

自然が生み出した原子炉

— その誕生から消滅まで&地層処分へのヒント



編集・発行

(財)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

——その誕生から消滅まで&地層処分へのヒント

編集・発行

(財)原子力環境整備促進・資金管理センター

はじめに

みなさんは長い地球の歴史の中で、現在発電に使われているのと同じような原子炉が、自然界に存在していたことを信じることができますか？ この本——『自然が生み出した原子炉』は、そのような自然界の原子炉、すなわちアフリカのガボン共和国のオクロで発見された「天然原子炉」に関する研究内容を、分かりやすく解説したものです。

天然の原子炉の発見によって、原子炉は人間の創造物であるという「常識」が覆されてしまいました。そのため、一九七二年フランス政府が発表した時は、世界中に大きな驚きを与えたのです。

本書はオクロ天然原子炉の発見のプロセスとあらましを紹介するとともに、オクロ天然原子炉現象についての研究成果と、この天然原子炉で発生したさまざまな放射性元素の地層中でのふるまいが、「高レベル放射性廃棄物処分」の研究に応用されている現状について紹介しています。

本書を通じて、世界中の科学者が半世紀をかけて経験した、予言から発見・調査・研究にいたる「自然の実験室」における壮大な実験の軌跡をたどってみることにしましょう。

本書の概要

一九七二年、フランス原子力庁は高品位のウラン鉱山として知られるアフリカ・ガボン共和国のオクロにかつて天然の原子炉があったと発表し、世界を驚かせました。そのきっかけは、ウラン²³⁵の分析で天然ウランの標準値より低い同位体存在比（ウラン中のウラン²³⁵の濃度）を検出したことでした。原子力庁が現地から鉱石を取り寄せてみるとさらに低い同位体存在比を示すものも見つかり、自然界で起きた核分裂連鎖反応の結果であると結論づけられたのです。

人工の原子炉は、ウランの核分裂を利用して発電を行います。ウラン²³⁵に中性子が当たると原子核が二つに分裂し、中性子と熱エネルギーを放出します。飛び出した中性子は、次々に別のウラン²³⁵に当たって核分裂を起こし、膨大な熱エネルギーを生み出します。原子力発電所ではこのような核分裂連鎖反応が人工的に制御されていますが、それを可能にしたのは人間の英知です。ところが、それと同様のものが約二〇億年前に自然界に存在したというのです。

原子炉が自然に成立するためには、ウラン濃度の高いウラン鉱床が前提となります。二〇数億年前、植物が光合成を始め、大気中の酸素が増加し始めると、地表付近の二酸化ウランは大気と接触して酸化され、水溶性となって雨水で地下深くにしみ込み、有機物を含む層で還元されて再び不溶性となり、沈殿しました。オクロでは、このような地球化学的プロセスとしての酸化と還元を受けながら、ウラン濃度の高い鉱床が形成されていきました。

ウラン濃度が高いことに加え、ウラン235の同位体存在比が高いことも天然原子炉成立の条件ですが、ウラン235の半減期は約七億年であるため、今から約二〇億年前の同位体存在比は約四%と、原子力発電所で使う人工的な濃縮ウラン並みの高さでした。また、ウラン鉱床に中性子を吸収しやすい元素が存在すると、核分裂反応は収まってしまいますが、オクロ天然原子炉の炉心付近には、このような元素はほとんど存在しませんでした。さらに、核分裂連鎖反応を引き起こす熱中性子を作り出すための水もありました。原子炉では、核分裂連鎖反応を持続させるために、核分裂で出てきた高速の中性子を減速させて熱中性子に変えるために水が使われます。この水が中性子を減速して、核分裂反応を継続させるのです。

実は、オクロ天然原子炉発見に先立つ一九五六年に、黒田和夫という日本人化学者が、こうした条件を満たす原子炉が自然に存在するという説を発表していたのです。しかしこの説は先進的すぎたため、オクロが発見されるまで学界に受け入れられませんでした。

オクロ天然原子炉は約六〇万年を経て、核分裂連鎖反応を持続するための水を失い、その活動を終了しました。ところが、活動終了後の天然原子炉の研究が、「高レベル放射性廃棄物の地層処分」という新しいテーマを考える上で、近年注目を集めているのです。

原子力発電所で発生した使用済燃料から再利用可能なウランやプルトニウムを回収した後に残る廃液は、多くの放射性物質を含んでいます。日本ではこの高レベル放射性廃棄物を地下の深い地層の中に処分する方針ですが（地層処分）、その長期にわたる安全性を確立するのに、地層処分で起

こると考えられる現象と類似する自然現象を研究すること（ナチュラル・アナログ研究）が役に立ちます。約二〇億年に及ぶ地層中の放射性核種のふるまいをたどることによって、オクロ天然原子炉は地層処分の安全性を考える上で私たちに貴重な情報を提供してくれます。例えば、ウラン、プルトニウム、セシウム、バリウムといった放射性核種の地層中での移動に関する研究です。

ウランについては、その同位体存在比を測定することによって、天然原子炉の活動中も活動終了後も、ウランは移動しなかったことが確かめられました。プルトニウムも、原子炉に残されたウランの同位体分析結果から移動していないと考えられています。

ウランやプルトニウムが移動しなかった理由は、ひとつには、地下に酸素が少ないため、ウランが水に溶けにくい二酸化ウランとして存在し、さらに、ウランが鉱物として存在していたためと考えられています。また、燃え残った大部分のウランは鉱物として存在し続け、生成したプルトニウムもウラン鉱物の中にとどまりました。それは、ウランとプルトニウムの原子の大きさがほぼ同じなので、鉱物の結晶中のウランがプルトニウムとなっても、そのまま安定してとどまったからだと考えられています。

地層処分の安全性を検討する上で、セシウムと、セシウムが壊変してできるバリウムの研究も重要です。一九八〇年代初め、天然原子炉から離れた部分でバリウム同位体存在比が通常と異なる試料が見つかり、セシウムとバリウムが移動した痕跡であると認められるようになりました。その後、分析技術の進歩によって、セシウムは原子炉の活動中または停止後ただちに移動したこと、他の元

素に比べてバリウムは極めて低い比率でしか残っていないことも判明しました。

ウランとプルトニウムがウラン鉱物の中に安定して存在し移動しなかったのに対して、セシウムは酸素が少ないところでも水に溶けやすく鉱物中に安定して存在できなかつたのです。その結果、地下水中に溶け出しました。加えて、天然原子炉の活動によって温度差で地下水が大きく移動しており、地下水の流れとともにセシウムは天然原子炉の外に運び出されたと考えられます。

他方で、セシウムやバリウムの一部が、多くの金属を取り込んで放さないアパタイトという鉱物の作用でそこにとどまっていたことも突き止められています。

地層処分では、オクロ天然原子炉活動後のウランやプルトニウムがおかれた環境と同様の、酸素が少なく、放射性核種が地下水に溶けにくい、安定した深い地層に処分されます。また、セシウムのように水に溶けやすく地下水の流れによって移動しやすい放射性核種を長期間抑制する工夫が施されます。まず、高レベル放射性廃棄物はガラスにより固化され(ガラス固化体)、金属製の容器で覆われます。金属製容器は、ガラス固化体と地下水の接触を千年間は遮断する設計が想定されています。ガラス自体も水に溶けにくく、分子を内部に閉じ込める力があるため、セシウムなどが溶け出すのを遅らせることができます。さらに、セシウムが地下水に溶け出したとしてもその移動を封じため、水を非常に通しにくく、物質を取り込んで放さない性質を有する天然の粘土で金属製容器の周囲を覆います。

このように、オクロ天然原子炉の研究は、高レベル放射性廃棄物の安全な処分方法の構築に反映されているのです。

目次

はじめに…………… 3

本書の概要…………… 4

第一章 オクロはどこにあるのか?…………… 10

第二章 宇宙、地球、元素の起源…………… 13

二―一 地球の起源…………… 15

二―二 元素とは…………… 17

第三章 予言された天然原子炉…………… 23

第四章 オクロ天然原子炉の発見…………… 27

四―一 発見の経緯…………… 27

四―二 天然原子炉の概要…………… 30

四一三	天然原子炉の年齢	37
四一四	人工の原子炉との比較	38

第五章 重なり合った偶然

五一一	天然原子炉成立のプロセスと成立条件	42
五一二	天然原子炉は他にもあるか	46

第六章 オクロ天然原子炉の痕跡

六一一	天然原子炉と「地層処分」	49
六一二	核種の生成	52
六一三	ウランとプルトニウムの移動	56
六一四	セシウムとバリウムの移動	66
六一五	セシウムの動きについての二つの研究	70

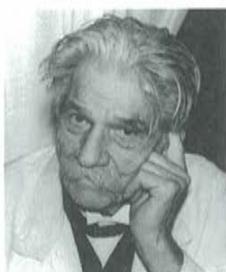
おわりに

謝辞	80
付録	81
出典	82

第一章

オクロはどこにあるのか？

オクロのあるガボン共和国は赤道直下の中部アフリカに位置し、面積は日本の約三分の二、人口は一二九万人（二〇〇一年）、首都は大西洋岸のリーブルヴィルです（図1-1）。一九一〇年フランス領赤道アフリカのガボン州となり、第二次大戦後の一九六〇年に独立しました。このような歴史的背景から、公用語はフランス語で、国民の三分の二はキリスト教を信奉しています。ちなみにガボン¹は、シュバイツァー博士²の終焉の地としても有名です。



シュバイツァー博士
写真提供：玉川大学教育博物館

この国の海岸部は高温多湿の熱帯雨林、内陸の高原部はサバナ気候です。西部の海岸部はマングローブの沼地、北部・東部は平らな高原と山岳地帯から成ります。原油やマンガンなどを産出する鉱物資源輸出国であり、一人当たりの国民所得はアフリカ諸国中の上位にあります。

さて、オクロはアフリカ、ガボン共和国の南東部に開けるなだらかな丘陵地帯で、ここには世界的に有名なウラン鉱山があります。

ウラン鉱の採掘と精製が始まったのは一九五〇年代のことですが、一九七二年



図1-1 ガボン共和国とオクロの位置

*1 シュバイツァー博士
アルベル・シュバイツァー（二八七五～一九六五）。ガボンのランバレネで、近代医学の恩恵の及ばない現地の人に献身的に尽くした医者。一九五二年にノーベル平和賞を受賞。

九月、フランス原子力庁は、アフリカのガボン共和国に天然原子炉の痕跡が存在すると発表しました。原子力発電所で使用するウラン製造（濃縮）時の分析過程で、ガボンのオクロ鉱山から採れるウランに同位体存在比の異常があることが分かり、それがきっかけとなって発見されたものです。発見の経緯は第四章で詳しくご紹介することにしませう。

第二章

宇宙、地球、元素の起源

オクロ天然原子炉がどうして生まれたのかを理解するには、まず、地球上に存在する元素の起源について少し知っておく必要があります。宇宙および地球の起源と元素に関する一般的な知識について説明しましょう。

現在、最も幅広く支持されているガモフのビッグバン宇宙論では、宇宙は約一五〇億年前に起きたビッグバン（図2-1）で生まれたと考えられています。ビッグバン直後の宇宙は光に近い速度で広がりながら、短時間にさまざまな粒子を生成していきます。そして急激に広がっていく空間のあちらこちらで、ガス体が



図2-1 ビッグバンのイメージ図

渦巻きながら直径数万光年もあるガス集合体を作りました。このガス集合体の中では、ガスの濃い部分がそれ自身の引力で収縮し、無数の恒星となりました。こうして宇宙に星々が輝き始めます。

それらの恒星は次第に星雲を形成し、さらに星雲から星雲団が生まれました。これが現在の宇宙です。そして膨張は今も続いていると考えられています。

初期の宇宙に存在した元素は、水素、ヘリウム、リチウムなど最も軽いものだけでした。それより重い鉄までの元素は、星々が輝きだしてから生まれます。恒星の内部における核融合反応^{*2}によって生成されるのです。

さらに、鉄より重い元素は、巨大な恒星が寿命を終えるときに起きる超新星の爆発^{*3}で生成されます。現在、私たち人類が原子力発電の燃料としているウランは、この超新星の爆発で生まれてきたものです。

超新星の爆発後、飛び散ったガスやチリは再び集まり、互いの引力によって収縮し、また星を作り始めます。宇宙ではこのように星ができたり、それが爆発したりを繰り返しています。私たちがその片隅に暮らす太陽系の現在の太陽は、この超新星爆発のチリが集まって誕生したものであるといわれています。それはこの地球に超新星爆発以後にしか存在しないウランなどの元素があることから分かるのです。

