

地下環境学への 誘い

自然に学ぶ知恵と技

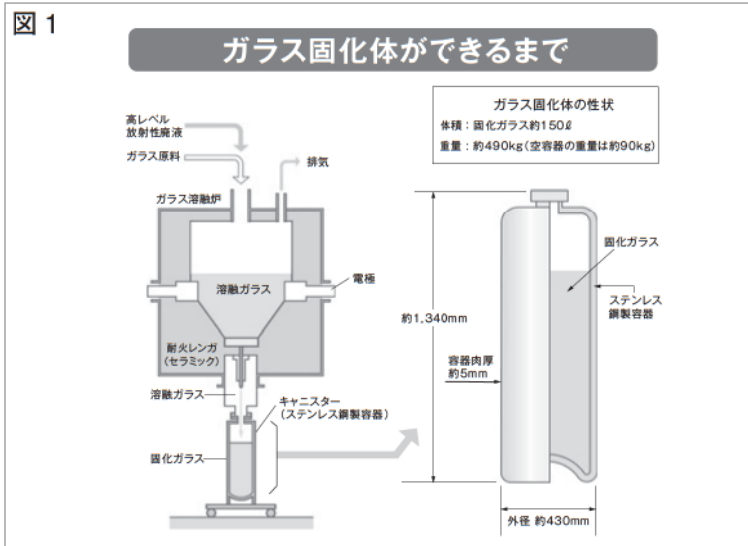
原子力発電によって使用した核燃料（使用済核燃料）を再処理して、ウランやプルトニウムを取り出した残りの放射性元素を、ホウケイ酸ガラスに混ぜて冷却し、固化したもの（ガラス固化体）が「高レベル放射性廃棄物」と呼ばれるものです（以下、この連載では、この「高レベル放射性廃棄物」のことを「放射性廃棄物」と表現しています）。放射性廃棄物は、キャニスターと呼ばれる高さ一・三メートル、直径が四〇センチほどの円筒状のステンレス製の容器に入れます（図1）。

日本では、これまでの約半世紀に及ぶ原子力発電によって、約一万八〇〇〇トンもの使用済核燃料が発生しています。この量は、キャニスター換算で約

二万五〇〇〇本分に相当するものです。この放射性廃棄物を、地下数百メートルよりも深い地下の地質環境に隔離し、処分する方法を「地層処分」と呼んでいます。日本の場合、地下三〇〇メートルよりも深い岩盤中に処分することとなっています。

では、なぜ地下に処分するという方法が選択されたのでしょうか。他に処分する方法はないのでしょうか。原子力発電は、日本だけでなく欧米を中心とする世界各国でも、一九五〇年代以降進められてきました。放射性廃棄物の処分方法についても、これらの原子力発電に関する技術開発と発電所の増加に伴い、一九六〇年代以降、欧米を中心にいろいろと検討されてきました

