

# 地下環境学への誘い

自然に学ぶ知恵と技

これまで地層処分の基本的な考え方や、「地層処分」というアイデアの由来について解説してきました。また、多重バリアと呼ばれる仕組みやバリア材として使用される素材の意義と働きについても述べてきました。その方法の一つとして、ローマ時代の釘や約二〇〇年前のウランガラスなどを、長い時間の物質変化の事例として研究するという方法は（第三回連載記事参照）、この分野独自のアプローチだと言えます。

第四回からは、これら放射性廃棄物も含めた人工素材を埋設する地下環境についての解説を行なっていきます。地下環境は、第二回でも触れましたが、多重バリアの中でも数万年以上とい

## 地下環境の働き

— act as a cocoon —

う、最も長期に放射性廃棄物を隔離し続けることを役割とする、非常に重要なバリアです。この「地下環境」については、第二回で「第4のバリア…岩盤（岩石と鉱物）」として簡単に紹介しましたが、「なぜ、地下なのか」という点については、あまり詳細には触れませんでした。

本連載の後半（第四回以降）では、この最も長期にバリア機能を託す「地下環境」の働きと仕組みについて解説を行なっていききたいと思います。

〈地下環境とは〉

まず「地下環境」とは何か、から説明していきましょう。地下環境は、端的に言えば「岩石」と「水（地下水）」から成る世界です（図1）。

図1



●地下環境：岩石と水（地下水）で構成され、地表からの環境変化などの影響を軽減する

### 第4回

◎名古屋大学博物館教授（環境地質学）  
同大学院環境学研究科教授兼任

吉田 英一 氏

1986年名古屋大学大学院理学研究科博士課程（前期課程）地球科学専攻修了。核燃料サイクル開発機構（現日本原子力研究開発機構）主任研究員を経て、2000年名古屋大学博物館助教授、2010年～2014年同博物館館長。2013年より総合資源エネルギー調査会地層処分技術ワーキンググループ委員を務める。

岩石は、鉱物（第二回参照）の集合体です。岩石にはいろいろな種類がありますが、大別すると三つに分類できます。それは「火成岩」「堆積岩」そして「変成岩」です。実はこの順番に、地球上では岩石が形成されてきました。今から約四六億年前、太陽系の形成当初、最初は現在のような惑星は存在せず、より小さな天体である微惑星や隕石で構成されていたと考えられています。それらの隕石や微惑星が衝突を繰り返しながら、徐々に大きな塊となり現在の地球のもととなる原始地球を造っていきます。その段階では、地球上の表面は降り注ぐ隕石との衝突熱で、マグマオーシャンと呼ばれるような岩石の溶けた状態が広がっていました。時間が経つにつれ、隕石の衝突が少なくなり、地球表面は次第に冷えていき、岩石化していきます。このときに行き、温度が下がるに伴って大気中

の水蒸気が雨となり、原始の地球に降り注ぎます。そして地球上の低地に水が集まって「原始の海」となります。約四〇億年前にはすでに海が存在していたと考えられています。この「海（水）」の誕生により、火成岩は波で砕かれ細かい粒子となって、水によって運ばれ、海底に堆積します。これらが固まり「堆積岩」となります。地球上に形成される二番目の岩石です。堆積岩は、「水」がなければできません。近年、火星にも「堆積岩」が確認されました。火星も、地球と同じようにできた証拠と考えられています。

火成岩、堆積岩そして水を伴う原始の地球では、これらの物質循環で、火成岩や堆積岩が再び地球内部へと取り込まれ、温度や圧力によって変形したり変質したりします。これが「変成岩」です。温度が高くなり過ぎると溶けてマグマとなり、地下で冷えれば火成岩となります。それらが、また地表に露出し、海（水）によって侵食を受け砕けて堆積すれば、堆積岩へと変化していきます。

このような岩石と水の相互作用による物質循環は、地球誕生以来止まったことはありません。日頃、このような壮大な時間での動きや変化を感じることはほとんどありませんが、数千万年～数億年という時間スケールで、この瞬間も確実に進行しています。私たちが生活をしている大地はこのようにして造られ、現在に至っています。

「地下環境」は、これらの岩石（火成岩・堆積岩・変成岩）と水から成ります。水は、海から蒸発し、雲となって陸地の内部に移動し、そして雨となり、地表に降り注ぎ、地表から地下の岩石内部へと浸透していきます。岩石中には、微小の隙間や割れ目があります。このような隙間に地表からの水が浸透していき、地下水となって岩石を浸していきます。

日本のような温暖で湿潤な地域では、地下水は豊富で、地下水のないところはありません。地層処分では、このような地下岩石中の三〇〇メートルよりも深い環境に、放射性廃棄物を埋設することを考えています。

## 地下環境の役割

### 〈地下環境の緩衝作用〉

では、地層処分における地下環境の役割について説明していきましょう。まず地下環境は、放射性廃棄物を、私たちの生活空間である地表から物理的に隔離する働きがあります。地表は、大気や水があり、森や海があり、私たちの生活空間としては欠かせない場所です。ですが、大気や水と触れることで、必ず物質は風化（変化）していきます。どんなに硬い岩石であっても、地表では必ず風化します。この風化の進行の度合いは、地表が最も早く、地下に行くほど遅くなります。その理由は、岩石と水（地下水）の触れる度合いが地表が最も大きいからです。水だけではありません。地表付近では生物活動も非常に活発です。植物は、自らを成長させるために根から様々な元素を取り込みます。そのため、根から根酸などを出し、岩石を溶かし、岩石中の元素を吸収します。溶