二二 地球の起源

現在の太陽は今から約四六億年前に誕生したと考えられています。それをめぐる私たちの地球も、他の星と同じように宇宙空間のチリや星屑が繰り返し衝突して、次第に大きな星へと成長したものです。

隕石類が互いに引き合って集まり、その引力で収縮を始めると熱を発生します。また鉱物中の放射性崩壊^{*4}の影響とも重なって、さらに大きな熱が発生し、隕石の集団は溶けてマグマ・オーシャンとなります。この時、大量の水（水蒸気）を含む高温の火山性ガスが放出され、

*2 核融合反応

二つの軽い原子核が反応して、重い原子核になること。原子核を構成する核子（陽子、中性子）の間には互いを結び付ける力が働いているが、通常は、同じ電荷を持った陽子間の電気的反発力（クーロン力）によって反発し合っている。これを、互いの距離を 10^4 mより近づけることができれば、核力はクーロン力に打ち勝って引力となり、反応が起きる。

*3 超新星爆発

大質量の恒星は、核融合反応と中心部の収縮を繰り返し、中心部が鉄にまで進化すると、核融合と収縮の間の均衡が崩れて爆発する。これを超新星爆発という。

*4 放射性崩壊熱

不安定な原子核が放射線を放出したり、自発的に核分裂を起こすなどして、別種の原子核に変化することを放射性崩壊といい、その際に放射されたエネルギーは、物質に吸収されて熱に変わる。

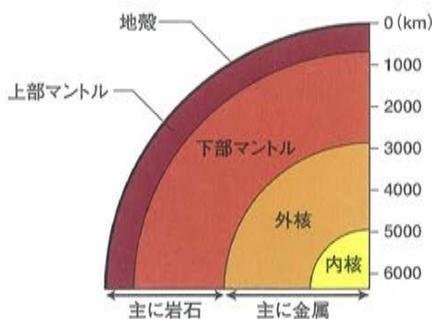


図2-2 地球の内部構造

まだマグマ・オーシャンである地球の表面を覆います。

この過程を通じて、図2-2に示すように、全体の中心で最も重い元素が中心の内核や外核に集まり、その周辺にマントルが浮き上がります。そして地球表面の温度が低下して地殻を形成し、現在の地球のおおよその構造ができあがります。

地球を覆う水蒸気は冷えて雨雲となり、大規模な雨を降らせ、地球全体の温度を下げます。それにともない地殻の上に水が大量にたまり、海を作り、約四〇億年前、その海の中で最初の生命が誕生しました。

やがて水の力による侵食と堆積が始まり、光合成生物の作り出す酸素を含む大気・海・陸地との間で物質の循環が盛んになり、現在のバランスのとれた地球環境が形成されました(図2-3)。この物質循環の中で酸化し、水に溶けたウランが次第に地層中に堆積し、現在のウラン鉱床を形成します。オクロのウラン鉱床は、この気の遠くなるほど長い地球史の中で生まれたものです。

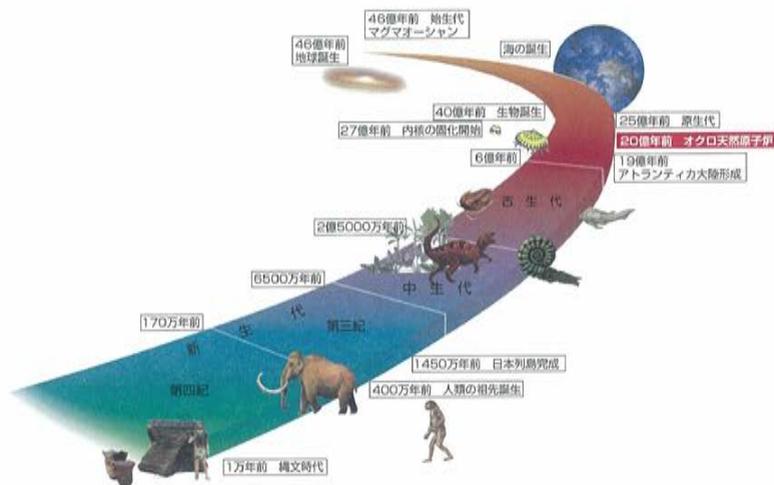


図2-3 地球の歴史(核燃料サイクル開発機構バンフレット『「地層」のことを考える』より)

二二二 元素とは

それでは私たちの世界に存在する物質——元素とはどんなものなのでしょうか。

誰でも知っているように、私たちの身の回りの物質は原子という微小な単位で構成されています。その原子は図2-4に示すように原子核とその周囲をめぐる電子から成り、原子核はさらに陽子と中性子とから成っています。

原子核に含まれている陽子の数（原子番号）は、元素の種類ごとに決まっています。表2-1は、現在までに発見されている原子を表す元素周期表です。

これらの元素の中には、原子核の陽子の数は同じでも、中性子の数が異なる変わり種があります。たとえば、図2-5上に示すように、天然に存在する一番軽い元素である水素原子は、どれも陽子の数は一個しかありませんが、同じ水素でも中性子の数がゼロの場合、一個の場合、

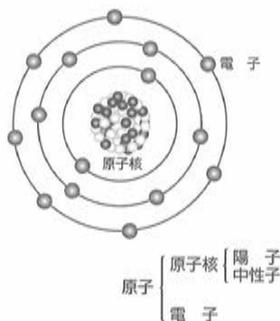


図2-4 原子の構成

典型非金属	典型金属	遷移金属
-------	------	------

	I B	II B	III B	IV B	V B	VI B	MB	0
10	11	12	13	14	15	16	17	18
								2 He (ヘリウム) 4.002602
			5 B (ホウ素) 10.811	6 C (炭素) 12.0107	7 N (窒素) 14.0067	8 O (酸素) 15.9994	9 F (フッ素) 18.9984032	10 Ne (ネオン) 20.1797
			13 Al (アルミニウム) 26.981538	14 Si (ケイ素) 28.0855	15 P (リン) 30.973761	16 S (硫黄) 32.065	17 Cl (塩素) 35.453	18 Ar (アルゴン) 39.948
28 Ni (ニッケル) 58.6934	29 Cu (銅) 63.546	30 Zn (亜鉛) 65.409	31 Ga (ガリウム) 69.723	32 Ge (ゲルマニウム) 72.64	33 As (ヒ素) 74.92160	34 Se (セレン) 78.96	35 Br (臭素) 79.904	36 Kr (クリプトン) 83.798
46 Pd (パラジウム) 106.42	47 Ag (銀) 107.8682	48 Cd (カドミウム) 112.411	49 In (インジウム) 114.818	50 Sn (スズ) 118.710	51 Sb (アンチモン) 121.760	52 Te (テルル) 127.60	53 I (ヨウ素) 126.90447	54 Xe (キセノン) 131.293
78 Pt (白金) 195.078	79 Au (金) 196.96655	80 Hg (水銀) 200.59	81 Tl (タリウム) 204.3833	82 Pb (鉛) 207.2	83 Bi (ビスマス) 208.98038	84 Po (ポロニウム) [210]	85 At (アスタチン) [210]	86 Rn (ラドン) [222]
110 Ds (ダームスタチウム) [269]	111 Uuu (ウンウンウニウム) [272]	112 Uub (ウンウンビウム) [277]		114 Uuq (ウンウンクワジウム) [289]		116 Uuh (ウンウンヘキシウム) [292]		

66 Dy (ジスプロシウム) 162.500	67 Ho (ホルミウム) 164.93032	68 Er (エルビウム) 167.259	69 Tm (ツリウム) 168.93421	70 Yb (イッテルビウム) 173.04	71 Lu (ルテチウム) 174.967
98 Cf (カリホルニウム) [252]	99 Es (アインスタイニウム) [252]	100 Fm (フェルミウム) [257]	101 Md (メンデレビウム) [258]	102 No (ノーベリウム) [259]	103 Lr (ローレンシウム) [262]

【凡例】

1	←	原子番号
H	←	元素記号
(水素)	←	元素名
1.00794	←	原子量

[]内の原子量は、この放射性同位体のうち、最もよく知られているものの数値を示している。

表2-1 元素周期表⁽ⁱ⁾

	I A	II A	III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1 H (水素) 1.00794								
2	3 Li (リチウム) (6.941)	4 Be (ベリリウム) 9.012182							
3	11 Na (ナトリウム) 22.989770	12 Mg (マグネシウム) 24.3050							
4	19 K (カリウム) 39.0983	20 Ca (カルシウム) 40.078	21 Sc (スカンジウム) 44.955910	22 Ti (チタン) 47.867	23 V (バナジウム) 50.9415	24 Cr (クロム) 51.9961	25 Mn (マンガン) 54.938049	26 Fe (鉄) 55.845	27 Co (コバルト) 58.933200
5	37 Rb (ルビジウム) 85.4678	38 Sr (ストロンチウム) 87.62	39 Y (イットリウム) 88.90585	40 Zr (ジルコニウム) 91.224	41 Nb (ニオブ) 92.90638	42 Mo (モリブデン) 95.94	43 Tc (テクネチウム) [99]	44 Ru (ルテニウム) 101.07	45 Rh (ロジウム) 102.90550
6	55 Cs (セシウム) 132.90545	56 Ba (バリウム) 137.327	57~71 *	72 Hf (ハフニウム) 178.49	73 Ta (タンタル) 180.9479	74 W (タングステン) 183.84	75 Re (レニウム) 186.207	76 Os (オスマニウム) 190.23	77 Ir (イリジウム) 192.217
7	87 Fr (フランシウム) [223]	88 Ra (ラジウム) [226]	89~103 **	104 Rf (ラザホージウム) [261]	105 Db (ドブニウム) [262]	106 Sg (シーボーギウム) [263]	107 Bh (ボーリウム) [264]	108 Hs (ハッシウム) [269]	109 Mt (マイトネリウム) [268]
*	57 La (ランタン) 138.9055	58 Ce (セリウム) 140.116	59 Pr (プラセオジウム) 140.90765	60 Nd (ネオジウム) 144.24	61 Pm (プロメチウム) [145]	62 Sm (サマリウム) 150.36	63 Eu (ユウロピウム) 151.964	64 Gd (ガドリニウム) 157.25	65 Tb (テルビウム) 158.92534
**	89 Ac (アクチニウム) [227]	90 Th (トリウム) 232.0381	91 Pa (プロトアクチニウム) 231.03588	92 U (ウラン) 238.02891	93 Np (ネプツニウム) [237]	94 Pu (プルトニウム) [239]	95 Am (アメリシウム) [243]	96 Cm (キュリウム) [247]	97 Bk (バークリウム) [247]

*ランタノイド元素 **アクチノイド元素

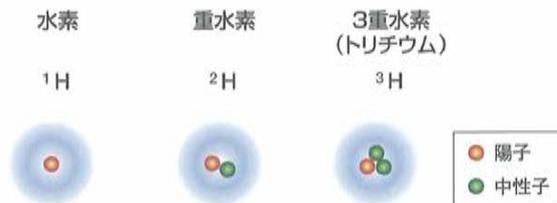
二個の場合と、三つの違いがあるのです。このように原子の種類を原子核の構造で区別した場合に、それぞれの種類のことを核種といいます。同じ水素元素でも、その核に含まれる中性子の数によって三核種あるわけです。

このように陽子の数が同じでありながら、中性子の数が異なる核種を互いに同位体といいます。軽い水素とは反対に、自然界に存在する最も重い元素であるウラン原子には陽子が九十二個もあります。このウランの同位体のうち代表的なものは、図2-5下に示すように、ウラン234（陽子九十二個と中性子百四十二個）、ウラン235（陽子九十二個と中性子百四十三個）、ウラン238（陽子九十二個と中性子百四十六個）の三核種です。

陽子と中性子の組み合わせの中には、安定なものとは不安定なものが存在します。不安定な組み合わせのものは、中に蓄えられた余分なエネルギー（放射線）を外に出して、安定した別の原子に変わろうとします。この変化を繰り返すことによって、最後は安定な元素となります。この変化する現象を放射性崩壊といいます。このような放射線を放出する能力（放射能）を持った物質のことを放射性物質といいます。また、放射性を有する核種を放射性核種といいます。

前に述べたように、鉄より重い金や銀、ウランなどの元素は太陽系が生まれる前に起きた超新星爆発によって生まれてきたと考えられています。太陽系が誕生した約四六億年前には、超新星爆発で放出された宇宙のチリの中には、ウランを代表とする放射性核種が、今よりも多く含まれていました。そしてそれらは、次第に安定した別の核種に変わっていったのです。