出典：原子力・エネルギー図面集



オクロ天然原子炉 — 地層処分の天然類似現象(ナチュララアナログ) —

第1回

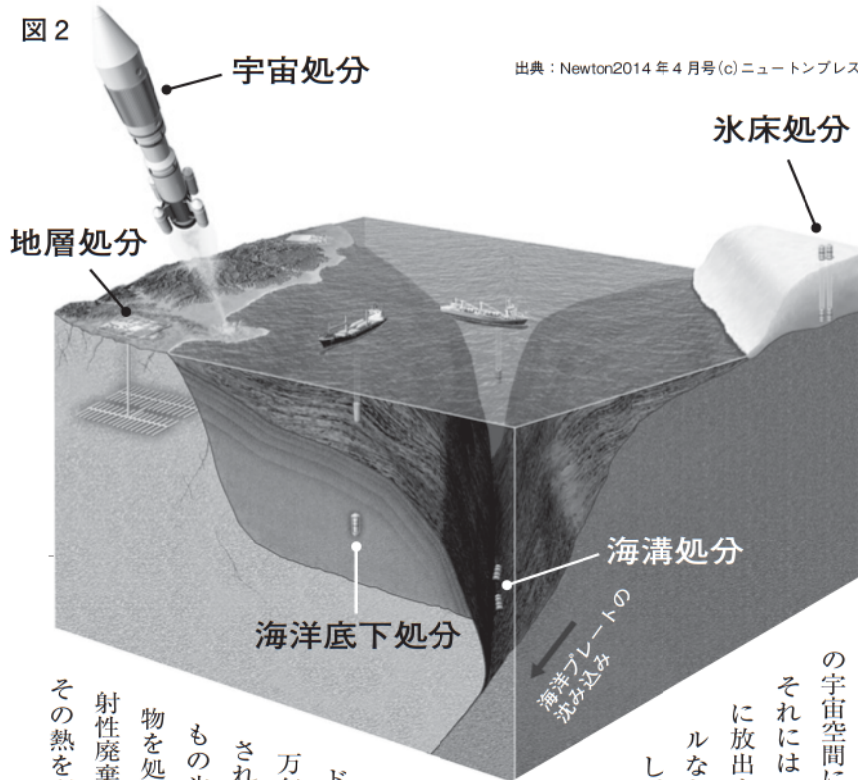
◎名古屋大学博物館教授(環境地質学)
同大学院環境学研究科教授兼任

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。

図 2

出典：Newton2014年4月号(c)ニュートンプレス



た。その主なものを簡単に紹介しよう(図2)。

〈海洋底下処分〉

大陸棚などの沿岸部ではなく、外洋の深さ数千メートルもの海底下に堆積した海洋底軟泥と呼ばれる堆積層の中

に放射性廃棄物を処分する方法です。その方法としては、掘削船からのボーリングによる掘削孔やミサイル型の容器に入れて船から自由落下させる方式などが考えられています。

〈宇宙処分〉

文字通り放射性廃棄物を大気圏外の宇宙空間に放出する方法です。

それにはロケットで直接宇宙に放出する方法や、シャトルなどにコンテナで搭載し、大気圏外に到達した後にコンテナごと、宇宙空間に放出する方法などが考えられています。

〈氷床処分〉

南極やグリーンランドなどに分布する、数万年以上の年月で形成された厚さ数千メートルもの氷床下に放射性廃棄物を処分する方法です。放射性廃棄物は熱を有します。その熱を利用して、氷を溶か

しつつ放射性廃棄物が岩盤まで達した後は、周辺の氷による冷却と氷による凍結/自己シーリングで隔離させる方法です。

〈海溝処分〉

海溝の最も深い海の底に放射性廃棄物を沈める方法です。海溝は海洋底プレートの沈み込みの場所でもあり、年間数センチ程度で、地球内部に潜り込んでいきます。その仕組みを利用して、放射性廃棄物を地球内部へと送り込む方法です。

〈核種消滅処理〉

これまで述べた隔離を目的とする処分方法とは異なり、放射性廃棄物中の放射性元素に中性子を照射し、放射線を発しない元素に変換する方法のことを言います。この方法は、現在研究段階にあるもので、まだ確立された技術ではありませんが、放射性廃棄物の減容化に役立つと考えられています。

これらの方法にはそれぞれ課題があります。宇宙処分に関しては、一度に運搬する量に限りがあるだけでなく、ロケット発射に伴う爆破のリスクやコ

ストの問題で実行には困難が伴います。また宇宙処分以外についても、処分する場所が公海であることや、また南極は南極条約などの制約から、これらの処分方法を採用している国はありません。その理由は、これらの処分を行なう場所が基本どこの国にも属していないことや、国際法による決まりによつて立ち入りなどが制限されているからです。また、それだけでなく、これまで約半世紀に及ぶ国際的な議論において、各国で生じた放射性廃棄物は、その国の責任によつて管理・処分を行なうことが国際的な認識として共有されてきたことによります。そのような歴史的な背景のもと、現実的な方法として考えられてきたのが、地下深部の地質環境中に処分する「地層処分」という方法です。

最後に掲げた「核種消滅処理」も、実用化までには数十年はかかると言われています。また実用化されても、放射性廃棄物が全くなくなるわけではなく、現状では「地層処分」の代替案となるものではないと考えられています。

地層処分：二〇億年前の「天然の原子炉」から学んだ手法

この「地層処分」という方法は、先に示したいろいろな方法が選択・実行できないが故に、消去的に残った手法として選択されたかのように思われるかもしれませんが、そうではありません。実はこれは、自然から学んだ方法なのです。

一九七〇年代、アフリカ・ガボン共和国で「オクロ天然原子炉」という地球科学的現象が発見されました。当時、ガボン共和国はフランスの植民地下にあり、オクロのウラン鉱山からフランスの原子力発電用のウラン鉱石を採取し、燃料に加工していました。

