

自然が教える放射性廃棄物の行方 - 地下環境と未来の予測のために -

永野哲志* 中山真一**

1 はじめに

放射性廃棄物の処分を円滑に実施するためには、何が解決されていて何が残されているかを明らかにし、社会の理解や納得を得ることが重要である。社会の理解を得るためには、得られた成果を研究者レベルに留めるのではなく、その内容を一般の人が理解できるようにわかりやすい言葉で説明し、また理解しづらいところがあれば指摘を受け修正していく必要がある。

日本鉱物学会では、小学校・中学校の児童、生徒あるいは一般市民を対象として、地球惑星物質科学の普及を目的とした活動を、1997年度から様々な形で繰り返している。その活動の一環として1999年9月には、水戸市常陽藝文センターで日本岩石鉱物鉱床学会主催(日本鉱物学会協賛)の「自然から学ぶ廃棄物処分の方法」と題する中高生向けの講演会が行われた。本文はその講演の中から、筆者らが関係した部分をまとめたものである。放射性廃棄物の問題を一般向けにわかりやすく講演にするようにという要請を受け、発表に際しては、身近なものや現象を取り上げ、また専門用語もなるべく使わないように心がけた。

具体的な講演内容としては、高レベル放射性廃棄物の地層処分を実現に向けて残されている技術的な課題を、空間場及び時間場に関する課題に大別し、それぞれについての取組を紹介した。まず、空間場の課題として、地下環境と地上とにおける放射性元素の性質の違いに言及し、次に、時間場の課題に関しては、遠い未来の予測のための研究例を紹介した。

2 深部地下における放射性元素の性質

2.1 ものが水に溶ける

身近な現象として、まず「ものが水に溶ける」現象を取り上げる。ただし、ものがどのようにして溶けるのかはふれずに、どれくらい溶けるかについて話を進める。どれくらい溶けたかを表すものとして、溶解度というものがある。たとえば、塩を水に入れると溶けて透明になるが、水の中に入れる塩の量を増やしていくと、そのうち溶けずに容器

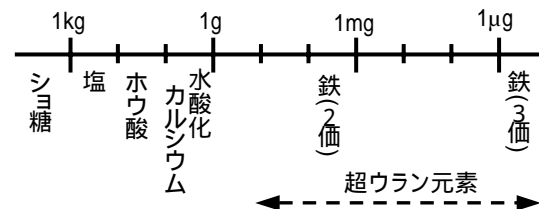


Fig.1 20 の水1リットルに溶ける量

の底に沈むようになる。そのとき水に溶けている量を溶解度という。つまり、溶けることができる最大量である。溶解度が高いということはたくさん溶けるということである。

Fig.1は、20 の水1リットルにもものがどれくらい溶けるかを表している[1, 2]。砂糖の成分であるショ糖は水1リットルに2kgも溶ける。塩はその約10分の1の数100g、ホウ酸、水酸化カルシウムと一桁ずつ溶ける量が少なくなる。すなわち、水に溶けにくくなる。

溶解度が小さく極めて溶けにくいものとして鉄を取り上げる。水に鉄を浸しておくと表面が徐々にさびてくるのはよく知られた事実であるが、それと同時に、極くわずかな鉄が水の中に溶けてくる。ただし、塩が溶けるように鉄が溶けて瞬間になくなってしまふことはなく、表面に鉄さびを残しながらほんの少しの鉄がゆっくりと溶ける。Fig.1に示されるように鉄には2価と3価の2種類がある。3価に比べると2価の鉄は溶けやすいが、それでも水酸化カルシウムの1,000分の1、砂糖に比べれば100万分の1しか溶けない。3価の鉄の溶解度は2価の鉄の1,000分の1とか1万分の1で、さらに溶けにくい。溶解度が0で全く水には溶けないわけではない。おそらく、程度の差こそあれ、どのようなものでも水に溶けるのではないだろうか。図中の超ウラン元素は、放射性元素の中でも有害性が長続きするために重要とされる元素であるが、溶解度から判断するとだいたい鉄と同じくらいの溶けにくさを持った物質と考えられる。溶解度が小さく溶けにくいものでも、数万年という気の遠くなるような時間の中では形が変わるほどに溶けたり、他のものに変質したりする結果、無視することができないことがしばしば起こる。後述するような、ガラスや石が溶ける現象がそれである。

2.2 自然の中でもものが動く

次に、身近なものとして、「ものが自然の中で動く」現象を取り上げる。ここで、「自然の中で」というのは動物

Implication for long-term behavior of radionuclides in deep underground on the basis of natural analogue phenomena, by Tetsushi Nagano, Shinichi Nakayama(nakayama@sparclt.tokai.jaeri.go.jp).