水素の同位体



電 子	1	1	1
陽 子	1	1	1
中性子	0	1	2
質量数	1	2	3

ウランの同位体



電 子	92	92	92
陽 子	92	92	92
中性子	142	143	146
質量数	234	235	238

図2-5 水素およびウランの同位体

放射能の量が半分になるまでの時間を半減期といい、放射性核種に固有の値です。半減期の短い核種はすでに安定した核種に変わっており、現在地球上に存在するさまざまな核種となりました。地球が誕生してから現在まで残っている放射性核種は、ウランなどが放射線を放出して別な核種に変わったものと、半減期が特に長いカリウムなど約十五種類ですが、これらは今でも地球上に広く分布しています。

第3章

予言された天然原子炉

原子炉は、ウランの核分裂という現象を利用して発電をしています。核分裂とは、重い一つの原子核がほぼ等しい重量を持つ二つ（まれには三つ以上）の原子核に分裂する現象です。ウラン235に中性子が当たると、原子核が二つに核分裂し、その際に二、三個の中性子と熱エネルギーを放出します。核分裂の時に飛び出した中性子は、次々に別のウラン235に当たり核分裂を起こし（核分裂連鎖反応）、膨大な熱エネルギーを生み出します（図3-1）。原子炉では核分裂連鎖反応は制御され、穏やかに起こります。この核分裂連鎖反応が定常的に継続する状態を臨界といいます。なお、核分裂によってできた核種、またはそのような核種から放射性崩壊によってできた核種を核分裂生成物といいます。

一九七二年にオタロの天然原子炉跡が発見され、人間の手になる原

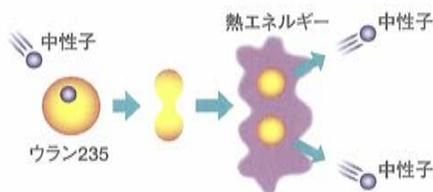


図3-1 ウラン235の核分裂連鎖反応

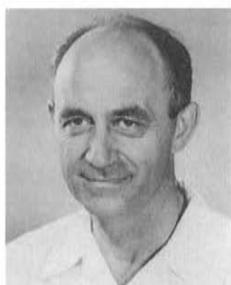
子炉と同じような状態がすでに自然界に存在していたことが分かったとき、世界中の科学者の驚きは大変なものでした。原子炉は理論物理学の仮説からスタートして、実験・検証という長いプロセスを経て人類が実用化したものです。それと同じような「天然原子炉」がすでに自然界にあり、自然に臨界量に達したウランが長い時間をかけてエネルギーをゆっくりと放出し続けていたというのですから、誰もが驚いて当然のことでした。

ところが実は、オクロ天然原子炉発見に約十六年も先立つ一九五六年に、一人の日本人が、天然原子炉の存在を予言していました⁽ⁱⁱ⁾⁽ⁱⁱⁱ⁾。日本人化学者の名前は黒田和夫^{*5}。彼は「約二一億年ばかり前に、比較的不純物の少ない天然ウラン鉱床の中では、ウランの連鎖反応が臨界になったはずで



黒田和夫

写真提供:吉原賢二「頭脳流出—黒田和夫 天然原子炉の予言—」
〔現代化学〕2004年9月号より転載



エンリコ・フェルミ

写真提供:矢沢サイエンスオフィス/
AIP

ある」(iv) という仮説を発表したのでした。

地球環境の中にも原子炉があったはずだという黒田の「天然原子炉説」は、当時あまりにも斬新だったため、オクロの天然原子炉が実際に発見されるまで学界に受け入れられませんでした。特に世界で初めて人工の原子炉を実証したエンリコ・フェルミ^{*6}が所属していたシカゴ大学の物理学教室では強い反発を受けたそうです。

「天然原子炉」が成立するためには、以下の四つの条件が必要とされています(v)。

- (1) ウラン濃度の高い鉱床が形成されなければならないこと。
- (2) ウラン中に含まれるウラン235の濃度(同位体存在比)が高いこと。
- (3) 中性子吸収断面積の大きい元素がウラン鉱床内に存在しないこと。
- (4) ウラン235の核分裂を引き起こす熱中性子を作り出すための水が存在すること。

この中の(4)の条件に関連して、フェルミの理論では「鉱床中の水の量は地質年代を通して一定である」と仮定していました。黒田は、このような仮定は「ウラン鉱床が地球上で生成されるプ

*5 黒田和夫

一九一七〜二〇〇一。東京帝国大学理学部卒業。戦中戦後の困難な時代に温泉中の微量成分、特に放射能の研究を精力的に進め、一九四〇年に渡米。ミネソタ大学に勤務。温泉で有名なアーカンソーに赴任した当時、同州の温泉水に含まれる放射能研究に基づいて「この温泉の熱源は地下に存在する原子炉に由来する」との着想を得る。

*6 エンリコ・フェルミ

一九〇一〜一九五四。イタリアの物理学者。一九三八年、ノーベル賞受賞と同時にファシズムの迫害を逃れてアメリカへ亡命。シカゴ大学に移って、政府からの資金により、一九四二年、最初の人工原子炉を実証した。

ロセスを無視していることになるのではないかと考えたのです。そこで、「ウランが水に溶けて運ばれ、酸化還元状態の急変する所で沈殿・濃縮し、その後、水が取り除かれる」というウラン鉱床の生成プロセスを考慮して、水の量を一定と仮定しない、別のモデルで計算しました。

その結果、比較的不純物の少ない天然ウラン鉱床内で発生する中性子の実効増倍率^{*7}は約二億年前に一・〇以上、すなわち臨界に達していたはずとの結論を得ました^(vi)。この黒田の仮説は、後にオクロ天然原子炉の発見によって初めて実証されたわけです。

黒田は三十二歳で第一回日本化学会賞を受賞し、米国アーカンソー大学で教授となり、米国化学会賞の受賞の他、何度もノーベル賞候補になりました。二〇〇一年四月十六日に死去するまで論文を発表し続け、その総数は四百編にも上ります。米国アーカンソー大学化学教室のキャンパスには、黒田の業績を讃える記念碑(図3-2)が建立されています。

なお、天然原子炉成立の四条件については、第五章で改めて検討します。

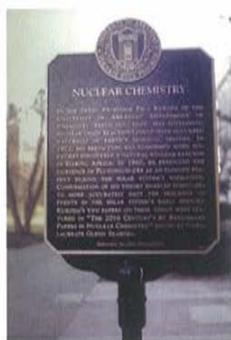


図3-2 黒田の記念碑(米国アーカンソー大学)
写真提供:(株)東京クリエイティブ(撮影:高橋由貴彦)

*7 中性子の実効増倍率
原子炉内の核分裂に関する中性子の実効増倍率(k)は、「 k 」単位時間あたりの中性子発生数/単位時間あたりの中性子消滅数(吸収および漏れによる)で定義される。 $k=1$ のとき、臨界状態にある。

第四章

オクロ天然原子炉の発見

四一 発見の経緯

それは一九七二年六月の初め、フランスのピエールラット・ウラン濃縮工場でウラン同位体の存在比の異常が発見されたことがきっかけでした。

天然ウランの同位体は、ウラン234、ウラン235、ウラン238の三種類で、それぞれの存在比は、当時、 0.0054% 、 0.7202% 、および 99.275% です。また軽い元素の同位体存在比にはかなりの偏差（バラツキ）がありますが、ウランのような重い元素では偏差は千分の一以下とみなされていました。

ところが、ピエールラット・ウラン濃縮工場で、天然ウラン中のウラン235の濃度を分析していたところ、天然ウラン中における標準の存在比である 0.7202% より低い、 0.7171% を検出したのです。この数字はわずかな違いのように見えますが、実は $(0.7171 - 0.7202) / 0.7202 = 0.0043$ という偏差は、存在比として極めて大きな差異を示すもので

した。

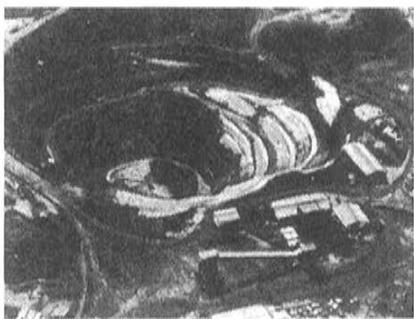
フランス原子力庁は、地質学者、鉱物学者、中性子物理学者、化学者らを動員して、この存在比異常の原因究明に取り組みました。その結果、ウランの産地に原因があるという結論にいたり、フランスヴィル・ウラン鉱山会社の経営するオクロ鉱山からウラン鉱石を取り寄せ、そこから直接ウランを抽出し、同位体分析を行いました。するとオクロのウラン鉱石は、ウラン235の存在比が最小で0・四四〇〇%という、天然ウランの常識とかけはなれた驚くべき値を示したのです。

この異常は、自然の状態で生じた核分裂連鎖反応の結果であると結論づけられ、約二〇億年前に天然原子炉が存在したことが明らかにされました。この段階でフランス原子力庁は「ル・モンド」紙などマスコミを通じて「天然原子炉」の存在を全世界に伝え、日本の新聞もこの発見を報じました(図4-1)。

17億年前の「天然原子炉」

アフリカで証拠発見

仏で発表



【パリ二十日（八日）時事】「アフリカ大陸の中部に、十七億年前の天然原子炉の遺跡が発見された。この天然原子炉は、ウランと天然ウランの混合物からなる。この天然原子炉は、ウランと天然ウランの混合物からなる。この天然原子炉は、ウランと天然ウランの混合物からなる。」

【パリ二十日（八日）時事】「アフリカ大陸の中部に、十七億年前の天然原子炉の遺跡が発見された。この天然原子炉は、ウランと天然ウランの混合物からなる。この天然原子炉は、ウランと天然ウランの混合物からなる。」

毎日新聞社提供／毎日新聞1972年9月26日付夕刊

17億年前に原子力反応 仏、ウラン鉱分析で発見

【パリ二十日（八日）時事】「アフリカ大陸の中部に、十七億年前の天然原子炉の遺跡が発見された。この天然原子炉は、ウランと天然ウランの混合物からなる。」

【パリ二十日（八日）時事】「アフリカ大陸の中部に、十七億年前の天然原子炉の遺跡が発見された。この天然原子炉は、ウランと天然ウランの混合物からなる。」

共同通信配信／日本経済新聞1972年9月26日付夕刊

図4-1 フランスが天然原子炉を発見したことを報じる各新聞

四一 天然原子炉の概要

ここでオクロ天然原子炉の概要を見てみましょう。

天然原子炉はガボン共和国東部のオクロ鉱床の中に位置します。高品位のウラン鉱で知られるオクロ鉱床は、アフリカ大陸の中核をなすコンゴクラトン（クラトンとは、地殻の比較的安定した部分のこと）の北西縁、フランスヴィル堆積盆^{*8}の最下部にある砂岩層中に含まれます。この地域は、地質構造的に見ると始生代（二五億年以前）の主として花崗岩類から成る基盤岩と、原生代前期（二五億年前〜一六億年前）の堆積岩類および火山岩類から成ります。

図4-2はフランスヴィル堆積盆の地質図です。堆積盆に分布する地層は、下層から砂岩（通称FA層）、黒色頁岩^{*9}（同FB層）、泥岩（同FC層）、凝灰岩（同FD層）、火砕質砂岩（同FE層）を主とする五つの堆積層から成ります。ウラン鉱床は、河川的作用により運ばれた砂や礫が河川の流路沿いや三角州にたまって形成された砂岩および礫岩であり、このFA層の砂岩の中に含まれています。

フランスヴィル堆積盆の北西部には、北からポインジー、ムーナナ、オクロ、オケロポンドの四鉱床があって、この堆積盆のウラン埋蔵量の約八〇%を占めています。堆積盆中央部ではバゴンベ、ミコロンゴ鉱床が発見されています（図4-2）。

オクロ鉱床は非常に大きなウラン鉱床で、天然原子炉として反応を起こしていたのは、そのすべ

*8 堆積盆
ある期間沈降の傾向を持続し、その間にかなりの厚さの地層が堆積する区域。広さや期間はさまざまである。

*9 黒色頁岩
嫌気的環境に生成する堆積岩。無気帯を構成する水域の表面を浮遊していた生物が、死後泥の中に沈下して腐食すると、最後の分解物として硫化水素が発生する。硫化水素が増えると、泥の中の鉄イオンは還元されて二価となり、堆積物を黒色にする。黒色泥岩ともいう。

