

# オクロ天然原子炉より学んだ地層による 核分裂生成物の閉じ込め機能

Confinement function of fission products by geological formations learned from Oklo natural reactor

坂本 浩幸

SAKAMOTO Hiroyuki

アフリカのガボン共和国にあるオクロのウラン鉱床には、約20億年前にウランの核分裂連鎖反応による天然の原子炉が存在していた。天然原子炉では約6 tのウランが核分裂して同量の核分裂生成物と約3 tのプルトニウムが発生しているが、そのほとんどは約20億年経過した現在も同じ場所にとどまっていることが確認されている。このことは、高レベル放射性廃棄物の地層処分における多重バリアシステムで長期にわたり放射性物質の閉じ込め機能を示すナチュラルアナログとして、地層処分の安全性を構築するための情報として活用できる。

A natural nuclear reactor existed in the Oklo uranium deposit two billion years ago. Most of the fission products generated in natural nuclear reactors remained in the same location even after about 2 billion years. This can be used as a natural analogue of the ability of multiple barrier systems in geological disposal of high-level radioactive waste to confine radioactive materials for long periods of time.

キーワード：天然原子炉，核分裂生成物，高レベル放射性廃棄物，地層処分，ナチュラルアナログ

## 1 はじめに

フランス原子力庁は、1972年に中央アフリカ・ガボン共和国東部の6つのウラン (U) 鉱床の一つであるオクロ鉱床で、今から約20億年前に自発的にウランが核分裂連鎖反応を起こした天然原子炉が発見されたと公表した。オクロのウラン鉱床では、過去に核分裂連鎖反応を起こした部分（ウラン鉱床の一部）を原子炉ゾーンと呼び14カ所が確認<sup>1)2)</sup>されている。

鉱床内で核分裂によって消費された<sup>235</sup>Uの総量は、初めに発見された6カ所の原子炉ゾーン1から6で約6 t<sup>1)2)</sup>に達している。6 tの<sup>235</sup>Uの核分裂に伴い発生するエネルギーは、現在の100万kW級の原子炉5基を1年間運転したときに発生する熱エネルギーにほぼ等しい<sup>1)2)</sup>。原子炉ゾーンでは、約30分間動作した後数時間停止するサイクルを数万年から数十万年の間断続的に稼働していたと推測<sup>1)</sup>されている。

原子炉ゾーンでは、<sup>235</sup>Uの核分裂に伴って質量が保存されたほぼ同質量の核分裂生成物が発生している。約20億年経過した現在では、核分裂

生成物は全て放射壊変して安定同位体になっているが、従来から存在していた元素の安定同位体組成に顕著な影響を与えている。安定同位体組成の変動は、原子炉ゾーンやその周辺を詳細に質量分析によって調べることで、核分裂生成物の地下環境における長期的な挙動の理解に資する情報を提供している。

## 2 オクロ天然原子炉

### 2.1 原子炉とは

原子炉は、制御された核分裂連鎖反応を維持することができるように核燃料等を配置した装置で、核分裂のエネルギーを安全に取り出すことができるように設計されている。<sup>235</sup>Uやプルトニウム (Pu) -239 (<sup>239</sup>Pu) などの核分裂性物質が中性子を吸収すると2個またはそれ以上の核種に分裂してエネルギーを放出するとともに、2個または3個のエネルギーの高い中性子（高速中性子）を放出する。放出された中性子が次の核分裂性物質に吸収されると、その原子が核分裂して新たな高速中性子を放出する。この過程が連続して繰り返されることを核分裂連鎖反応といい、この

連鎖反応が持続している状態を臨界という。なお、核種とは原子核の組成によって規定される特定の原子の種類である。すなわち、安定核種と放射性核種が存在する。

日本の商業用発電炉は、核分裂に伴い放出される高速中性子を $^{235}\text{U}$ との反応率が高くエネルギーの低い中性子（熱中性子）にするため、減速材として普通の水（軽水）を使用し、発生した熱エネルギーをその軽水を蒸気にして取り出すことから軽水炉と呼ばれている。蒸気を発生させる方法として、沸騰水型炉（BWR）と加圧水型炉（PWR）の2種類あるが、いずれも核燃料や減速材として軽水を使用する点は同じである。軽水炉が臨界を維持するためには、放出された中性子の一つが次の核分裂性物質に吸収される状態を継続する必要があり、一定以上の $^{235}\text{U}$ の濃度と量や中性子を吸収する他の物質が比較的少ないことなどの条件が満たされることが必要になる。

