

地下環境学への 誘い

自然に学ぶ知恵と技

多重バリアシステム

— 自然素材による隔離機能 —

第2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

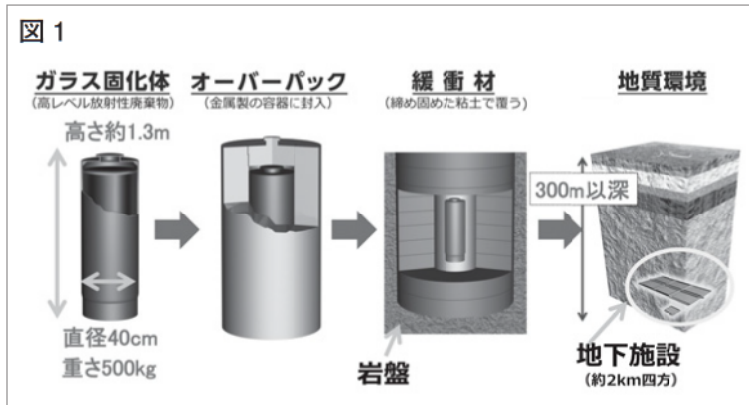
1986年名古屋大学大学院理学研究科博士課程(前期課程)地球科学専攻修了。核燃料サイクル開発機構(現日本原子力研究開発機構)主任研究員を経て、2000年名古屋大学博物館助教授、2010年～2014年同博物館館長。2013年より総合資源エネルギー調査会地層処分技術ワーキンググループ委員を務める。

地層処分は、地表から三〇〇メートル以上の地下環境の岩盤中にガラス固化された高レベル放射性廃棄物(以下、放射性廃棄物)を埋設し、隔離・処分することを言います。この方法は、第一回の記事で「オクロ天然原子炉」という、アフリカのウラン鉱床中で確認された天然の自発核分裂現象に学んだ方法であることを述べました。第二回では、これらの自然に学んだ方法をもとに、放射性廃棄物をどのように地下岩盤中に隔離・処分するのかについて紹介したいと思います。

オーバーパックスの容器に入れ、さらにその周辺を緩衝材という粘土鉱物(ベントナイト)を主成分とするブロックで覆い、それらを地下深い岩盤中に埋設するという方法です(日本の場合、地下三〇〇メートルよりも深い地下岩盤中に埋設することを検討しています・図1)。

オクロの天然原子炉現象では、約四〇〇メートルの地下岩盤中で核分裂した放射性元素が、長期に渡って岩盤中に維持されてきたわけですが、地層処分では、放射性廃棄物を、そのまま直接地下岩盤中に隔離・処分するのではなく、放射性廃棄物の周辺を幾重にも人工的な「バリア」素材で覆い、放射性元素が周辺に、より漏れにくくする

出典：NUMO ウェブサイトより



●多重バリアシステム

ことを考えています。

この考え方は、オクロクのように地下岩盤がもつ隔離機能と併せて、より確実に放射性元素を封じ込めることを目標^めみとするものです。放射性廃棄物の寿命は数万年以上に及びます。人工的なバリア素材がどれくらい長くもつかについては、現在も研究が進められています^が、最も確実に安定だと言えるのは岩盤（岩石）だと考えられます。

地層処分では、これらの組み合わせによって、まずは人工的なバリア材によって、できるだけ放射性元素を閉じ込めるように努め、それでも、もし漏れ出た場合、最終的には地下岩盤が隔離することが基本的な仕組みだと言えます。このような幾重にも放射性元素の動きを抑制するための「バリア」で覆うことから、地下岩盤も含めて「多重バリアシステム」と呼ばれます。

では、なぜガラス固化体の「ガラス」や「鋼鉄製」のオーバーパック、緩衝材の「粘土鉱物（ベントナイト）」が選ばれたのでしょうか。その理由は、

それぞれの素材が「バリア材」として相応^{ふさわ}しい性質を有しているからです。

「バリア」とは 何かの動きを「抑制する」こと

バリア材のそれぞれの役割を述べる前に、放射性廃棄物からはどのようにして放射性元素が漏れ出ると考えられているかの説明をしなければなりません。「バリア」という意味も、それと表裏一体だからです。つまり「バリア」という以上、何かの動きを「抑制する」ということがその意味となります。

何を抑制するのか。それは、地下水によるガラス固化体からの放射性元素の溶出と移動に他なりません。地下水の溶け込んだ放射性元素は、地表に漏れ出るかもしれません。その動きを抑え、できるだけ遅くすることが重要となります。このような地下水による放射性元素の漏出と移動のプロセスを「地下水シナリオ」と呼んでいます。日本は湿潤温暖な気候です。したがって地下水も豊富です。日本の地下で、地下水のない地域はまずありません。

地層処分を行なう地下にあるのは、「岩石（鉱物）」と「地下水」です。この地下に放射性廃棄物を埋設するためには、地下坑道などの空洞を岩盤内に掘削しなければなりません。

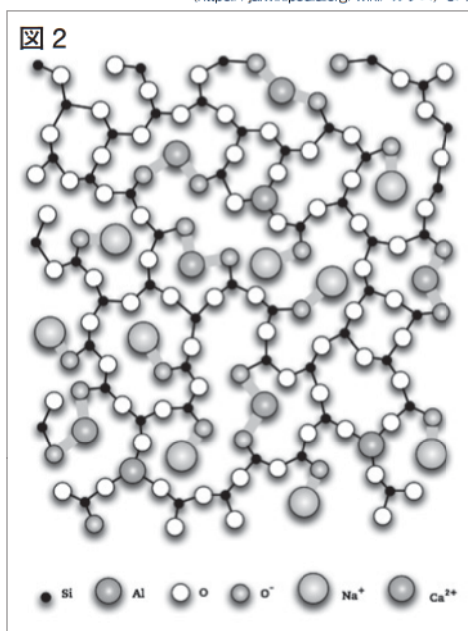
地下岩盤に空洞を掘削すれば、多かれ少なかれ必ず地下水が湧出してきます。しかし、地下の空洞は、処分後には埋め戻されますので、空洞による地下水の動きはなくなります。ですが、それでも放射性廃棄物から放射性元素が漏れ出しにくくするためには、さらに水の動きを抑制するか、あるいは水に溶けにくくし、もし溶出したとしても放射性元素が吸着され、放射性元素を動きにくくすることが重要となります。