* 日本原子力研究所 環境科学研究部 Department of Environmental Sciences, Japan Atomic Energy Research Institute 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

** 日本原子力研究所 燃料サイクル安全工学部 Department of Fuel Cycle Safety Research, Japan Atomic Energy Research Institute 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

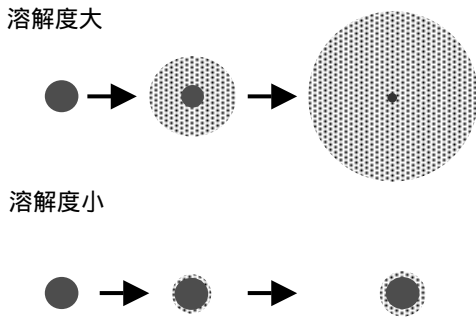


Fig.2 異なる溶解度を持つ物質の溶け方、拡がり方

や人間の力を借りずにとすることで、「動く」というのは移動することを意味する。重力による自然落下や、地震や火山活動などによるものを除けば、身近に観察できるものの動きは、主に3つ要因で起こると考えられる。(1)風で動く。これは空気中に浮遊する小さなものが風によって運ばれる現象で、煙、ほこり、雲などの動きがこれに当たる。(2)水に流されて動く。川や海で砂や土が流されているのを見かけることがある。このようなものの動きは水の流がない所では起こらないが、これとは別に、(3)水に溶けてもものが動く、ことも起こりうる。例えば、先ほど取り上げた塩が動くことを考えた場合、粒のまま流されて動くよりも、むしろ水に溶けて動くであろうし、といった絵の具を水に落とした時に周りににじむのもこれであろう。放射性廃棄物が動く場合も水に溶けて動くのであり、廃棄物が塊(固体)のまま動くのではないことに注意する必要がある。

溶解度の大きいものほど溶けやすいが、一歩進んで、溶けやすいものほど動きやすいとすることができる。Fig.2は、異なる溶解度を持つ物質の水の中における溶け方や拡がり方の違いを模式的に示したものである。上図を溶けやすいもの、下図を溶けにくいものとし、周りには水があるとする。一定の時間立つと上図は下図に比べ溶けやすいため小さくなるのが速く、周りにも容易に拡がるであろう。最終的に、上図が全部溶けて遠くまで拡がった場合でも、下図は極くわずかしか溶けてないために周囲にもほとんど拡がらないことになる。

高レベル放射性廃棄物は地下数百 m に埋設されることが検討されている。ただし、廃棄物をそのまま埋めるのではなく、まず放射性元素をガラスと一緒に溶かし込んで固め、そのガラスを金属と粘土で囲み厳重にバリアを張って周辺に漏れてこないようにする。しかしながら、このように幾重にもバリアを張って閉じこめても、数万年の間には全てのバリアが破られ放射性元素が動く可能性は否定できない。例えば、放射性元素が水に溶けて動く場合、動くのに必要な地下水が粘土を通過し、金属を錆びさせ、ガラスに接触し、ついにはガラス中の放射性元素を溶かす可能

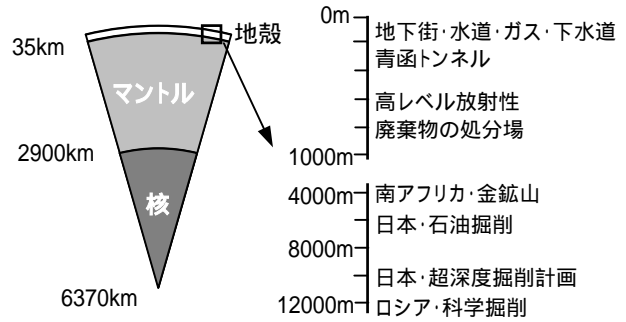


Fig.3 地下空間の利用

性がある。もしそうなった場合にも今度は周辺の地層がその動きを鈍らせてくれるだろう。このような一連のシナリオの中で高レベル廃棄物を地下数百mに埋める利点は、人間の生活圏と離れていること、動くのに必要な地下水の動きが遅いこと、地下は酸素が少なく放射性元素が溶けにくい環境であること、などである。ここでは、酸素の少ない地下環境における放射性元素の化学的性質に焦点を絞りを進めるが、その前に地下数百 m が人間にとってどの程度の深さなのかを考えてみる。

2.3 地下空間の利用

Figure.3 の左側に示されるように、地球の大きさは半径約 6,400km であり、その内部は大まかに核、マントルと地殻の3つの部分に分けることができる。地殻は核やマントルに比べるとわずかの厚さしか持たないが、それでも平均すると大陸部でおよそ 35km の厚さである。このような地球内部の構造は直接地面に穴を掘って調べたわけではなく、特殊な方法で間接的に推定されたものである。