かされた岩石は、徐々に脆くなり、枯れた植物などと混ざって土（土壌）へと変化していきます。

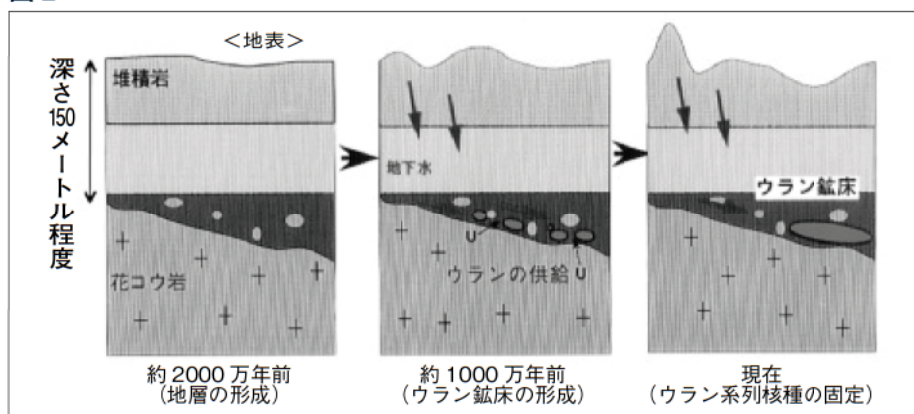
一方、地下では水（地下水）はありますが、酸素に乏しく、生物活動も活発ではありません。したがって、地下に行くほど、風化の度合いも少なくなり、岩石も新鮮なままの状態を保ち易くなります。

つまり、地下環境は、地表付近での活発な状態変化から物理的に隔離できる領域であると言えます。例えば、何千万年、何億年という古い時代の地層中から石油や石炭をはじめとするいろいろな鉱物資源が産出するのも、地下環境の物理的隔離作用によって、地表からの風化から免れた結果だといことができます。

次に重要な性質は化学的性質です。地下は、大気中の酸素と触れにくく、ほとんどの場合、還元状態です。地表から浸透する水も、地表付近では酸素と接することで酸化（酸素が溶け込んでいる状態）されていますが、地表から地下の岩石内部に浸透するにつれ、

微生物や鉱物に酸素が消費され、徐々に還元状態になっていきます。この還元状態が、放射性元素の溶解度を抑えるのに役立つことは本連載（第二回）

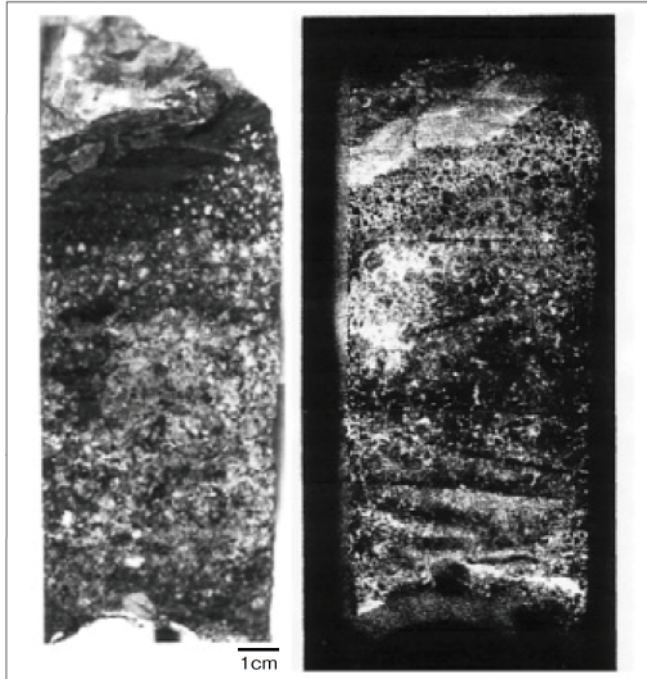
図2



●月吉ウラン鉱床のできる過程：地表から浸み込んだ酸化した地下水に溶けたウランが、地下で還元されることで溶解度が下がり、鉱物などに吸着され濃集する



写真 1



●砂岩(左)中のウラン濃集状態(右)。白い所がウランの濃集箇所を示す

でも触れました。地下では、地下水が浸透してくることを避けることはほとんどできませんが、浸透してくる地下水が還元状態のものであれば、放射性元素は溶けにくく、周辺に拡散していくことが抑えられることになります。また近年では、地下環境には一〇〇万年を超える古い年代の地下水が存在することもわかってきました。地下深部では、地下水の動きが遅いことの証

拠とも言えます。さらには、鉱物の集合体である岩石には、放射性元素などを吸着する働きもあります。例えば、粘土鉱物や雲母といった鉱物は、ウランなどを吸着することが確認されています。その事例として、岐阜県東濃地域に分布する月吉ウラン鉱床の研究例があります。このウラン鉱床は、地表から約一五〇メートルの深さの堆積岩中にあります。

今から約一〇〇〇万年前にできたものです(図2)。地下水中に溶けたウランが、地層を移動しながら濃集したものであることがわかっています(写真1)。その後、月吉ウラン鉱床は、地表からの風化などの物質循環から隔離さ

れ、現在まで地下環境中に保存されてきたこととなります。

「地下」というイメージは、洞穴や洞窟など、暗く、不気味なイメージが普通かもしれません。しかし実際は、岩石によって充填され、その隙間を地下水が満たしているという状態です。その物質的な緻密さによって、地表からの様々な影響が妨げられることとなります。欧米では、この地下環境の働きを「actasacoon」と表現しています。「繭のように機能する」という意味です。

つまり、地下環境によって放射性廃棄物が劣化したり、風化したりしないように繭のように包んで、外部からの様々な影響から長期に渡って守る、というイメージを現したものです。第四回では、「地下環境とは何か」について、その概要を解説しました。次回は、この「繭」のバリア(働き)を脅かすかもしれない断層や割れ目について、最近の研究成果も含めて紹介します。