$^{235}\text{U}$ の核分裂連鎖反応を図1<sup>3)</sup>に示す。

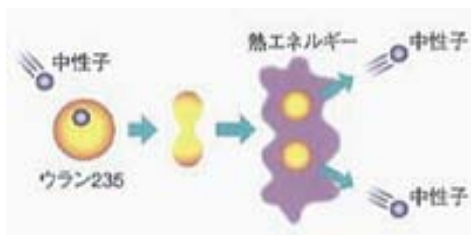


図1 ウラン235の核分裂連鎖反応<sup>3)</sup>

## 2.2 オクロ天然原子炉

ウラン鉱床の内部で核分裂連鎖反応を生じる天然原子炉が成立する条件については、黒田和夫博士がオクロ天然原子炉が発見される16年前の1956年に発表<sup>4)</sup>している。黒田博士は、理論的な考察の結果として、20億年前のウラン鉱床中に天然の原子炉が存在した可能性があることを示している。

日本で稼働している軽水炉は、核分裂するUの同位体である $^{235}\text{U}$ を3%から5%に濃縮した核燃料を使用している。現在の天然ウランの同位体の割合は、原子燃料となる $^{235}\text{U}$ の濃度が0.72%で、核分裂しにくい $^{238}\text{U}$ の濃度は99.27%であるため、現代の天然ウランは軽水炉で臨界になる条件を満たしていない。一方、

$^{235}\text{U}$ の半減期は7億年で、 $^{238}\text{U}$ の半減期は24億年であることから、20億年前には $^{235}\text{U}$ は約3.8%存在していたと計算でき、条件が揃えば臨界になる可能性があった。堆積性のウラン鉱床であるオクロ鉱床の周辺には多量の天然水が存在しており、その水が高速中性子の減速材として機能し、希土類元素等の中性子を吸収する元素が少ないことなどの条件が重なったため天然原子炉として臨界になった<sup>1)-4)</sup>と考えられている。

現在の原子力発電所では、 $^{235}\text{U}$ の他に $^{238}\text{U}$ が中性子を吸収して核変換した $^{239}\text{Pu}$ が高速中性子を吸収して核分裂している。 $^{239}\text{Pu}$ の核分裂で発生する熱エネルギーは全体の30%程度を占めているが、オクロ天然原子炉では $^{239}\text{Pu}$ の核分裂による熱エネルギーの割合は、3%程度と評価<sup>3)</sup>されている。天然原子炉内で生成した $^{239}\text{Pu}$ の大半は放射壊変して $^{235}\text{U}$ になったと評価<sup>1)</sup>されている。

## 3 放射性核種の挙動

### 3.1 天然原子炉の中に生成した放射性核種の挙動

天然原子炉で熱中性子を吸収して核分裂した $^{235}\text{U}$ の核分裂生成物は、原子力発電所の原子炉で発生する核種と同様の核種組成である。また、 $^{238}\text{U}$ が中性子を吸収して生成する $^{239}\text{Pu}$ が約3t生成したと<sup>1)</sup>見積もられている。

天然原子炉が臨界となっていた期間（約60万年<sup>1)</sup>）とその後の約20億年の間に天然原子炉で核分裂によって生成した放射性核種は、様々な地球化学的な影響を受けて現在に至っていると考えられる。この天然原子炉で生成された核分裂生成物や原子番号がUを超える元素（trans uranium: TRU元素）の現在の状態を確認することは、使用済核燃料の再処理に伴って発生する高レベル放射性廃棄物（HLW）の放射性核種の挙動を理解する上で貴重な知見となっている。

### 3.2 ウランとプルトニウムの挙動

地表面に近く、2番目に発見された原子炉ゾーンNo.2の $^{235}\text{U}$ の濃度0.444%の試料の分析結果から、Uは原子炉が臨界になっていた時期から