実際に人間が地下を掘って調べたり、利用したりしている形態は Fig.3 の右図に示されるように、地球の極く表層にすぎない。身近な地下空間の利用例としては、地下街や水道、下水道、ガスなどの管の埋設があげられるが、これらはいずれも百 m より浅い所に限られる。特殊なものとしては、青函トンネルが 300m 程度で比較的深いところを利用している。これらに比べると地下数百 m というのは確かに深いわけであるが、人間は実際にはもっと深いところに足を踏み入れている。例えば、南アフリカの金鉱山は 4,000m の深さの所から金を採掘しているし、穴を掘るだけだったら、日本でも石油掘削のために深さ 6,000m 級の穴が掘られている。世界の中ではロシアの 12,000m というのもある[3]。以上のことを考えると、地下数百mというものは日常生活では踏み入ることはない領域ではあるが、現在の技術を持ってすれば利用することが可能な領域ということができる。

2.4 酸素の少ない地下環境

地層処分に関する研究が進むにつれて、地下は酸素ガス（ O_2 ：以後酸素と呼ぶ）が極めて少ない環境であることがわかってきた。この理由については以下のように考えられる。自然界において酸素は植物による光合成で発生する物質であり、地球上で酸素を作り出すらん藻という生物が大量に発生したのが22億年前とか40億年前といわれている[4]。逆に、それ以前の地球には酸素が無かった(少なかった)わけである。したがって、地球誕生からしばらくは大気も海洋にも酸素はほとんど存在しなかったであろう。その後、光合成により酸素を作り出す新しいタイプの植物が太陽光の届く浅い海に大量に発生して酸素を生産し始めた。発生した酸素は最初、当時の海に大量に溶けていた2価の鉄と結びつき鉄酸化物を沈殿させることにより消費された。その後海水中の鉄が沈殿し尽くしてしまうとやがて大気中に放出されるようになった[5]。地球内部にも元々酸素ガスが無かったと考えられるが、その後の光合成により大気や海洋に酸素が供給し続けられたとしても、地下深部まではそれが到達せずに酸素の少ない状態が保たれたと考えられる。

前述した「ものが水に溶ける」現象は固体としての「もの」に限定していたが、固体だけではなく気体も水に溶ける。身近な例では炭酸飲料水やビールに溶けている炭酸ガス(CO_2)がそうである。これと同じように、酸素も水に溶ける。酸素が水に溶けた状態を専門用語で酸化的であるといい、逆に、酸素があまり溶けていない水は還元的であるという。放射性元素は水に溶けて動くと考えられているため、重要なのは放射性元素を溶かしている水の性質である。地下環境に酸素が少ないということは、地下環境にある水、すなわち地下水に溶けている酸素が少ないことを意味する。

地下環境の酸素の量が廃棄物研究で重要とされる理由の一つは、水の中に溶けている酸素量の大小で価数や溶解度などの化学的性質が異なる元素があるためである。以下にその具体的な例を示す。

身近なものとして再び鉄を、また、放射性元素としてネプツニウム(Np)を取り上げる。先に述べたように、鉄には2価と3価の化学形があり、酸素の多い水の中では3価、少ない水の中では2価である。また、Npは放射能が減少しにくい元素のため重要とされる元素であるが、酸素の多い水の中では5価や6価、酸素が少ないときは4価の化学形である。一般的に、酸素が多い水の中のほうが少ない水の中よりも、価数は大きい。もちろん、ナトリウムのように酸素の有無に依らず一定の価数をとるものもある。

重要な化学的性質は Fig.4 に示すように、その価数によって溶解度が異なることである。酸素が多い環境で支配的な3価の鉄は、溶解度の小さい溶けにくいイオンである。一方、酸素が少ない環境で支配的な2価の鉄は溶解度の

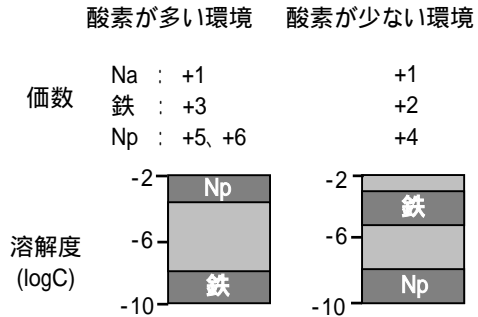


Fig.4 水に溶けている酸素が元素の性質に与える影響

大きい溶けやすいものである。Npについては、鉄とは逆に酸素の多い環境で溶けやすく、酸素の少ない環境で溶けにくい元素である[6, 7]。一般的に地層処分で見られる重要な放射性元素はNpと同じく酸素が多い環境で溶けやすく、少ない環境で溶けにくい傾向にある。以上のことをまとめると、地下環境は酸素が少ないため、鉄は動きやすくNpは動きにくい、逆に酸素の多い地上では鉄は動きにくく、Npは動きやすいといえることができる。