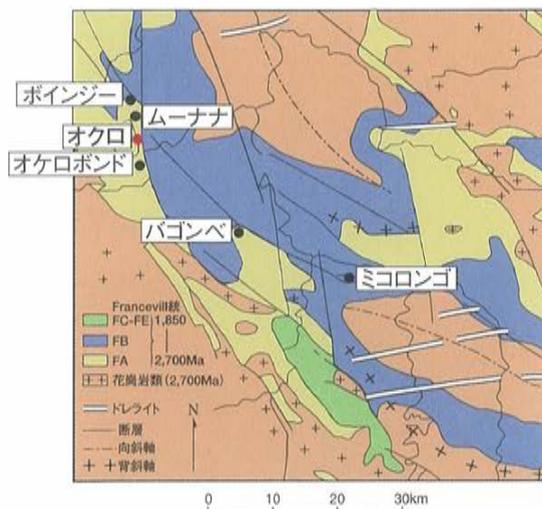


図4-2 フランスヴィル盆地の地質図(v)

てではなく、鉱床内の一部分です。これら原子炉としての核分裂の臨界に達していた部分を原子炉ゾーンといいます。

オクロでは、最初の天然原子炉の確認から現在までに、**図4-3**に示すように全部で十六個の天然原子炉ゾーンが見つかりました。最近では、オクロ近郊のオケロポンド地区とバゴンベ地区でも天然原子炉ゾーンが発見されています^(vii)。

天然原子炉ゾーンの中で、鉱床北部のNo.1～9は比較的浅い所にあつたため、一九七二年以来たて続けに発見されたものです。これに対してNo.10～14およびNo.16は、地表から数百mという深さにあつたため発見が遅れ、一九八



図4-3 オクロ天然原子炉ゾーン (vii)

一年以降に見つかっています。

現在では、地表に露出した天然原子炉ゾーンNo.2の一部だけが、コンクリートの壁で保存されています。

ここで、写真によって砂岩上に残された天然原子炉の跡を見てください。図4-4の中央に見える構造物は、保存部分です。右下に見える模様は、原子炉ゾーンNo.1の跡です。これは、この砂岩上のウランの堆積部で天然原子炉が誕生し、そのときに発生した熱水の循環によって砂岩のケイ砂部分が溶け出し、このような模様を作ったと考えられています。原子炉ゾーンの部分に接近して撮影したの



図4-4 オクロ鉱床露天掘採石場の景観と原子炉ゾーンNo.2の保存部分^(v) (○で囲まれた部分、矢印は原子炉ゾーンNo.1の跡を示す)

が図4-5です。これを見ると、相当に侵食されていることがよく分かります^(vi)。

続いて、重点的に研究が行われている原子炉ゾーンNo.2を例にとつて、天然原子炉の構造とウラン235の状況を説明しましょう。

図4-6は原子炉ゾーンNo.2に関して、露頭(地層の露出部)と切羽^{きりは}¹⁰のおおよその位置を示したものです。切羽の1-3が保存部分の北、東および南の面を構成しており、東面の切羽2の地質構造を図4-7に示しました。

図4-7のF. pi.で表された部分は「原子炉コア」と呼ばれる二酸化ウラン濃度の高い部分を示しており、ウランの含有率は二〇〜五〇%にも達しています。核分裂連鎖反応が展開されたのはこの部分なのです。この原子炉コアは、P.で表される粘土質母岩に囲まれており、粘土質母岩と原子炉コアを合わせた厚さは〇・二〜三・〇m、長さは原子炉ゾーンによりまちまちですが、No.2が属する第一グループではだいたい一五〜二〇mです。



図4-5 侵食された原子炉ゾーン(写真提供：NAGRA)

*10 切羽
 鉱山の坑道の先端にある坑内作業場の総称で、採掘場と同義である。



図4-6 原子炉ゾーンNo.2の露頭(原子炉コア)と切羽の位置 (viii)

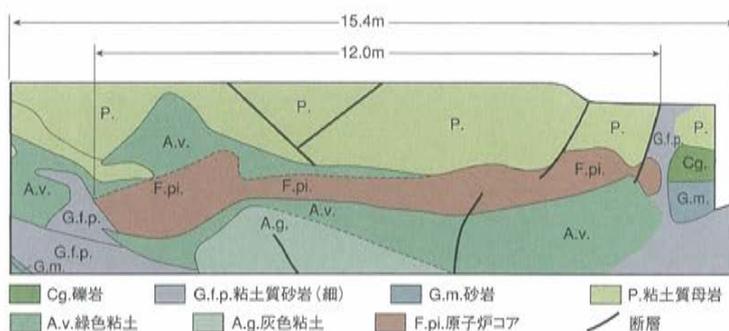


図4-7 切羽2(原子炉ゾーンNo.2の保存部分) (vi)

地表では粘土質母岩と原子炉コアは見分けにくいのですが、放射能強度がはっきり異なるため、これを測定することで区別できます。

この二つの境界における放射能強度の変化はかなり著しく、わずか数cmの間に、粘土質母岩の四〇、〇〇〇カウント/秒*₁₁から原子炉コアの二〇〇、〇〇〇カウント/秒まで急激に変化しています。顕微鏡などによる観察では、原子炉コアは赤い斑点を含む粘土マトリクスと閃ウラン鉱から成っていることが分かります。

図4-6で原子炉ゾーンNo.2の露頭の形状が分かりますが、その中央の直線L（長さ約1m）に沿うウラン235の存在比の変化を示したのが図4-8です。

曲線①がウラン235の存在比で、この図では上に行くほど劣化*₁₂度が高くなるよう表現されています。横軸の試料番号4と5の間にウラン

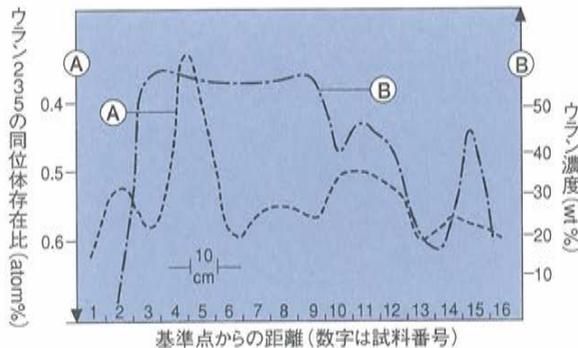


図4-8 原子炉ゾーンNo.2の露頭の直線L上で測定したウラン235の同位体存在比とウラン濃度(viii)

235の存在比が〇・三二三%というピークがあります。このピークは、ウラン濃度(曲線⑧)が五〇%以上の部分に存在しています。すなわち、ウラン濃度の高い部分ではウラン235が臨界に達し、核分裂連鎖反応が盛んに起こって(天然原子炉が運転され)、その結果としてウラン235が消費され、存在比が著しく低くなることが分かります。

四一三 天然原子炉の年齢

では、このオクロ天然原子炉は、どのくらい昔に「燃えて」いたのでしょうか(本書では、臨界に達したことを言う場合、比喩的に「燃える」という表現を使っています)。

天然原子炉の年齢に関する研究として、天然原子炉の中で起こった核分裂反応に基礎を置くものがあります。その研究には、ウラン235の存在比や、核分裂生成物のネオジム(143、1

*11 カウント/秒

放射能強度を表す単位。放射線測定器で測定された一秒間の放射線の数。

*12 同位体存在比の劣化

同位体存在比が、天然のものより小さくなること。

44、145、146、150)、サマリウム(147、148、154)、ルテニウム(101、102、104)などの測定値から原子炉の年齢を計算する方法、さらには放射性崩壊によって生成されるトリウム232を利用して計算する方法があります。

ただし、これらの方法は、原子炉ゾーンの中で核分裂生成物の大部分が失われることなく現在まで存在していることを前提条件としています。それらの結果を平均すると、オクロ天然原子炉は今から約二〇億年前に「燃えて」いたと考えられています(表4-1)。

この研究は、過去の環境条件などを推定して求めるため、さまざまな推定誤差(不確実性)を含んでいます。オクロに関する研究では、常にこの推定誤差の克服が課題となっています。

四-四 人工の原子炉との比較

オクロ天然原子炉の放出したエネルギーの総量はかなり大きなものでした。十六個の原子炉ゾーンのうち六個(Na1~Na6)について調査した結果によると、放出されたエネルギーの総量は現在の百万kW級の原子力発電所の原子炉五基、たとえば柏崎刈羽^{かりわ}原子力発電所^{*13}の第1号機から第5号機(百万kW)を全出力で一年間運転したときに発生する熱エネルギーにほぼ等しくなります(図4-9、原子力発電所については付録参照)。

*13 柏崎刈羽原子力発電所
 日本海に面した新潟県柏崎市と刈羽村にまたがる敷地に、東京電力が営業運転を行う原子力発電所。七基の原子炉が運転して
 いる。

試料** (原子炉ゾーンNo.2)	測定対象元素	年齢 (×10億年)
KN 50-3548	Nd	1.99
	Sm	2.02
	Ru	1.93*
	Th	2.03
KN 50-323	Nd	2.04
	Sm	2.02
	Ru	2.08
SC 36-1408-4	Nd	1.91
	Sm	1.99
SC 36-1410-3	Nd	1.97
	Sm	1.92
	Th	1.92
SC 36-1413-3	Nd	2.01
	Sm	2.06
	Ru	1.58*
	Th	2.11
SC 36-1418	Nd	2.00
	Sm	1.95
	Th	2.03
SC 36-1423	Th	2.28*
平均値		2.00

表4-1 核反応生成物の測定から計算された核反応の年代^(vi)

* 平均値の計算から除外したもの。

** 試料の採取位置は図4-6を参照。

このエネルギーの総量は、核分裂連鎖反応で消費されたウラン235の量から求めることができず。まず、核分裂連鎖反応を経験しない場合の現在の天然ウラン中のウラン235の濃度（同位体存在比）が〇・七二〇二％であるのに比べて、オクロ釷床の天然原子炉の「炉心」付近の現在のウラン235の同位体存在比が異常に小さいので、この両者の差を求めます。もう一つ、核分裂連鎖反応が持続している間にウラン238からプルトニウム239が生成され、それが崩壊するとウラン235になるのです。この二つの量を勘案して計算すると、六個の天然原子炉で失われたウラン235の総量は、約六トンとなります（v）。

天然原子炉を観察したところ、熱現象の結果などから、かなり穏やかに長期にわたって熱を放出していたのではないかと考えられています。放出期間を計算するにあたっては、天然原子炉内でプルトニウムが生成時点の位置から移動していないことと、そのプルトニウムの生成場所で崩壊し、ウラン235になっていることを前提としています。以上の研究結果として、約六〇万年の間、核分裂連鎖反応が持続していたと推定されています。なお、ここでは一定の中性子束のもとで反応が持続していたと仮定していますが、実際には連鎖反応は間欠的であった可能性もあります（vi）。

いずれにしても、この天然原子炉の放出したエネルギーの総量から見ると、これらの天然原子炉は非常に弱い出力で長期間「運転」されていたと考えられます。

では、この天然原子炉はなぜ停止してしまったのでしょうか。それは水がなくなったためです。後で触れますが、水は核分裂反応を持続させるために必要な物質なのです。

図4-7で見たように、原子炉コアは周囲を粘土に囲まれています。この粘土は、核分裂反応によって起こった熱水の循環により、もとあった砂質岩が変質し形成されました。その過程で原子炉コアの周囲にあった地下水が押し出され、その結果、核分裂反応が停止したと考えられます。

柏崎刈羽発電所
「110万kW×5基×1年間」の
運転で発生するエネルギー



写真提供：東京電力株式会社

オクロ天然原子炉
「約60万年間」の
核分裂連鎖反応で発生するエネルギー



図4-9 柏崎刈羽発電所とオクロ天然原子炉

第五章

重なり合った偶然

五― 天然原子炉成立のプロセスと成立条件

現在でこそ核分裂性のウラン235の存在比はわずか0・七％程度ですが、地球が約四六億年前に形成された時点では、地球上の天然ウラン全体の二三％がウラン235でした。これだけウラン235が多く含まれていれば、天然ウランが臨界に達し、核分裂反応が持続するには、比較的少量で十分だったはずですが。しかし、創生期の地球はまだマグマ・オーシヤンの状態（液体状）で、鉱物の生成プロセスは存在しておらず、ウランが十分に濃縮することはありませんでした。

地殻が形成された頃のウランは二酸化ウランという形で地殻の中に存在していて、局部的な濃度は決して高いものではなかったようです。すなわち、第三章で紹介した天然原子炉の成立の第一条件である「ウラン濃度の高いウラン鉱床」は未だ形成されず、ウラン235の存在比が高くてもこの時期に臨界に達することはなかったというわけです。

