であろう。これらにより引き起こされた地下水-熱水流動に関するシミュレーション研究, ナチュラルアナログ研究はほとんど行われていない。

(5)シミュレーション研究, ナチュラルアナログ研究

今までのナチュラルアナログ研究は定性的である。これらの研究に基づいて, シミュレーション研究の結果を評価することは難しい。これらの欠点をなくするためには両研究を組み合わせた研究が必要であろう。

地球科学の分野のシミュレーション研究は過去に起こった現象の解析である。長期核種移行解析では未来予測が重要である。各時間スケール, 空間スケールに対してどのモデルが当てはまるかの検討が必要である。例, 移流-分散-収着モデル, 移流-沈澱カインティックモデル, 複合プロセスのシミュレーション, ナチュラルアナログ研究が必要である。例えば, 地震前兆と地震後等に伴う地下水系, 熱水系の変化に関する研究は重要であろう。

以上のように多くの問題点があるが, ナチュラルアナログ研究とシミュレーション研究以外に長期の予測をする方法はないので, この種の研究法の進展と確立が望まれる。

参考文献

Auge, J. J. and Brimhall, G. H. (1989): *Econ. Geol.*, **8**, 506-528.
Bath, A. H., Christofi, N., Neal, C., Philp, J. C., Cave, M. R.,

McKinley, I. G. and Berner, V. (1987a): Nagra Technical Report, NTB 87-16, Nagra, Wettingen, Switzerland, and BGS Technical Report, FLPU 87-2.
Bath, A. H., Berner, V., Cave, M. R., McKinley, I. G. and Neal, C. (1987b): In: Come, B. and Chapman, N. A. (editors) *Natural analogues in radioactive waste disposal*. CEC Radioactive Waste Management Series, EVR 11037, 167-178, Commission of the European Communities, Luxembourg.
Bottomley, D. J. (1993): Proceedings of an NEA workshop Paris (France), 9-10 November 1992, 169-184.
Brimhall, G. H., Alpers, C. N. and Cunningham, A. B. (1985): *Econ. Geol.*, **80**, 1227-1256.
ブルッキンス, D. G. (石原健彦・大橋弘士訳) (1987): 放射性廃棄物処分の基礎〈地球化学的アプローチ〉, 現代工学社。
Brookins, D. G. (1978): *Chem. Geol.*, **23**, 309-323.
Brookins, D. G. (1981a): In: D. G. Moore, ed., *The Scientific Basis for Nuclear Waste Management*. III. Plenum Press, New York, 275-282.
Brookins, D. G. (1981b): In: D. G. Moore, (ed.), *The Scientific Basis for Welfare Waste Management*. III. Plenum Press, New York, 307-314.
Brookins, D. G. (1982): *Nucl. Tech.*, **59**, 420-428.
Brookins, D. G. and Laughlin, A. W. (1982): *J. Volc. Geoth. Res.*, **14**, 18-35.
Brookins, D. G., Abashian, M. S., Cohen, L. H., Williams, A. E., Wollengerg, H. A. and Flexser, S. (1983): In: D. Brookins, ed. *The Scientific Basis for Nuclear Waste Management*. V. VI. Elsevier Scientific Pub. Co., New York.
Brookins, D. G. (1990): *Waste Management*, **10**, 285-296.
Cathles, L. M. (1983): *Econ. Geol. Mon.* **5**, 439-487.
Chapman, N. A. and McEwen, T. J. (1993): In: *Paleohydrogeological methods and their applications*. Proceedings of an NEA workshop, Paris (France), 9-10 November 1992, OECPOECD, 23-38.
Cramer, J. J. (1989): In: Come, B. and Chapman, N. A. (editors) *Natural analogue working group: Third meeting, Snowbird, June 1988*. CEC Nuclear Science and Technology Report, EVR 11725, 50-56, Commission of the European Communities, Luxembourg.
Curtis, D. B., Benjamin, T. M., Gancarz, A. J., Loss, R., Rosman, J. K. R., DeLaeter, J. R., Delmore, J. E. and Maeck, W. J. (1989): *J. Applied Geochemistry*, **4**, 49-62.
Elder, J. W. (1966): *Bull. N2 Dep. Scient. Ind. Res. Bull.*, No. 169, 114P.
動力炉・核燃料開発事業団(1992): 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書-平成3年度。
Frape, S. K., Blomquist, R., McNutt, R. H. and Kamineni, D. C. (1993): Proceedings of an NEA workshop Paris (France), 9-10 November 1992.
福山 薫(1992): 地球環境変動とミランコヴィッチサイクル(安成哲三・柏谷建二編), 3-24。
Ganthier-Lafage, F., Weber, F. and Ohmoto, H. (1989): *Econ. Geol.*, **84**, 2286-2295.
日高 洋・増田彰正(1991): 地質ニュース, no. 448, 46-53。
Higgo, J. J. W. (1989): BGS Technical Report, WE189140.