2.5 酸素が少ない条件でのデータの取得

高レベル放射性廃棄物の処分場で想定される酸素の少ない環境で、かつガラスや金属、粘土が混在した環境は地球上に未だかつて存在したことの無い特殊な場であると考えられる。自然界に存在しないような場でどのようなことが起こるのかについて定量的な答えを出すために、実験室で同じような状況を作り出して調べる方法がある。そのためには、まず酸素の少ない環境を作り出すための特殊な実験装置が必要である。しかしながら、実験がなかなか難しいため、必要なデータはまだ不足している。今後酸素の少ない環境でのデータの蓄積が期待されるものとして、(1)放射性元素が水にどのくらい溶けるか、(2)水の中で放射性元素はどのような化学形なのか、(3)石や土に放射性元素がどのくらいくっつくか、(4)放射性元素がSiやFeと結晶を作るか、(5)放射性元素がどのように動くか、(6)金属のさびかた、等がある。

3 遠い未来の予測のために

高レベル放射性廃棄物の中にはその有害性が数万年かけて続くものがあるため、その処分に際しても処分後数万年間の放射性廃棄物の行方を予測しておく必要がある。この数万年という気の遠くなるような長い期間では、一般常識では思いもよらないこと、日常生活では観察できないようなことがゆっくりとした速度で起こる。最初にそれらの例をいくつか紹介する。

3.1 ゆっくりと進む反応

3.1.1 ガラスが溶ける

日常生活では観察できないようなゆっくりとした速度で進む反応として、まず、「ガラスが溶ける」現象を取り上げる。例えば、コップや窓などの材料に使われているガラスも長い間水につけておくと、極わずかではあるがその構成物質が表面から水へ溶けていく。Figure.5 は高レベル放射性廃棄物の化学組成を模擬した非放射性廃棄物を固化したガラスの写真である。ガラスは温度を上げていくと徐々に柔らかくなり、高温ではどろどろの状態となる。Figure.5[8]は、ガラスの材料と模擬放射性元素の混合物を約 1,200 でどろどろにした後、温度を下げて固めたもので、ガラスの中に模擬放射性元素が均質に分布した状態となっている。通常のガラスの色とは異なり、黒色である。

このガラスを 100 の熱湯の中で 200 日間ぐつぐつと煮た場合、溶液中にシリカ(Si)、ナトリウム(Na)やホウ素(B)などガラスを構成する元素が徐々に溶けてくる。ただし、ガラス表面からすべての成分が均質に溶けるのではなく、鉄が水と接したときに表面に錆を作るように、ガラスの表面にもガラスとは別のものを作りながら溶けてゆく。Fig.5 に示されるように、100、200 日の条件では、表面からおよそ 0.5mm の厚さのガラスが溶け、残ったもので粘土質の物質を作り出す。実際に溶液中の Si、Na や B の濃度が増加することから、ガラスが溶けていることを確認することができる。

3.1.2 石も溶ける、溶けて砂・土に変わる

ガラスが表面に別のものを作りながら溶けるように、「石も溶ける」、「溶けて砂・土に変わる」。これを石の風化という。実際の風化はいろいろな作用が働いて進行する。温暖・湿潤な地に目立つ化学的風化作用は、ガラスが溶けるのと同じように、雨水によって石の中である成分は溶け、溶けにくいものは表面に残り、残ったもので粘土を作る現象である。また、温度の変化により石が膨らんだり縮んだりしてもろい石が壊れていく物理的風化作用や、植物の根の押す力で石が細かくなっていくような生物的作用によ

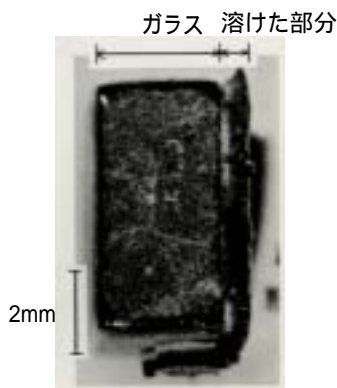


Fig. 5 100、200日間浸出後の模擬ガラス固化体

るものもある[たとえば9]。

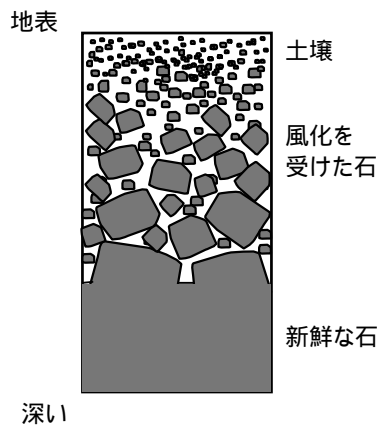


Fig. 6 岩石の風化

石が風化を受けた結果、Fig.6 に示すように、地表付近には細かな石や砂が、また生物の作用が加わって土ができる。一方、深くなると雨水の影響を受けにくくなるため、新鮮でかちかちの石のままである。このような石の風化は目に見えて進むものではなく、数千年のオーダーで徐々にゆっくりと進むものといわれ、長い時間かけてゆっくりと進む現象の典型的なものである。