「第一のバリア」：ガラス固化体

ガラスは、天然にも存在するありふれた素材です。このガラスが選ばれた理由は、ガラスは元素を原子レベルで閉じ込めやすく、また地下水に溶けにくいことによります。ガラスは^{*}鉱物ではありません。非晶質（アモルファス）と呼ばれる素材です。ガラスを構成す

※鉱物：無機質で、原子や分子が規則的に配列した構造をもつものを指す。氷も鉱物。

出典：ウィキペディア：「ガラス」
(<https://ja.wikipedia.org/wiki/ガラス>) より



●ガラスの分子構造概念図

分子の配列はランダムです。そのため、その分子構造の中にあるいろいろな元素を取り込むことができます(図2)。色ガラスができるのもその性質を応用したとも言えます。この色ガラスの色が溶け出しにくいことから、ガラスが水に溶けにくいことは理解できますが、酸性の溶液にも溶けにくく安定です。化学実験などで用いる塩酸や硫酸が、ガラス瓶に入れられていることも、ガラスが酸に強いことによりです。

したがって、まず放射性廃棄物がガラス固化体であることによって、

地下水とガラスが接しても溶けにくく、ガラスが溶けなければ、その中の放射性元素の溶出も抑えられることとなります。

「第2のバリア…オーバーパック」

オーバーパックは鋼鉄製です。鉄を選択している理由は二つあります。

一つは、放射性廃棄物からの強い放射線の遮蔽です。そしてもう一つは、自らが酸化することで周辺を還元状態に保つ「還元剤」としての役割です。この二つ目の働きがバリア機能として重要になります。大気(酸素)とほとんど接することのない地下岩盤中の地下水は、基本的に還元状態を維持しています。この酸素の少ない状態は、放射性元素の溶解度を抑えるのに役立ちます。つまり、還元状態の地下水がガラス固化体と接しても、ガラス

の溶解のしにくさに加え、放射性元素の溶解度が抑えられることで、溶出量が抑えられることとなります。

もし、酸素の溶け込んだ地下水が地下処分場に浸透してきたとしても、鉄製のオーバーパックが錆びることで放射性廃棄物周辺の地下水中の酸素を消費し、還元状態にすることができます。

錆びるという現象はマイナスのイオンを持つかもしれませんが、オーバーパックは、錆びることで放射性元素の溶出を抑えるための環境づくりを行っていることとなります。

「第3のバリア…緩衝材…粘土鉱物(ベントナイト)」

緩衝材には、ベントナイトと呼ばれる粘土鉱物が含まれます。この粘土鉱物を含む緩衝材の役割は二つあります。ベントナイトには、水を吸収すると膨潤する性質があります。この性質を利用し、周辺岩盤の割れ目などの隙間を充填させ地下水の浸入を抑制することが一つ目の役割です。また粘土鉱物は、一つが数ミクロン以下という非

出典：Miller et al., 2000. Waste Management Series 2. PERGAMON



●イタリア・ドナロバの埋没林

常に細かいサイズの鉱物の集合体です。そのような微粒子の集合体中での水や元素の動きは拡散による動きが主体となり、その水や水に溶け込んでいる元素の動きを抑制することになります。その事例の一つに、イタリアのドナロバという地域で見えられた約二〇〇万年前の粘土層中の埋没林があります。これは、粘土層によって木の腐食や変質が抑制されたもので、現在でもチェーンソーで加工でき、また木材のように燃やすことができます(写真)。

その理由は、水の移動が粘土層によって抑制され、当時のままの成分が維持されたことによります。もう一つの役割は、粘土鉱物は元素などを吸着する性質があります。その性質は、粘土鉱物の結晶構造に由来するもので、放射性元素も吸着されることが確認されています。そのため、もし長い時間をかけて緩衝材中を浸透した地下水がガラス固化体まで到達し、放射性元素を溶解させて漏れ出た場合でも、粘土鉱物中を放射性元素が浸透・通過する際に、粘土鉱物表面に吸着され、動きが抑制されることとなります。

【第4のバリア・岩盤(岩石と鉱物)】
ここまでのバリアは、主に人工的に加工された素材によるものであることから「人工バリア」と呼ばれています。ですが、基本的にはガラ

スも鉄も粘土鉱物も、もともと自然界に存在するものであり、人工的にゼロから合成されたものではありません。また、その「人工バリア」を取り囲む岩盤(岩石)も鉱物の集合体です。それらの鉱物にも、オーバパックや緩衝材と同様に、還元剤として働くものや吸着効果をもつものが普遍的に含まれます。それらが、最低でも地表までの少なくとも三〇〇メートルもの厚さの「天然バリア」として放射性廃棄物を覆い、もし放射性元素がガラス固化体から溶出しても、その動きを阻むこととなります。

今回は、地層処分の放射性元素の「多重バリア」という隔離機能について、なぜそれらの素材が選ばれたのかも含めて紹介しました。このバリアは長く維持されるほど、隔離性が高まります。その期間をどのように見積もっているのでしょうか。実は、それを推し量るのに考古学の知見を活用しています。第三回では、「考古学と地層処分の意外な関係」について紹介します。