二十数億年前になると、地球大気の組成は現在の金星と同じようにCO₂（二酸化炭素）と水蒸気

が大部分を占めていたと考えられますが、二〇〇二五億年前頃から登場した植物が光合成を始め、大気中の酸素は次第に増加していきました。

このため地表付近に露出した二酸化ウランは大気と接触して酸化され、より原子価の高い水溶性のウランニル錯イオンとなり、雨水によって多量のウランが溶け出して地下深くにしみ込み、有機物を含む層で還元されて再び不溶性となり、沈殿しました。

そしてウランは閃ウラン鉱^{*14}、ピッチブレンド^{*15}、コフィンナイト^{*16}といった鉱物になったり、あるいは溶け出したウランが還元性の環境で沈殿して堆積したようです。このようにして地球化学的プロセスとしての酸化と還元を受けながら、ウランの濃度の高い鉱床が形成されていったと考えられています (v)。

第二の条件は、「ウラン235の同位体存在比が高いこと」でした。これについては、地球史をさかのぼるほど同位体存在比は高くなり、成立の条件に合ってきました。その理由は次のとおりです。天然のウランを構成している核種は、ウラン238、ウラン235、ウラン238の崩壊系列に

*14 閃ウラン鉱

ウラン、ラジウムなどの原料鉱物。含まれるウランは四価が大部分。

*15 ピッチブレンド

ウランとラジウムから成る代表的な鉱物で、八酸化三ウランの含有量が五〇〜八五%であり、ウラン原料として最も有用。閃ウラン鉱の一種で、非晶質もしくは非常に微細な鉱物。濃青(れきせい)ウラン鉱ともいう。

*16 コフィンナイト

ウラン、トリウムシリカを含む鉱物。砂岩中に産出することの多い、微細鉱物。

属するウラン234の三種類ですが、ウラン238の半減期が約四五億年であるのに対してウラン235のそれは約七億年であるため、今から約二億年前のウラン235の同位体存在比は、**図5-1**に示すように、現在の〇・七二〇二%に対して約4%と、とても高かったのです。これは二億年前の天然ウランが、今日の原子力発電所で使用する人工的な濃縮ウラン*¹⁷と並みだったことを意味しています。

第三の条件は、「中性子吸収断面積の大きい元素がウラン鉱床内に存在しないこと」でした。中性子吸収断面積の大きい(中性子を吸収しやすい)元素が存在すると、核分裂反応が進むにつれて中性子の数が減少していき、核分裂反応は収まってしまう。このような状態を未臨界と言います。オクロ天然原子炉の炉心付近には、このような中性子吸収断面積の大きい元素、例えば、カドミウ

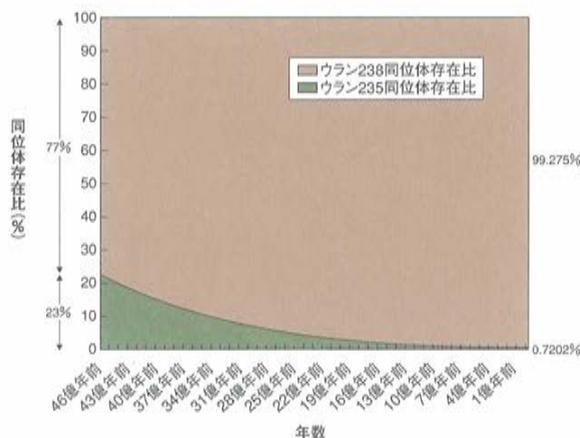


図5-1 地球のウラン同位体存在比

ム、ホウ素などがほとんど存在しませんでした。

第四の条件は「ウラン235の核分裂を引き起こす熱中性子^{*}を作り出すための水が存在すること」です。原子炉では、ウラン235の核分裂の連鎖反応を継続させるために、核分裂で出てきた高速の中性子を減速させて（エネルギーを抑えて）熱中性子に変えるための物質（中性子減速材）が必要となります。その一つが炉心に満たされている水です。この水が中性子を減速して、核分裂反応を継続させるのです。

なぜ中性子を減速しなければならないかというと、高速な中性子は天然ウランの大部分を占めるウラン238に吸収されてしまうため、ウラン235の核分裂に使われず、核分裂連鎖が起これないからです。これに対して減速された中性子（熱中性子）はウラン238に吸収されないため、ウラン235にぶつかって核分裂を起こし、次々と反応が続くこととなります。

このようにオククロにおいて水は、ウラン鉱床の形成と減速材という二つの大きな役割を果たしているのです（^v）。

*17 濃縮ウラン

天然ウランに含まれるウラン235の比率（〇・七二〇二％）を三〜五％まで濃縮したもの。

*18 熱中性子

エネルギーの高い中性子が物質中を拡散する間に原子核と衝突してエネルギーを失い、最終的にその物質の分子の熱運動と平衡に達した状態の中性子。

五二一 天然原子炉は他にもあるか

オクロク以外にも天然原子炉は存在したでしょうか。現在の地球上のウラン資源量の分布状態を見てみましょう(図5-2)。なお、オクロクは現在では生産終了、閉山となっています。

天然原子炉が存在するためには、「天然原子炉成立の四条件」を満たさなければなりません。それにはウラン濃度の高い鉱床の存在が必須ともいえます。そこで、ウランを豊富に含んでいる鉱床の試料に対して四つの測定を行い、天然原子炉として核分裂を経験したか否かを調査しました。

(1) ウラン235の同位体存在比の測定。核分裂を経験していればウラン235が消耗されるため、その存在比は小さくなります。

(2) ネオジウム143/ネオジウム142の測定。天然に存在するネオジウムの同位体存在比の比は、(ネオジウム143/ネオジウム142) ≐ (二・二%/二七・二%) ≐ 〇・四四九ですが、核分裂連鎖反応を経験していればネオジウム142は生成されず、ネオジウム143のみが供給されるので、この比は〇・四四九より大きくなります。

(3) サマリウム150/サマリウム149の測定。天然に存在するサマリウムの同位体存在比の比は、(サマリウム150/サマリウム149) ≐ (七・四%/一三・九%) ≐ 〇・五三二ですが、核分裂連鎖反応を経験していれば、核分裂連鎖反応にともなう原子炉の中で大量に発生する中性子との反応によって、サマリウム149はサマリウム150に変わっていくの

で、サマリウム150／サマリウム149は○・五三二より大きくなります。

(4) 白金族元素に属するルテニウムは、地球上の岩石中にはほとんど含まれていませんが、ウラン235の核分裂によって多量に生成されます。ウラン235の核分裂で見込まれるルテニウムの収率は一七％で、過度のウラン235が存在していれば検出可能です。

以上の調査の結果、オクロ以外の天然原子炉の存在は立証できませんでした。これをもって他に天然原子炉は存在しないと断定はできませんが、オクロの天然原子炉が極めて稀有な例であったことは確かです。

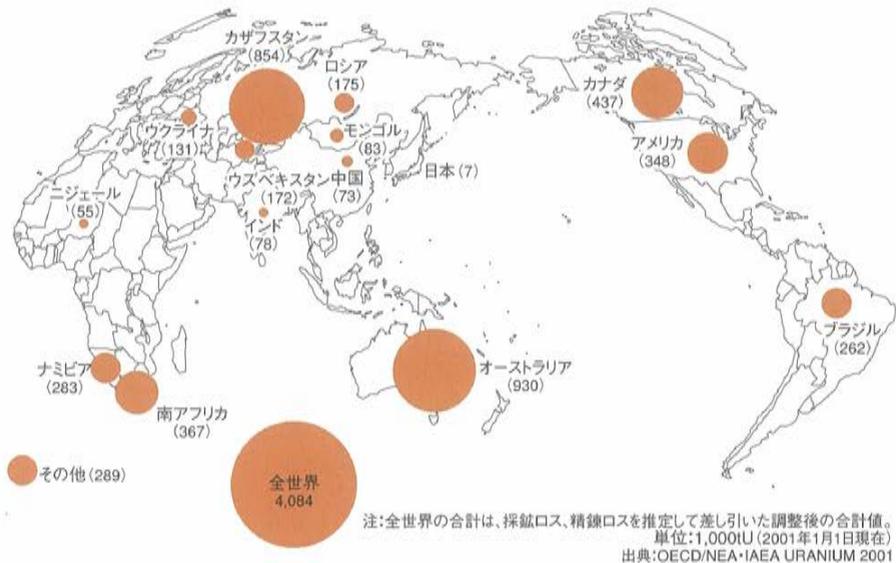


図5-2 世界のウラン資源量 (ix)

第六章

オクロ天然原子炉の痕跡

これまで、自然界には存在しないと考えられていた天然の原子炉が、アフリカのオクロという鉱山で発見され、それが約二〇億年ものほるか昔に、さまざまな偶然が重なり合ってできあがったものであることをご紹介してきました。また天然の原子炉は、現在の百万kW級の原子力発電所五基が、一年間全出力で運転したときに相当するほどのエネルギーを、六〇万年間という、とても長い時間をかけて少しずつ放出していったものであることもご紹介しました。

では、その後のオクロ天然原子炉はどうなったのでしょうか。核分裂反応が起きた場所では、高い放射能を持つ放射性物質が大量にできたはずですが、不安定な放射性元素は、放射線を出しながら壊れ、安定した元素へと変化していきますが、その中には千年から万年、あるいはそれ以上におよぶ非常に長い時間をかけて変化するものがあります。したがって、そのままだといかなる生物も近づけないはずですが、現在のオクロ天然原子炉ではそのようなことはありません。約二〇億年を経て、多くの放射性元素は安定した元素に変わり、天然原子炉の痕跡を直接見る事ができる状態となっているのです。

ここでは、オクロ天然原子炉の痕跡に焦点を当て、原子炉としての活動を終えた後、どのような自然の営みがあったかを紹介したいと思います。

六一 天然原子炉と「地層処分」

近年、原子力エネルギーを考える上で、「高レベル放射性廃棄物の地層処分」というテーマに注目が集まっています。

原子力発電所で発生した使用済燃料は再処理施設に送られ、核燃料として再利用可能なウランやプルトニウムが回収されますが、後に残った廃液には、放射性物質が多く含まれています。そこで、廃液中の放射性物質は、温度を加えて水分を蒸発させるとともに、ガラス原料に高温で溶かし込んだのち、ステンレス製の容器（キャニスター）に入れられます。このようにガラス化してキャニスターに封じ込めたもの（ガラス固化体）を一般に「高レベル放射性廃棄物」といいます。

高レベル放射性廃棄物は量が少なく、ガラス固化されることで固体で水に溶けにくいなど、安定した形態になりますが、長い間放射線を出し続ける放射性物質を含んでいます。このため、わが国では、高レベル放射性廃棄物を三十〜五十年間程度貯蔵施設で保管した後、地下の深い地層の中に処分することを基本方針としています。これが「地層処分」です。

地層処分が基本方針とされたのは、一般に地下の深部には、温度や圧力、あるいは化学的な性質などが長期にわたって安定した状態の環境があると考えられているからです。そこで地層処分では、まず活火山などのように自然現象によって地層が著しく変動する地域を避け、安定した環境を適切に選定します。さらに、ガラス素材や金属材料・粘土材料などを用いて人工的なバリアを幾重にも作り、地層という天然のバリアと一体化することで多重のバリアシステムを構築します。多重バリアシステムによる地層処分の概念を図6-1に示します。

ところで、地層処分場の長期にわたる安定性を確立するためには、どのようにすればよいのでしょうか。現在、さまざまな分野の科学者や専門技術者が、このような課題をテーマに最先端の科学技術を駆使して数値解析や実験等に基づく研究を行っています。一方で、これらに加えて、自然に存在し類似性のある現象を研究することによって、地層処分に関する現象の理解を深めたり、解析や実験で得られた理論値の妥当性の評価に利用することがあります。これを「ナチュラル・アナログ研究」といいます。

およそ四六億年という長い地球の歴史の中で、実際に起こった自然現象を研究の対象とするわけですから、地層処分における長期の安全性を考慮する上で貴重な知見が得られるものとして、近年、ますますその重要性が注目されてきている研究分野です。

オクロ天然原子炉で見られる現象は、約二〇億年という期間でもって地層中に置かれた放射性核種がどのようにふるまい、それがどのようなメカニズムで起こるのかを垣間見ることができるとい