3.1.3 石の中にある小さな隙間をとってものが動く

次に、「石の中に小さな隙間が有る」事実を取り上げる。Figure.7[10]は建築材料や墓石の材料に使用されている花崗岩という石の写真である。御影石とも言われ、日本においては典型的な石の一つである。この石を円柱状に切り、濃い褐色の $KMnO_4$ 溶液に下の面を浸しておくと、褐色の

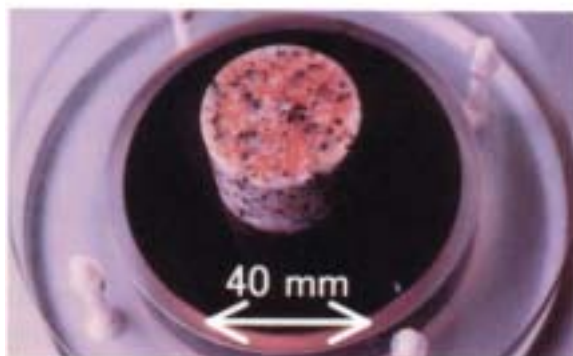
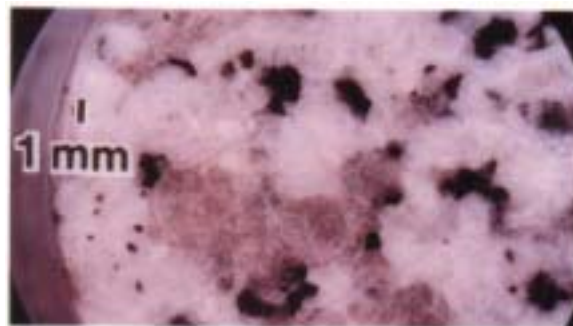


Fig. 7 花崗岩の染色実験

液体が毛管現象により石の隙間を通して上昇し、やがて上の面を褐色に変色させる。この結果は石の中に褐色の液体

が通るような隙間が石の底面から上面まで連なっていることを間接的に示す証拠である。石の中のこのような隙間がどのくらいあいているのかを調べるのに、石を水につけた時に隙間に水が入った分だけ石の重さが増えることを利用する方法が、実際に用いられている。Figure.7 に示す茨城県の稲田花崗岩の場合その隙間の割合は 0.5% 程度である。また、この石を顕微鏡で拡大すると、幅が数十～数百 nm の小さな隙間を観察することができる[11]。

次に、「石の中の小さな隙間を通ってものが動く」速度を調べる方法の一つを示す。アクリルで作った容器を真ん中に石の円盤を入れて 2 つに区切り、一方にインクで色をつけた水を満たす。また、片方にインクの入っていない純粋な水を入れて、色の時間変化を調べる。その結果、最初は当然無色透明であるが、時間がたつにつれインクがしみ出してきて次第に色が濃くなっていく。石の中の隙間を通してインクが動いていることを示す証拠である。色の濃くなるのが速いものほど動きやすく、緩やかなものほど動きにくいことを表している。実際には、インクの代わりに放射性元素を使用し、石の中の隙間を介してのもの動きが調べられている。なぜなら、数万年という長い期間では「石の中の小さな隙間を通ってものが動く」現象も無視できない重要なものと考えられているためである。

3.2 地球史における人間の活動

数万年の時間がどのようなものかを地球の歴史の中でごく簡単に振り返ってみる。Figure.8 は地球の歴史を地球の誕生から現在までを示したものである[5]。地球はおよそ 46 億年前に無数の微惑星の衝突により誕生したと推測されている。微惑星の衝突の際に揮発した物質により水蒸気、炭酸ガス、窒素などを主成分とする原始の大気生まれ、地球が徐々に冷えてくると、やがて水蒸気が雨となって地表に降り注ぎ海が誕生した。原始の大気中に多量に存在した炭酸ガス(CO₂)は海水と反応し石灰岩となって吸収され、逆に、原始大気中には存在しなかった酸素が海のなかから

は、その後の数万年程度から現在に至るまでの気の遠くなるような期間である。初期の人間は狩猟と採集により食を得ていたが、1 万年を切るところからようやく自然の営みを理解し農耕を始めた。その後は、産業革命による工業化社会の開始、ここ数十年の人口の急増、とそれに端を発した地球環境問題と加速度的な展開を見せている。高レベル廃棄物処分対象となる評価期間は、地球の歴史から見ると瞬間的で極わずかではあるものの、人間の活動がほぼ同じような期間内のものであり、また、原子力発電自体が高々 50 年であることを考えると極めて長く気の遠くなるような期間である。