- Holland, H. D. (1979): *The Chemistry of Atmosphere and Oceans*. New York, Wiley.
- Hooker, P. J., Ivanovich, M., Milodowski, A. E., Ball, T. K., Dawes, A. and Read, D. (1989): BGS Technical Report, WE/89/13.
- Isobe, H., Murakami, T. and Ewing R. C. (1992): *J. Nuclear Materials*, **190**, 174-190.
- Jaakkola, T., Suksi, J., Suutarinen, R., Niini, H., Ruskeoniemi, T., Soderholm, B., Vesterinen, M., Blomquist, R., Halonen, S. and Lindberg, A. (1989): *Geological Survey of Finland; Nuclear Waste Disposal Research Report*, YST-64.
- Jakubick, A. T. and Church, W. (1986): *Atomic Energy Board of Canada, Research Report*, INFO-0179, Ottawa, Canada.
- 亀井玄人・湯佐泰久・桜木勇治・二口克人・高野 仁(1993): *資源地質*, **43**, 365-373.
- Kashiwaya, K. (1986): *地形*, **7**, 69-77.
- Kashiwaya, K. (1987): *Earth Surface Processes and Landforms*. **12**, 39-46.
- 柏谷建二(1992): *地形形成営力の変動とミランコヴィッチサイクル*(安成哲三・柏谷建二編), 53-67, 古今書院.
- Lasaga, A. (1984): *J. Geophys. Res.*, **89**, 4009-4025.
- Lichtner, P. C. (1985): *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 779-800.
- Lichtner, P. C. (1988): *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 143-165.
- Loss, R. D., Rosman, K. J. R., Delaeter, J. R., Curtis, D. B., Benjamin, T. M., Gancarz, A. J., Maeck, W. J. and Delmose, J. E. (1989): *Chem. Geol.*, **76**, 71-84.
- MacKenzie, A. B., Scott, R. D., Houston, C. M. and Hooker, P. J. (1989): BGS Technical Report, WE/90/4.
- MacKenzie, A. B., Scott, R. D., Linsalata, P., Davidson, C. M. and Hooker, P. J. (1990): BGS Technical Report, WE/90/2.
- MacKenzie, A. B., Whitton, A. N., Shimmield, T. M., Jemielita, T. A., Scott, R. D. and Hooker, P. J. (1991): BGS Technical Report, WE/91/37.
- Marshall, B. D., Dtuckeess, J. S., Peterman, Z. E. and Whelan, J. F. (1993): *Proceedings of an NEA workshop Paris (France)*, 9-10 November 1992, 147-160. porous medium. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 143-165.
- McKinley, I. G., Bath, A. H., Berner, U., Cabe, M. and Neal, C. (1988): *Radiochimica Acta*, **44/45**, 311-316.
- Menager, M-T., Memet, C. and Petit, J. C. (1989): *Proceedings of the 6th International Symposium on Water-Rock Interaction*, Malvern, August 1989.
- Menager, M-T., Petit, J-C. and Brocandel, M. (1992a): *Applied Geochemistry*, Suppl Issue No. 1, 217-238.
- Menager, M-T., Memet, C., Petit, J. C., Cathelineau, M. and Come, B. C. (1992b): *Applied Geochemistry*, Supplementary Issue 1, 239-252.
- Miller, W., Alexander, R., Chapman, N., McKinley, I. and Smellie, J. (1994): *Studies in Environmental Science* **57**, Elsevier. p. 395.
- Murakami, T., Isobe, H., Ohnuki, T., Yanase, H., Sato, T., Kimura, H., Sekine, K., Edis, R., Koppi, A. J., Klessa, D. A., Conoley, C., Nagano, T., Nakashima, S. and Ewing, R. C. (1992): *Alligator Rivers Analogue Project Final Report*, Vol. 9, DOE/HMIP/RR/92/079 SKITR 92,20-9.
- Nagra (1985): *Projekt Gebwähr 1985*, NBB 855-02.
- Norton, D. (1984): *Ann. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, **12**, R, 155-177.
- P. A. G. I. S. (1984): *Summary report of phase 1: a common methodological approach based on European data and models*. VI. EUR 9220.
- Parneix, J. C. (1992): *Applied Geochemistry*, Supplementary Issue No. 1, 253-268.
- Read, D. (1988): BGS Technical Report, WE/88/43.
- Shea, M. E. (1982): *Uranium migration at Marysvale, Utah: a natural analog for radioactive waste isolation*. Unpub. M. S. Thesis, Univ. California, Riverside.
- Shikazono, N. (1993): *Res. Geol.*, **43**, 226-227.
- 鹿園直建(1995): *地下水・熱水移行シナリオとナチュラルアナログ研究*. In: *放射性廃棄物と地質科学*. 東京大学出版会.
- Steeffel, C. I. and Lasaga, A. (1994): *Am. J. Sci.*, **294**, 529-592.
- Stumm, W. and Morgan, J. J. (1979): *Aquatic Surface Chemistry*. John Wiley & Sons. New York.
- Toulhoat, P., Beaucaire, C., Michard, G. and Ouzounian, G. (1993): *Proceedings of an NEA workshop Paris (France)*, 9-10 November 1992, 105-116.
- 湯原浩三・瀬野錦三(1969): *温泉学*. 地人書館.

SHIKAZONO Naotatsu (1996): *Simulation and natural analogue studies on geological disposal of high level radioactive waste*.

〈受付: 1995年12月25日〉