現在に至るまでほとんど移動していないと結論<sup>1)2)</sup>づけている。<sup>235</sup>Uと<sup>238</sup>Uが分析試料内に存在している位置は、完全に一致しているが、<sup>235</sup>Uの約1/2が天然原子炉内で<sup>238</sup>Uが中性子を吸収して<sup>239</sup>Puになった後に<sup>239</sup>Puが $\alpha$ 壊変して<sup>235</sup>Uになっていることから、<sup>239</sup>Puも生成した時点から移動していない証拠<sup>1)-3)</sup>と考えられている。もし、この<sup>239</sup>Puが生成後に移動したと仮定すると、移動した先で $\alpha$ 壊変して<sup>235</sup>Uになるため、<sup>235</sup>Uと<sup>238</sup>Uが異なる分布になるが、そのような分析結果は報告<sup>1)</sup>されていない。また、TRU元素であるPuが移動していないことから、よく似た化学的性質を持っている他のTRU元素も同様に移動していないことを示唆<sup>2)</sup>している。

### 3.3 核分裂生成物の挙動

原子炉ゾーンNo.2の中で<sup>235</sup>Uの核分裂が顕著な試料(<sup>235</sup>Uの濃度0.4078%)の質量数90~160の同位体分析の結果と<sup>235</sup>Uの熱中性子による核分裂の質量収率曲線と合わせて図2<sup>1)</sup>に示す。質量収率曲線は、<sup>235</sup>Uが熱中性子を吸収して核分裂したときに生成する核種の存在割合を示しており、天然原子炉においても<sup>235</sup>Uの核分裂で発生した初期の核種組成は同じ組成であったと考えられる。ここで、白丸は熱中性子による<sup>235</sup>Uの核分裂における質量収率曲線で、黒丸が試料の同位体分析の結果である。試料に含まれるいくつかの元素が核分裂生成物であれば、核分裂の初期には白と黒の丸は相対的に一致していたと考えられる。いくつかの例外はあるが、全体としてかなりの量の核分裂生成物が含まれていると考

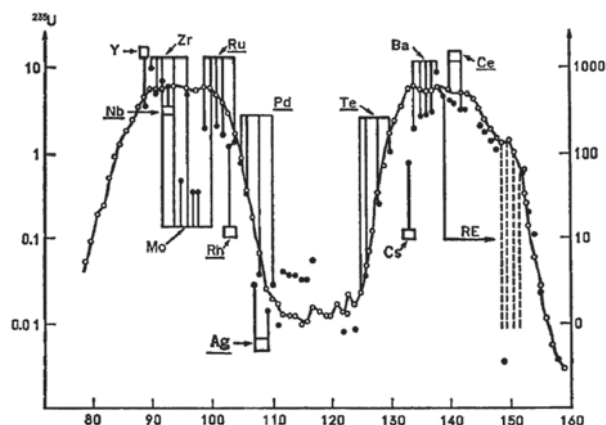


図2 同位体分析の結果<sup>1)</sup>

えられ、Nb, Ru, Rh, Pd, Ag, Te, La, Ce, Pr, Nd及びSmなどは、ほぼ質量収率曲線に重なっている<sup>1)</sup>ことから、これらの元素の相当部分は核分裂以後ここにとどまっていたと考えられている。

また、重金属のTh, Biなども散逸しなかった<sup>1)</sup>とされている。一方、Kr, Xeなどの希ガス元素や地下環境でも溶解度の高いCsなどのアルカリ金属やSrなどのアルカリ土類金属等の一部の元素は、原子炉ゾーンから失われている<sup>1)</sup>。

## 4 HLWの地層処分

日本では、貴重なウラン資源を有効に活用するため、原子力発電で使用した使用済燃料から再利用できるUとPuを取り出す再処理を実施する。再処理の過程では、使用済燃料からUとPuを取り出した残りの高い放射能をもった廃液をガラスとともに熔融してステンレス製の容器に固化した廃棄物(ガラス固化体)であるHLWとTRU元素の核種を含む廃棄物(TRU等廃棄物)が発生する。HLWやTRU等廃棄物は、安全確保の基本的な概念である「隔離」と「閉じ込め」を達成するため、長期にわたり安定な300 mより深い地層に処分(地層処分)する方針である。