3.3 未来を予測するための手段 - 過去、現在は未来を解く鍵である -

果たして我々は数万年という気の遠くなるような未来を予測することができるのであろうか。できるとしたらどのような手段が考えられるのだろうか。ここで、認識すべき重要なことは、我々は遠い未来のことを予測することはできても、それが正しいか否かを確認することは原理的にできないことである。もちろん、数万年後の我々の子孫が廃棄物処分場の周りを掘り返すことがあったら、子孫が我々の行った予測の正否を知ることができるが、まずそういうことはないであろう。自然現象を予測するものとして天気予報がある。明日の天気や気温などを予想したり、一週間後や長くても 3 ヶ月後の気象状況を予測したりするものであるが、いずれも地層処分では予測しなくてはならない期間に比べると瞬間的である。なによりも、少し待てば実際の結果を知ることができるし、そのために予測技術も向上する。地層処分の研究に必要なことは、正否の確認ができないことを予測し、しかもその予測手段と結果を一般の方に信頼性を持って認めてもらう方法論を探索し、確立することと考える。

現在のところ予測手段としては、室内実験および天然現象の観察が考えられている。一例として、鉄が長期間にど

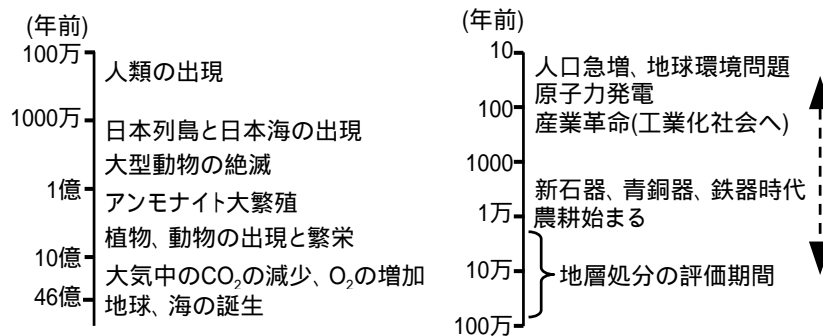


Fig. 8 地球史の中での人間の活動

発生した。約 20 億年前とされる。2,000 万年前には日本列島と日本海が、さらに 300 万年前に人類の祖先が現れた。高レベル廃棄物処分の安全評価で予測する必要があるの

れくらい錆びるかを調べる方法として、まず、室内実験を考える。水の中に鉄の試料を入れると表面から徐々に錆びていくが、錆の厚さを時間とともに測ることにより錆の進

行速度を知ることができる。将来にわたって同じような傾向で錆びると仮定すれば、その進行速度に基づき将来の錆の厚さ、すなわちどのくらい錆びたかがわかる。また、温度を高くして錆の進行を加速する方法もある。次に、天然現象の観察からのアプローチを考える。ある古代文明の遺跡の中から錆で覆われた鉄釘が見つかったとする。その錆の厚さと、古代文明の栄えた年代がわかれば、鉄釘の錆の進行速度についておよその予測ができる。また、その地方の天気を調べれば、鉄釘がおかれていた条件もおよそわかる。室内の短い期間の実験と違って、条件や時間の信頼性に欠くものの、比較的長い期間の実験結果を示していると考えられる。なお、ここで取り上げた鉄釘は本来人間が加工して作った人工のものであるが、長い期間自然の中にさらされて徐々に錆びていったことから本質的に天然現象と見なせるであろう。これらの予測手段は、現在起こっていることは過去にも起こったであろうし、未来にわたって起こるであろうという基本原理に基づいている。すなわち、室内実験は現在起こっている現象が同じように未来まで続くと仮定して予測する方法であり、一方、天然現象の観察では過去から現在にかけて起こったことは、現在から未来にかけても起こるはずであると仮定している。

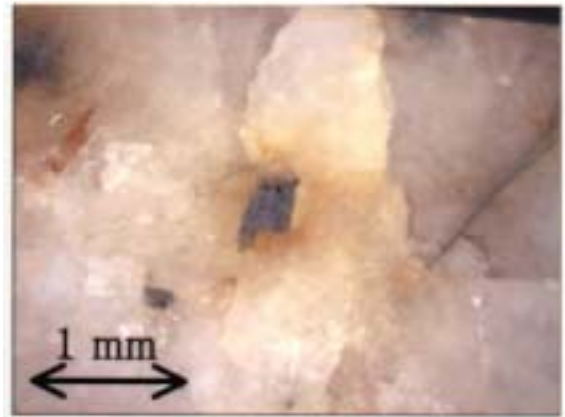
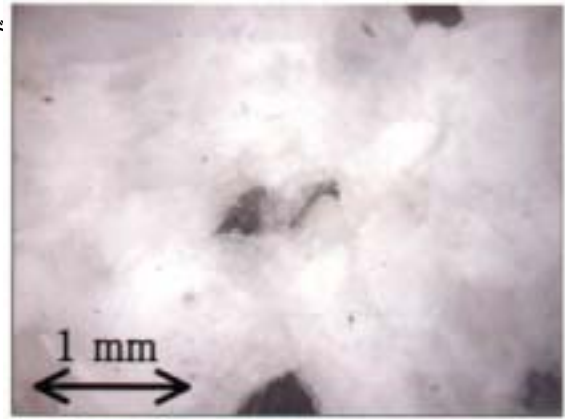