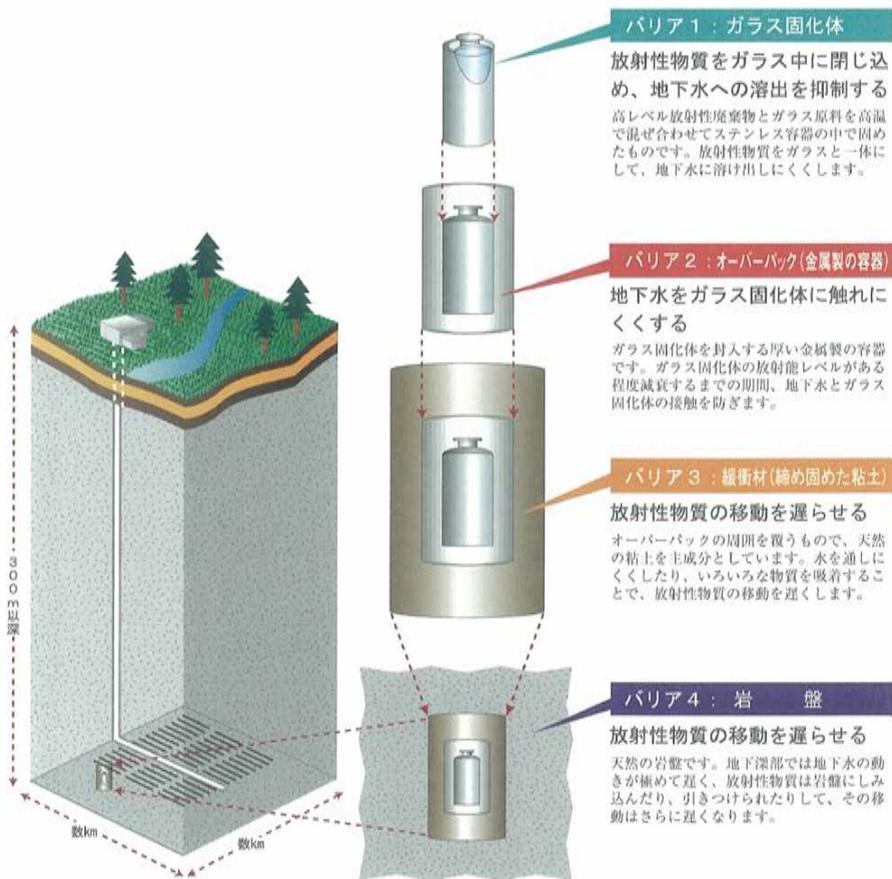


図6-1 多重バリアによる地層処分概念

う点で、他には例がないと言えるほど、貴重な情報を私たちに提供してくれます。

六―二 核種の生成

オクロ天然原子炉では、現在の原子力発電所と同じように核分裂反応が起き、プルトニウムなど自然界には存在しないと考えられていた放射性核種が生まれました。もちろん、その様子を直接見た人間は誰もいませんが、現在残っている痕跡から、これは間違いない事実です。

しかし、天然原子炉は原子力発電所と異なる点も多くあります。その一番大きなものは活動期間です。原子力発電所に入れた核燃料は、三、四年間ほど使った後に使用済核燃料として取り出されます。これに対して天然原子炉では極めてゆっくりとウランが「燃えた」ため、場所によって違いはありますが、二〇万〜八〇万年の間、燃料を入れ替えることなく燃え続けました。そのためウランから生まれたプルトニウムなどの核種は、原子力発電所で生まれた核種とは異なる運命をたどることになります。

プルトニウムのうち、最も重要な役割を果たす同位体は、次の反応で生まれるプルトニウム ^{239}Pu （陽子九十四個と中性子百四十五個）です。

ウラン238 + 中性子1個 → プルトニウム239

原子力発電所でウラン238から生まれたプルトニウム239は、ウラン235と同じように「燃えて」エネルギーを発生します。燃料としてウランだけを使う現在の軽水炉（減速材に水を用いる原子炉）でも、電力の三〇％はプルトニウム239により生み出されています^(xi)。

一方、オクロ天然原子炉ではほとんどの核分裂はウラン235（プルトニウム239の崩壊により生み出されたものも含みます）により引き起こされており、プルトニウム239によるものはわずかです。この様子を表6-1と図6-2とに示します。

これは、プルトニウム239の半減期は約二万四千年で、ヒトの一生よりはるかに長い時間をかけて崩壊するものの、ウラン235（七億年）やウラン238（四五億年）と比べると極めて短命であり、前述のオクロ天然原子炉の活動時間と比べても数十分の一程度のため、天然原子炉で生まれたプルトニウム239の多くが燃える前にウラン235になったためと考えられています。

ウランもプルトニウムも、燃えると二つの原子核に分かれて、数種類の別の核種になります。このときできる核種は、ウランが燃えたときでもプルトニウムが燃えたときでもほぼ同じです。このオクロ天然原子炉でできた“燃えかす”は、原子力発電所から取り出された使用済燃料を再処理した残りである「高レベル放射性廃棄物」に相当し、その違いも大きくありません。

これらの“燃えかす”には、主にプルトニウム239と中性子との反応で生成される「超ウラン

表6-1 オクロにおけるいくつかの天然原子炉ゾーンと原子力発電所との特性比較 (x, xi)

原子炉ゾーン番号		2	3	5	10	13	原子力発電所
ウラン235 濃度	燃焼前	約3.7%					3~5%
	燃焼後*	0.4650%	0.6940±8%	0.6703±7%	0.5793±18%	0.4630±6%	約1%
ウラン濃度 (%)		55.2	48.0	50.7	24.3	59.4	100
ウラン235の発熱量への寄与率		0.945	0.945	0.950	0.927	0.749	0.63
ウラン238の発熱量への寄与率		0.025	0.025	0.025	0.049	0.179	0.07
プルトニウム239の発熱量への寄与率		0.030	0.030	0.025	0.027	0.072	0.30
活動時間		80万年間	20万年間	17万年間	20万年間	2.4万年間	3~4年間

*オクロ天然原子炉ゾーンについては、活動終了直後ではなく、現在の値。

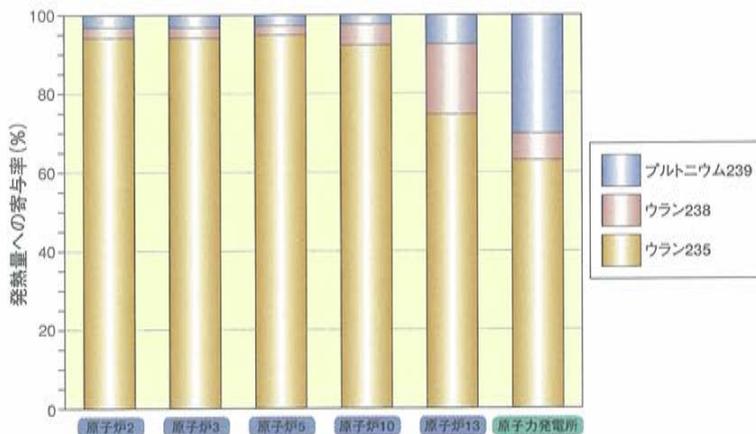


図6-2 いくつかの天然原子炉ゾーンと原子力発電所との各核種の発熱量への寄与率の比較

元素^{*19}』と呼ばれる物質も含まれています。代表的な核種はネプツニウム237で、半減期は二一四万年ととても長く、各国で行われている高レベル放射性廃棄物処分についての計算結果^(xii, xiii, xiv)によると、自然環境に与える影響の可能性が最も大きい核種の一つです。

しかし前述のとおり、オクロ天然原子炉ではプルトニウム239の多くは中性子と反応する前に崩壊したため、プルトニウム239を除く超ウラン元素の生成量は少なく、オクロ天然原子炉の研究から超ウラン元素の移行に関する知見はあまり得られていません。

また、生成された核種が置かれた状態も極めて異なります。詳しくは後述しますが、天然原子炉においては、核種の周囲にその動きを妨げる「壁」が自然によって設けられました。これに対して高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄物はガラスにより固化され、さらにオーバーパック、緩衝材から成る、何重もの「壁」で人工的に閉じ込められます。

以上のような相違点がありますが、オクロ天然原子炉の研究により得られる情報は、地層処分の長期にわたる安定性について、何らかの知見を与えると考えられます。

さて、天然原子炉の中で作られた核種は、天然原子炉の活動停止から二〇億年という長い長い時

*19 超ウラン元素

原子番号が92(ウラン)を超える元素をいい、周期表第三属アクチノイド族に属する。いずれも人工の放射性核種であり、現在までに発見されているものには、ネプツニウム(93)、プルトニウム(94)、アメリカシウム(95)、キュリウム(96)、バークリウム(97)、カリホルニウム(98)、アインスタイニウム(99)、フェルミウム(100)、メンデレビウム(101)、ノーベリウム(102)、ローレンシウム(103)などがある。

間の間に、どのようなふるまいをしたのでしょうか。次節以降は核種のうち、ウランとプルトニウム、セシウムについて、これまで得られた研究成果の一部をご紹介します。

六―三 ウランとプルトニウムの移動

約二〇億年前、登場したばかりの植物が生み出す酸素によって、地球環境は大きく変わりました。ウランは酸化的雰囲気では水溶性、還元的气氛では不溶性を示します。そのため、オクロ鉱山のウランの一部はこの酸素と反応して水に溶けやすい化合物となり、雨水や地下水の流れとともに移動しました。一方で酸素の量が少ない還元的な場所もあり、そこでウランは再び水に溶けにくい化合物に変わって蓄積していきました。地殻の活動とも相まって、場所によってはウラン濃度が六〇%近くまで上昇⁽⁵⁾し、地球上で初めて原子の火が灯りました。

言い換えると、オクロ天然原子炉はウランが水の流れとともに移動して、溜まり、その後ウランが移動しなかった場所にできたといえます。そして、その状況は二〇億年たった今でもさほど大きくは変わっておらず、ウランの移動は限定的です。また化学的な性質がウランと似ているプルトニウムも、ほとんど移動していません。

まずオクロにおいてウランとプルトニウムがほとんど移動しなかった証拠を見ていきましょう。

天然原子炉が活動している間、ウランの核分裂反応によって多くの核種が生まれました。その多くは不安定な放射性核種であったため、二〇億年の間に多くは崩壊し、現在ではウラン235など、半減期の長い一部の核種しか残っていません。しかし、核種が崩壊すれば別の核種が誕生するわけですから、変化の度合いは計算(xv, xvi)によって知ることができます。

天然原子炉の活動停止後に核種が移動していないなら、計算通りの組み合わせがそのまま残っているはずですし、特定の核種が移動した場合には、計算と異なる組み合わせが残っているでしょう。そこで測定結果を計算結果と比較して、どの元素が移動したかを求めることにします。つまり、原子炉の痕跡を調べれば、二〇億年間に起こった現象の手がかりを得ることができるというわけです。

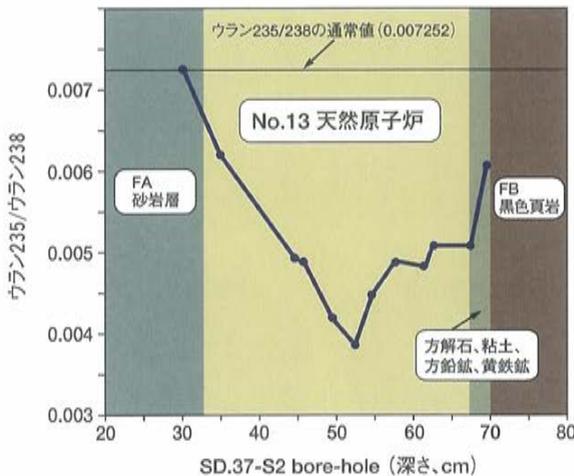


図6-3 原子炉ゾーンNo.13におけるウラン235/ウラン238分布(xvii)
天然原子炉は砂岩層 (FA) と黒色頁岩 (FB) との間にあった。

図6-3は、天然原子炉周辺で測定されたウラン235とウラン238の同位体比です。普通の焼却炉と同じように原子炉は中心部ほどよく燃え、燃料であるウラン235を多量に消費します。図のように中心部ほどウラン235の存在比が低いという事実は、天然原子炉の活動中も活動終了後も、ウランは移動せずにその場所にとどまっていたことの証だと考えられています。

ではプルトニウムはどうでしょうか。図6-4は、原子炉に残されたウラン235とウラン238の分布を、同位体分析が可能なイオン・マイクロアナライザーという特殊な装置で分析した結果です。白い個所がそれぞれウラン235とウラン238の場所を示しています。写真の直径はだいたい○・二五mmです。このように小さな範囲でも、ウラン235とウラン238は同じように分布していることが分かります。