高レベル廃棄物処分場の人工バリアの構成と安全機能を図3<sup>5)</sup>に示す。

ガラスは、主成分であるケイ素やホウ素などの原子が網目のような化学構造をしていることから、大きさや性質の違さまざまな元素を均質かつ安定に取り込むことができる。ガラスは水に溶けにくく化学的に安定であり、取り込んだ元素を選択的に溶出することがないため、水に溶けやすい元素も長期間閉じ込めることができる。ガラス固化体は、少なくとも1000年の間地下水との接触を防ぐ金属製の容器(オーバーパック)に封入し、その周囲に地下水の流入や放射性核種の収着により移行を抑制する緩衝材を配置する。これらの人工的に構築されたバリア(人工バリア)と長期にわたって環境が安定した地層という天然のバリアを組み合わせたバリア(多重バリア)によって放射性核種の「隔離」と「閉じ込め」を達成する。



図3 高レベル廃棄物処分場の人工バリアの構成と安全機能<sup>5)</sup>

TRU等廃棄物についても同様に人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアによって放射性核種の「隔離」と「閉じ込め」を達成する。

## 5 まとめ

中央アフリカ・ガボン共和国のウラン鉱床の一つであるオクロ鉱床で発見された天然原子炉は、原子炉としての活動を終えたのち、約20億年にわたって自然の状態に放置されていた。その保存状態は良好で、ウランやプルトニウムをはじめとして多くの核分裂生成物がほぼ原子炉が活動していた時と同じ状態で保持されていたことが判明している。

オクロ鉱床で発見された天然原子炉は、ウラン、プルトニウムや核分裂反応によって発生した核分裂生成物が岩石の内部に長期間保持されていたことを明らかにした。このような放射性廃棄物の地層処分で見ると考えられる類似の現象は、ナチュラルアナログ<sup>6)</sup>と呼ばれている。

オクロ天然原子炉の発見以降、なぜウラン鉱床が形成され、長期にわたって岩盤中に保存されるのか様々な研究が実施された。地下環境は天然のウランや核分裂生成物を長期にわたって保持する働きを有していることから、地層処分というアイデアが有力視<sup>6)</sup>されることになった。

HLWの地層処分では、放射性廃棄物を地下深部に埋設することで人間の生活環境から物理的に

「隔離」する。また、地下深部の地質環境が本来的に有する廃棄物から地下水中への放射性核種の溶出とその移行を抑制する機能に工学的な対策を組み合わせることで、放射性廃棄物を長期にわたって処分場周辺に「閉じ込め」ることができる多重バリアシステムを構築する。

HLWのガラス固化体に閉じ込められた放射性元素は、取り込んだ元素を選択的に溶出することがないため天然原子炉では散逸していたCsやSrなどの地下水に溶解しやすい元素も長期間閉じ込めることが可能となる。

放射性核種の移行は、その地質環境、地下水の化学成分や流速など様々な条件の影響を受けるため、HLWの地層処分の条件が天然原子炉とは異なる可能性もあるが、オクロ天然原子炉で観察された現象は、約20億年という極めて長い期間を経て地層に置かれた放射性核種がどのようにふるまうかを示唆する貴重な情報を与えている。

## <引用文献>

- 1) 藤井勲：オクロ天然原子炉とその現状，日本原子力学会誌，Vol.27，No.4，pp.304-324，日本原子力学会，1985
- 2) 藤井勲：20億年前の天然原子炉（オクロ鉱床）を訪ねて，地質ニュース，439号，pp.30-39，産業技術総合研究所，1991年3月
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター：自然が生み出した原子炉，pp.23-26，2005年3月
- 4) 黒田和夫：天然原子炉の可能性に関する解析，日本原子力学会誌，Vol.19，No.4，pp.225-232，1977年
- 5) 原子力発電環境整備機構，包括的技術報告：我が国における安全な地層処分の実現，pp.4-26-4-46，2021年2月
- 6) 吉田英一：オクロ天然原子炉，原子力文化，1月号，pp.18-21，2018年

坂本 浩幸 (さかもと ひろゆき)  
技術士（原子力・放射線部門）

(株) 太平洋コンサルタント  
e-mail：Hiroyuki\_Sakamoto@taiheiyo-c.co.jp