Fig. 10 新鮮な花崗岩と風化した花崗岩

3.4 ウランは地層中で動くか？

長期にわたる放射性廃棄物の挙動を予測するための自然現象の研究例として、オーストラリア北部のウラン鉱床を対象としたものを紹介する[たとえ 12]。ウランは高レベル放射性廃棄物の中に含まれる元素であり、また、放射性廃棄物の中には地層中をウランと同じように動くと考えられる元素があるため、ウランの動きにより処分場のある種の放射性元素の動きを予測できる可能性がある。Figure.9 はこのウラン鉱床の断面図を示している。ウランは図中の灰色部に濃集している。このようなウランの空間的な分布は、図中の斜めの線で示される地面掘削部からの

しているのがわかる。一方、ウラン鉱床の下部においては、上部と同じように地下水の流れがあるにもかかわらずウランが流された形跡がないのは特筆すべきことである。

それでは、鉱床の上下でのウランの分布の違いにはどのような機構が働いたのであろうか。大きな理由の一つに、鉱床の上部と下部で地下水に溶けている酸素の量が違うことがあげられる。先に、水に溶けている酸素の大小で溶ける量の違う元素があることを述べたが、ウランにもそれが当てはまる。すなわち、酸素の多い環境でのウランは水 1 リットルに 0.2g 溶けるのに対し[13]、酸素が少ない場合はその数十万分の 1 とあまり溶けない[14]。鉱床上部の石を調べると酸素の多い環境に特有の石の褐色化が観察できることから、鉱床上部では地下水中の酸素の量が多くウランも溶けやすいために流されて舌状に分布したのであろう。一方、鉱床下部では地下水の酸素が少ないためにウランが流されにくい状態であったと推測することができる。もし廃棄体がこの鉱床の中心部にあることを想像すれば、周りの酸素量の違いで溶解度の異なる元素についての長い期間での動きを示す天然現象と考えることができる。

どの程度の時間を費やし、ウランは舌状の分布を示すほど動いたのであろうか。その答えを出すためにこれまで岩石中や地下水中のウランの同位体比を基準にして見積もる手法がとられてきたが、現在のところ得られた同位対比のデータ誤差が大きく、また、ウランの動きの詳細もはっ

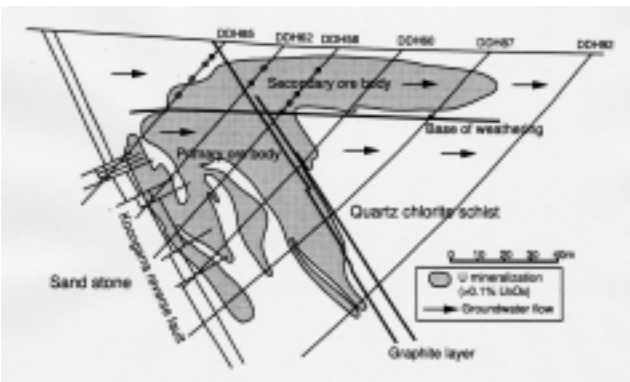


Fig. 9 オーストラリア・クンガラウラン鉱床の断面図

岩石試料を調べることにより推定された。図中の右向きの矢印はこの場所での地下水の流れを示している。ウラン鉱床上部では地下水によりウランが流され舌状の形で分布

きりしていないため信頼性のある値を得るまでには至っていない。今後の課題である。

3.5 石がさびる

天然現象の観察を行うためには、観察する試料を手に入れることが何よりも重要なことである。しかしながら、上述したようなウラン鉱床はどこにでもあるようなものではなく、また、岩石試料も一般の人が手軽に入手できるような代物ではない。そこで、次に紹介するのは、身近な天然現象の例である。前に、石が雨水によってゆっくりとした速度で風化され砂や土などの細かい物質に変わっていく石の風化現象を述べたが、その過程で、鉄がさびるように石がさびる現象が起こる。Figure.10 の上図は風化を受けていない花崗岩である。花崗岩は、大まかに白い部分(石英、長石)に黒い部分(黒雲母)が混ざった石として識別できるが、これが風化を受けると黒い部分の周りが Fig.10 の下図のように褐色に変色してくる。これを石がさびるという。黒色部が廃棄物を固化したガラスだとし、長い時間水と接することによりガラスに含まれる放射性元素が溶出し褐色部で示されるように周りに拡がることを想像すれば、この石が錆びる現象も遠い未来を予測するための天然現象の一つと考えることができる。