ウラン鉱床自体は、地下四〇〇メートルくらいの深い場所に位置し、そこからウラン鉱石を採掘していたのですが、当時、国際原子力機関（IAEA）などをはじめとする研究機関が詳細に調査・研究した結果、このオクロ鉱床のウランが濃集している部分で、約二〇億年前に自発的に核分裂反応（臨界反

応）の起きていたことが分かったので（写真1）。

このような、自然の状態・環境での核分裂反応は、現在では決して生じることはありません。では、なぜ二〇億年前だと生じたのでしょうか。

天然のウラン鉱石中のウランには、ウラン235とウラン238が同位体元素として含まれています。その割合は、現在のウラン鉱石であれば、ウラン235が約〇・七%、ウラン

238が約九九・三%です。核分裂反応が生じるためには、ウラン235が三（五）%以上含まれていることが必要です。ウラン235が多く含まれることに

提供：スイス放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）



●オクロ天然原子炉の炉心部

よって、そこに中性子が衝突すると、分裂したウラン235からさらに中性子が生じ、それが連鎖反動的に核分裂を引き起こすのです。

したがって、現在のウラン鉱石から原子力発電の核燃料を加工・生成するためには、ウラン235を三〇五〇に人工的に濃縮しなければなりません。

一方、ウラン238は核分裂で生じる中性子を吸収し、原子番号が239のプルトニウムへと変化します。つまり、プルトニウムは、現在では原子炉内での臨界反応でしか生成されません。

ところが、二〇億年前のウラン鉱石中には、自然の状態でのウラン235が約五%含まれた状態だったので、その理由は、ウラン235の半減期にあります。その半減期は約七億年です。したがって今から七億年前には、ウラン235の含有量は、現在の二倍の一・四%ほどとなります。さらに七億年遡ると(一四億年前)約二・八%に、さらにその七億年前(二二億年前)では五%ほどとなります。

つまり、このようなウランの濃集部分に、中性子が衝突すれば自然の状態下でも臨界に達するかもしれないと、実は日本の地球化学者^{※注1}によって一九五〇年代に予測されていました。そして、その予測の通り、約二〇年後の一九七〇年代になって初めて発見されたのです。

この事実を知った国際原子力機関(IAEA)をはじめとする各国の研究機関は、臨界に達したウラン濃集部分を詳細に調査し、原子炉反応によって生じた核分裂生成核種が岩石の内部に保持されてきたことを明らかにしてきました。そしてこの現象を、放射性廃棄物を地下岩盤中に処分する「地層処分」の類似現象だとして「ナチュラルアナログ(Natural Analogue)」と呼んだのです。

「オクログ天然原子炉」の示すところは、自発的な核分裂現象の地球科学的な現象の発見というだけでなく、地下岩盤(環境)は、天然のウランや核分裂反応で生じた放射性物質を長期に渡って保持する働きを有している、とい

うことです。こうした自然現象から、地層処分というアイデアが有力視されるようになりました。

天然原子炉の発見以降、なぜウラン鉱床が形成され、長期に岩盤中に保存されるのか。様々な地球科学的研究が世界中で実施され、日本でも、岐阜県東濃地域に分布する月吉ウラン鉱床^{※注2}などで研究が行なわれてきました。その結果、岩石中に普通に含まれる黒雲母や粘土鉱物などが、ウランの吸着材として働き、数百万年以上に渡って保持されてきたことが分かったのです。

日本では、天然原子炉現象は確認されていませんが、ウランや核分裂核種が岩盤中に濃集する仕組みは同じだと考えられています。つまり、自然の地下環境(岩石や鉱物)には、普遍的に元素を吸着したり濃集したりする働きと仕組みが備わっていると考えるでしょう。

「地層処分」は、まさにこの仕組みを活用し、地表よりも、より安定な地下環境に委ね、長期に隔離する方法だと言えます。



注1) 黒田和夫(くろだ かずお: 1917-2004年)アーカンソー大学名誉教授。1956年のJournal of Chemical Physicsで天然原子炉が形成される可能性を予想した論文を発表

注2) 岐阜県東濃地域の地表から150メートルほどの深さに分布。今から約2000万年前に堆積した地層(瑞浪層群)中に、地下水によって運ばれたウランが濃集して形成された鉱床