前述のとおり、天然原子炉の活動中にウラン238からプルトニウム239が生まれ、プルトニウム239の多くは核分裂反応以前に崩壊してウラン235となったことが分かっています。しかも、より詳しい計算^(xviii)によれば、現在オクロ天然原子炉に残されているウラン

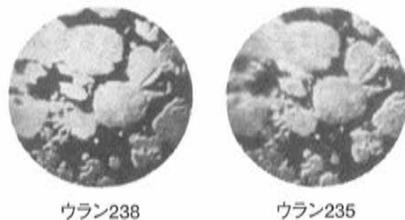


図6-4 原子炉ゾーンNo.2のボーリング孔から採取された試料の、ウラン235とウラン238の分布^(x)

235の約半分は、プルトニウム239の崩壊によって作られたとされています。

したがってプルトニウムが移動したとすると、それが崩壊して作られたウラン235と、もともとあったウラン235がほぼ同じ量ずつ、別々の場所に存在しているはずですが、にもかかわらず、**図6-4**から分かるようにウラン235はウラン238と同じ場所にあります。ということは、もともとあったウラン235は当然ウラン238と同じ場所にあるはずですから、同じ量のプルトニウムから作られたウラン235も同じ位置にあるということになり、結果としてプルトニウムは移動せずに生まれた場所で崩壊したと考えられます。

一方、プルトニウムが原子炉の外に移動したとすれば、通常のウラン235の存在量にプルトニウム239の崩壊によって生成したウラン235が加わるため、こうした場所では「濃縮」されたウランが存在する可能性があります。

しかし、オクロ天然原子炉では多くの試料が採取され、測定が行われましたが、濃縮現象が確認された地点は後述の一個所のみであり、全体としてはプルトニウムは移動しなかったと考えられています。最近の研究によると、原子炉を覆うように存在する粘土層中のイライト（粘土鉱物）、アパタイト（カルシウム燐酸塩鉱物、ヒトの歯の主成分としておなじみ）などにおいてもウラン235の濃縮が確認されていますが、全体としてプルトニウムの移動は少ないと考えられています。

それではなぜウランやプルトニウムは移動しなかったのでしょうか。

第一の理由は、地下に酸素が少なかったためです。酸素が少ない場所では、ウランは不溶性の性

質を示します。オクロにおいては、水に溶けにくい二酸化ウランとして安定して存在したと考えられています。したがって、仮にウランが地下水に溶け出したとしてもすぐ沈殿するため、地下水とともに移動したウランはそのごく一部であると考えられています^(註)。

このような評価は、図6-5のようなEh-pH線図^{※20}と呼ばれる図を使って、古くから議論されてきました。この図を用いると、鉄などの天然原子炉に含まれる他の鉱物を調べることによって、ある地点でのEhやpHを推測することができます。ウラン以外の元素についても同様の評価が行われています。

なお、オクロ天然原子炉における種々の元素の保持と移動について得られた結論と推論を表6-2に示します。この表から、ほとんどの元素に対してEh-pH線図による予測が観測結果と一致していることが分かります^(註)。

第二の理由は、ウランがもとも鉱物として存在していたためです。現在の原子力発電所では、ウラン粉末を焼き固めてペレット(円柱形の塊)とし、核分裂によって生成した核種が散逸しないようにしますが、オクロでは、これに近い状態が自然に発生したのです。すなわち、別の場所から移動してきたウランは、主に「閃ウラン鉱」と呼ばれる鉱物になっていました。ここが天然原子炉となつて核分裂反応が生じたわけですが、燃え残った大部分のウランはそのまま鉱物として存在し続けましたし、生成したブルトニウムもウラン鉱物の中にとどまりました。それは、ウランとブルトニウムの原子の大きさがほぼ同じ(一・〇八Å^{※21}、一・〇四Å^(v))なので、鉱物の結晶中のウラ

*20 Eh-pH線図
酸化還元電位と水素イオン濃度指数の関係図。酸化還元電位 (Eh) は酸素がどの程度あるかを示す指標で、酸素が少ないとマ
イナスの値となる。

*21 A
オングストロームと読む。¹⁰ 10 m (一〇〇億分の一メートル)。

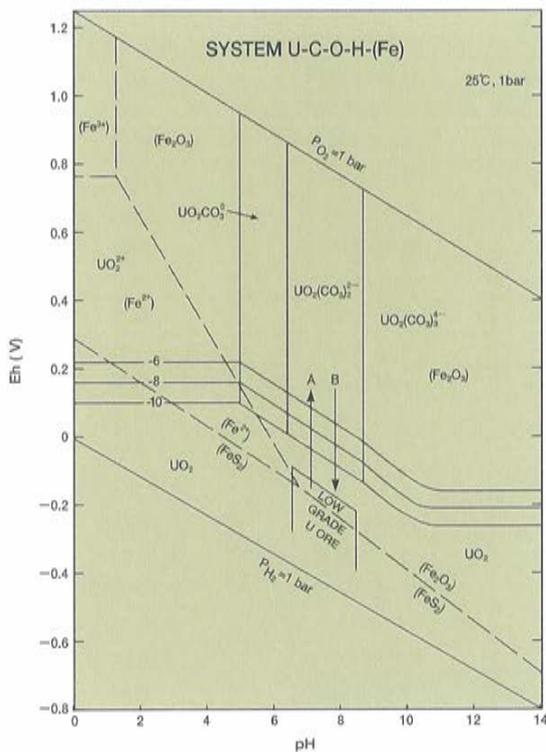


図6-5 ウランの安定的な形 (xx)

U-C-O-H系 (一部にFe-S-O-H系への外挿を含む) に対するEh-pH線図。地下深くのウラン鉱床(U ORE)に何らかの理由で酸素が近づくとAの矢印に沿って上に進み、ウランは化学変化を起こして水に溶けやすい $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ になる。逆に、水に溶けたウランが酸素と分離するとBの矢印に沿って下に進み、ウランは再び水に溶けにくい UO_2 (二酸化ウラン) になる。

表6-2 各元素の移行と予測結果との比較^(xx)

元素	観測結果	Eh-pH線図からの予想	
		25℃	200℃
クリプトン	大部分移動	適用できず	適用できず
ルビジウム	おそらく局所的に再分布	適用できず	適用できず
ストロンチウム	おそらく局所的に再分布	適用できず	適用できず
イットリウム	ほとんど保持	保持	保持
ジルコニウム	大部分保持一部は局所的に再分布	保持	一部移動
ニオブ	ほとんど保持	保持	保持
モリブデン	ほとんど保持	移動	移動
テクネチウム	局所的再分布	保持	移動?
ルテニウム	局所的再分布	保持	わずかに移動
ロジウム	大部分保持	保持	保持
パラジウム	大部分保持	保持	保持
銀	大部分保持	保持	保持
カドミウム	大部分保持	移動	移動
インジウム	大部分保持	保持	保持
スズ	未研究	保持	保持
アンチモン	未研究	おそらく移動	一部移動
テルル	未研究	保持	保持
ヨウ素	大部分移動	適用できず	適用できず
キセノン	大部分移動	適用できず	適用できず
セシウム	大部分移動?(おそらく局所的)	適用できず	適用できず
バリウム	局所的再分布	適用できず	適用できず
希土類元素	大部分保持	保持	保持
鉛	不定の移動	保持あるいは局所的再分布	一部移動
ビスマス	大部分保持	保持あるいは局所的再分布	一部移動
ポロニウム	大部分保持	保持	保持
トリウム	大部分保持	保持	保持
ウラン	一部局所的に再分布	保持あるいは局所的再分布	保持
ネプツニウム	大部分保持	保持	保持
プルトニウム	大部分保持	保持	保持
アメリシウム	測定できず	保持	保持

「適用できず」…当該元素に対してはEh-pH線図による方法が適用できないため、評価がなされていないことを意味する

ンがプルトニウムとなっても、そのまま安定してどどまったからだと考えられています(ⅴ)。

オクロ天然原子炉に関する研究が進むにつれ、ウラン235の同位体存在比が自然界の通常値より高い場所が報告されました(図6-6)。これはプルトニウムが移動した証拠になります。

別の測定から、天然原子炉は深さ九一m付近と八七m付近にもあったことが分かっています。図6-6には、それぞれの原子炉ゾーン周辺から採取した試料を塩酸に浸した後、塩酸に溶け出した成分(●)と溶け残った成分(□)のそれぞれについて、ウラン238に対するウラン235の存在比を測定した結果が示されています。

これから明らかなように、深さ約八二mの試料では、溶け残った部分のウラン238に

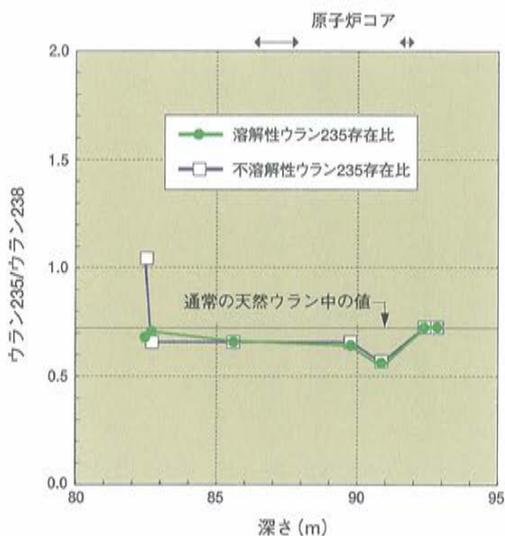


図6-6 プルトニウムが移動した痕跡 (xxi)

対するウラン235の存在比は天然の値よりも高くなっています。前述のとおり、原子炉でできたプルトニウムが余分に存在すると、もともとあったウラン235にプルトニウム239の崩壊で作られたウラン235が加わるため、このようにウラン235の存在比が高くなるのです。すなわち何らかの理由で、深さ約八二mの試料ではプルトニウムが余分に存在したことを示しています。

では、深さ約八二mの試料ではなぜプルトニウム239が周辺より高濃度に存在したのでしょうか。理由としては、①その場所でプルトニウム239が生成された、②他の場所からプルトニウム239が移動してきた、の二通りが考えられます。

試料をさらに詳しく調査し、計算結果と比較したところ、①のケースではウラン238に対するウラン235の存在比は測定値（一%超）まで上昇し得ないことが判明し、他の場所で生成したプルトニウム239が深さ約八二mまで移動したと考える②が妥当である、と結論づけられました。

またウラン235の存在比が高いことから、プルトニウム239が生成したときに同じ場所にあったはずのウランは深さ約八二mの試料の地点まで移動していないと考えられています。また仮にウランとプルトニウム239とがそのままの比率で移動してきたとするならば、深さ約八二mの地点においても、他の場所と同じくウラン235の濃縮は起こらないということからも、プルトニウムだけが移動したことが分かります。

ウランとプルトニウムがそれぞれどれだけ移動したかを調べるため、オクロ天然原子炉のいろい

ろな場所から試料が採取され、それぞれに含まれるウランとプルトニウムの同位体組成が分析されました。しかし、ウラン235の存在比が天然の値より高い場所、すなわち、ウランが移動せず、プルトニウムのみが移動した痕跡が確認された場所は、原子炉のすぐ近くの粘土層（原子炉を覆っている）に含まれるアパタイト等のみです^(xxii)。原子炉から離れたところからは、このような痕跡は見つかっていないのです。以上から、ウランは移動せず、プルトニウムのみが移動するということはほとんどないと考えられ、ウランの移動を調べることにより、プルトニウムの移動を推定することが可能と考えられます。

では、将来もウランとプルトニウムは移動しないのでしょうか。はっきりした答え

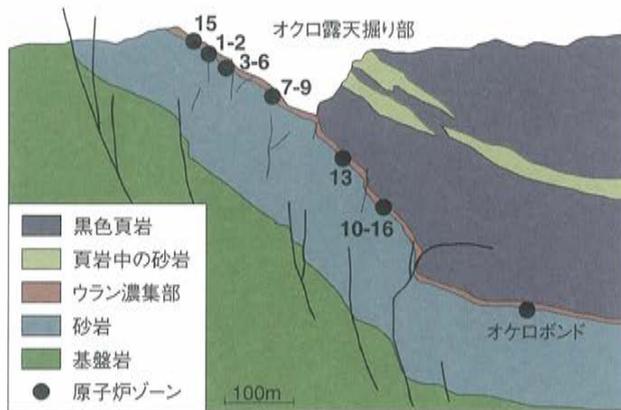


図6-7 現在のオクロ天然原子炉の断面図 (xxiii)