風化した花崗岩を調べたところ、褐色部には3価の鉄酸化物が生成しているらしい。また、黒色部に含まれる鉄は2価の状態であることから、風化過程における褐色部の生成機構は以下の通りと推定される。まず、黒色部の2価の鉄が雨水と接することにより溶出し、雨水中に酸素が多いことから3価の鉄に酸化される。3価の鉄はその溶解度がきわめて小さいために、3価の鉄酸化物として直ちに沈殿したのであろう。先に述べたように、身近な物質の中では鉄は溶けにくく、特に3価の鉄はほとんど水に溶けない元素であるが、長い期間の中ではごくわずかではあるが水に溶けだし若干拡がることを示す現象である。このような鉄の動きはどの程度のタイムスケールで起こったのであろうか。この答えを出すのに黒色部の減り方から見積もる試みが行われている。黒色部の減り方が花崗岩の風化現象の速さを決めていと仮定すれば、花崗岩試料中の黒色部の定量分析と黒色部の溶解実験で得られた速度定数からおおよそ数万年という時間が得られる。すなわち、Fig.10 の下図は動きにくい鉄の数万年にわたる動きを示している可能性がある。

自然にはここで取り上げた以外にも未来予測の参考になりうる現象が満ちていると考えられるため、コンピュータによる予測計算や室内での実験とリンクさせながら取り入れていく必要があると考える。

4 終わりに

人間が地球科学に期待していることに、自然災害の予測や有用な鉱物資源の探索など、人間の日常生活と直接あるいは間接的に関係するものがある。また、一方で、地球の内部がどうなっているかといった純粋に知的な欲望に起因するものもあるであろう。これを研究者の立場で表現するならば、前者は社会の役に立ちしたがって社会的に受けがよい研究といえるし、後者は目に見えて社会に還元できるものではないが知的な好奇心を満たしてくれる研究といえることができる。本文で紹介した放射性廃棄物の問題や昨今の地球規模の環境問題は、地球科学の知識が、知的な好奇心を満たしつつ、有効に活かされるテーマと考える。その一例として、本文では、未来予測の手段として地球科学の知識が有効に利用できることを、日本原子力研究所の研究の一部に関連づけながら主張した。また、身近なものや現象を取り上げ、意識的に専門用語を使わないようにするなど、表現法についても試行錯誤を繰り返した。本文に対し感想やコメントなどをいただければ幸いである。

謝辞

本文をまとめるに当たりコメントをいただいた核燃料サイクル開発機構の湯佐泰久氏と、表現の平易化の際にご協力いただいた日本原子力研究所の柳瀬信之氏にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 東京天文台：理科年表(机上版)、丸善(1986)。
- [2] Stumm, W., Morgan, J. J.: Aquatic Chemistry, 2nd edn. Wiley Interscience, New York (1981).
- [3] 伊藤久男：超深度ボーリング JUDGE 計画。放射性廃棄物研究 3(1), 3-13 (1996)。
- [4] 渡辺由美子：大気はいつ酸化的になったか? - 大本-Holland 論争について - 。地質ニュース 526, 45-56 (1998)。
- [5] NHK 取材班：地球大紀行、第1巻～第6巻、日本放送出版協会 (1987)。
- [6] Neck, V., Kim, J.I., Kanellakopoulos, B.: Solubility and hydrolysis behavior of neptunium(V). *Radiochimica Acta* 56, 25-30 (1992).
- [7] Nakayama, S., Yamaguchi, T., Sekine, K.: Solubility of neptunium(IV) hydrous oxide in aqueous solutions. *Radiochimica Acta* 74, 15-19 (1996).
- [8] Banba, T.: The leaching behavior of a simulated high-level waste glass. Ph.D. Thesis, Nagoya University (1987).
- [9] 地学団体研究会：新版地学事典、平凡社 (1996)。
- [10] 鈴木隆次, 中嶋悟, 永野哲志, 喜多治之：花崗岩中における物質移動経路としての微小間隙の存在状態。鉱山地質 39(6), 349-354(1989)。

- [11] 山口徹治, 磯部博志, 中山真一: 花崗岩内の微小間隙構造の解析. 放射性廃棄物研究 3(2), 99-107 (1997) .
- [12] Yanase, N., Payne, T.E., Sekine, K.: Groundwater geochemistry in the Koongarra ore deposit, Australia (1): Implication for uranium migration. *Geochemical Journal* 29, 1-29 (1995).
- [13] Takeda, S., Shima, S., Kimura, H., Matsuzuru, H.: The aqueous solubility and speciation analysis for uranium, neptunium and selenium by geochemical code (EQ3/6). JAERI-Research 95-069 (1995) .
- [14] Yajima, T., Kawamura, Y., Ueta, S.: Uranium(IV) solubility and hydrolysis constants under reduced conditions. *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 353)* (Murakami, T. and Ewing, R. C. ed.), Kyoto, Japan, October 23-27, 1994, pp. 1137-1142 (1995).