を得ることはできませんが、**図 6-7**に示した現在の天然原子炉の様子から推測することは可能です。

オクロでウラン鉱床が形成され、天然原子炉が活動していたのは地下深い所でした。しかしその後、地球の年齢の半分にもおよぶ長い期間で、原子炉を含む地盤は隆起したと考えられます。その結果、地下深くに存在した天然原子炉の約半分が、地表近くに姿を現しました。やがてウラン鉱山として開発が始まり、露天掘りによって天然原子炉の半数は地表にむき出しになりました。

採掘は大气中の酸素によってウランが溶けやすい状態をもたらしました。これは人類が関与したためですが、それ以前から酸素が侵入してウランが移動しやすい環境になりつつあったことを示す鉱物が、原子炉の周りから見つかっています^(xxiii)。すなわち、地下深くの酸素のないところにおいてはウランはほとんど移動しませんが、何らかの理由で酸素と接触すればウランが移動しやすい状態になる、というふうに考えられます。

六-四 セシウムとバリウムの移動

セシウムという元素をご存じでしょうか。原子番号55番のアルカリ金属で、元素周期表では、左下近くに位置します(表2-1)。高レベル放射性廃棄物処分の分野では、その同位体の一つである

セシウム135が重要な核種です。地層処分された高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性物質が人類に与える影響を予測した計算結果^(xii)を見ると(図6-8)、数十年後にはセシウム135の寄与が最も大きいことが分かります。

それではオクロ天然原子炉で生まれたセシウムは、どのようなふるまいをしたのでしょうか。ウランやプルトニウムと同様に、セシウムの痕跡の調査から、オクロ天然原子炉で生成したセシウムの動きが明らかになってきました。

高レベル放射性廃棄物の処分方法を検討する場合、処分後の安全性に関しては半減期が超長期(二三〇万年)であるセシウム135が重要な核種ですが、処分までは半減期の比較的短い(三十年)セシウム13

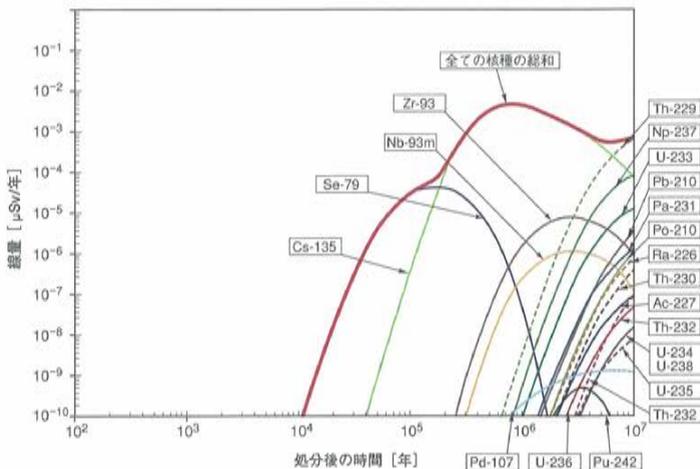


図6-8 わが国における地層処分場からの影響予測^(xii)

縦軸の線量(単位はシーベルト(Sv))は、放射線の量を表す単位で、人の身体が放射線によってどれだけ影響を受けるかを表す単位。自然界から受ける放射線の量は人の住む場所によってさまざまに変動するが、世界平均では年間2.4mSvといわれている。内訳は、宇宙から0.4mSv、大地から0.5mSv、食べ物から0.3mSv、空気中の放射性物質(ラドンなど)を吸い込むことから1.2mSv。図中の単位はマイクロシーベルト(μ Sv)。1 μ Sv=1/1000mSv。

7も重要です。

再処理工場で製造されたガラス固化体は多くの熱を発生するため、三十〜五十年間程度、地上で保管して熱を冷まし、地下に埋設します。固化体が発生する熱の約半分はセシウム137の崩壊によるものです。三十〜五十年間という貯蔵期間は、セシウム137の三十年間という半減期とも関係があります。

セシウム135とセシウム137は次のように崩壊して、それぞれバリウム135とバリウム137になります。バリウムの化合物は、白墨として知られています。

セシウム135 ↓ (半減期二三〇万年) ↓ バリウム135

セシウム137 ↓ (半減期三十年) ↓ バリウム137

三十年間という半減期は、数十万年間程度という天然原子炉の活動時間に比べると非常に短いため、セシウム137はすぐにバリウムとなってしまします。その後数百万〜数千万年間をかけてセシウム135が崩壊し、現在ではともにすべてバリウムとなっています。

天然原子炉活動中に発生したセシウム135とセシウム137の量は、計算によって求まります(ほぼ同じ比率で生成します)ので、現在のバリウム同位体存在比を測定することによって、その場所にあったセシウムの動きを理解することができます(図6-9)。

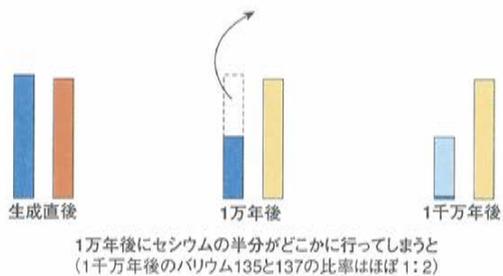
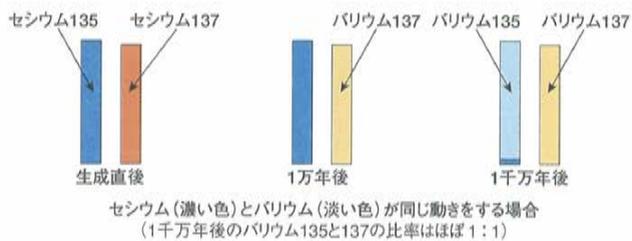


図6-9 セシウムの移動とバリウム135とバリウム137との比率

六一五 セシウムの動きについての研究

では、オクロ天然原子炉とその近くから採取された試料に関する、時代の異なる二つの研究に沿って、バリウムの同位体存在比とセシウムの動きを見ていきましょう。

(1) 研究1 (一九八一年発表) (xxiv)

この研究で用いられた試料は、採取場所によって三つに大別されます。それぞれの試料について測定した結果を、図6-10に示します。横軸はウラン235同位体存在比で、前述のとおり原子炉の影響がない場合は〇・七二〇二%です。縦軸はバリウム137に対するバリウム135の存在比で、同じく天然原子炉の影響がない場合は〇・五四三です。

グループI 天然原子炉内部から採取された試

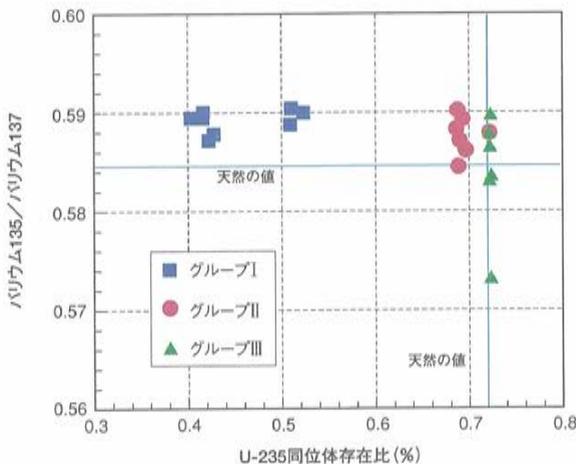


図6-10 バリウム137に対するバリウム135の存在比の分布 (xxiv)

料で、ウラン235が燃えたためにウラン235の同位体存在比が〇・七二〇二%よりかなり低くなっています。また、ウランが燃えた結果としてセシウムとバリウムができたため、縦軸のバリウムの同位体存在比も通常の値と異なります。

グループII 天然原子炉外周部分の試料で、ウラン235が少しだけ燃えており、ウラン235同位体存在比が天然の値よりやや低くなっています。一方バリウムの同位体存在比は、グループIと同程度です。

グループIII 天然原子炉から離れた部分で、ウラン235同位体存在比は天然の値であることから、ここではウラン235が燃えていません。したがって、セシウムとバリウムは生成されておらず、本来ならバリウムの同位体存在比は天然の値となるはずですが、**図6-10**から明らかのように、バリウムの同位体存在比は通常の値とかなり異なります。このことはセシウムとバリウムが原子炉から移動していることを示しています。

この研究の測定対象となったバリウムは、135も137も、天然原子炉の活動と無関係のバリウムと天然原子炉で生み出されたバリウムの両方を含んでいます。そこでもし、原子炉でできたバリウム135とバリウム137の量が分かれば、**図6-9**に示した考え方で、原子炉内部からセシ

ウムとして移動したか、バリウムとして移動したかを知ることができません。しかし、オクロ天然原子炉付近には天然のバリウムが多く存在しており、この研究が行われた当時の同位体組成分析技術では、この天然のバリウムと原子炉でできたバリウムとを正確に区別することができませんでした。そのため、「セシウムもしくはバリウムとして移動した」以上のことは明らかになりませんでした。

(2) 研究2 (一九九三年発表) (xxv)

天然に存在するバリウムにわずかに含まれるバリウム136は、原子炉の活動では生成されません。バリウム136の量を正確に測定できるようになると、天然のバリウム量と天然原子炉でできたバリウム量を知ることができるようになりました。

さらに、原子炉でできたバリウムのうち、セシウムの崩壊でできるバリウム135とバリウム137に加えて、原子炉内の反応で生成されるバリウム138 (バリウム135やバリウム137と異なり、セシウムの崩壊で作られるのではなく、はじめからバリウムとして生成されます) の量も測定できるようになりました。

このように、測定技術の進歩によって、天然原子炉の痕跡からより多くのことを知ることができるようになりました。

あわせて、八〇年代半ば以降、地下深くにあって風化していない天然原子炉 (図6-7のNo.10)

16) が発見され、改めてオクロ天然原子炉の研究が行われました。測定されたバリウム同位体存在比を図6-11に示します。縦軸はバリウム138を1とした場合の、バリウム135とバリウム137の値を示しています。つまり、この図からバリウム138を基にしたバリウム135とバリウム137の相対的な値を知ることができます。この図によると、原子炉内の反応により生成されたバリウム138に対して、セシウムの崩壊によって生じたバリウム135およびバリウム137の比が試料ごとに異なること、その一方で、個々の試料におけるバリウム135に対するバリウム137の比はほぼ同じであることが分かります。この結果からセシウムとバリウムの動きについて、次のような考察が行われました。

(a) どの試料も、バリウム135／バリウム137の比がほとんど同じこと

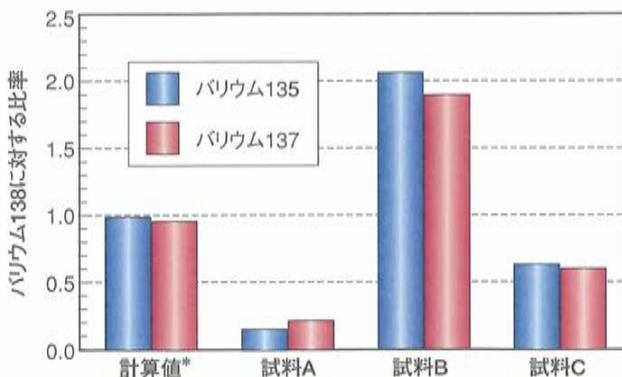


図6-11 詳細に測定されたバリウム試料^(xxv)

*計算値とは、原子炉で生まれたセシウムとバリウムが全く移動しないとして求められた値。

セシウム135の半減期は二三〇万年ですからバリウム135へ変化するには長い期間を要します。これに比べてセシウム137の半減期は三十年と短く、すぐにバリウム137へと変化してしまいます。また、セシウムとバリウムの化学的な性質を比較した場合、セシウムはバリウムよりも化学反応性に富むために地層中で異なる動きをとることが容易に考えられます。もしも、セシウム137の多くがバリウム137へと変化していて、まだセシウム135が盛んに放射性崩壊を繰り返している期間、すなわち天然原子炉停止後数十年から数百万年の間において、セシウムがバリウムとは異なる動きを示しながら地層中を移動していたとしたら、どうなるでしょう。セシウム137は、既にその多くがバリウム137へと変化していることから、**図6-9**に示されたように、バリウム135とバリウム137の比は、当初の比とは異なる値へと変わってしまうはずですが、**図6-11**のように各試料のバリウム135と137に大きな変化が認められないということは、少なくともこの間において、セシウムの状態で地層中を移動してはいないことを示唆していると考えられます。

(b) バリウム138に対してバリウム135・バリウム137の比が試料ごとに異なること

では、研究1で明らかにされていた「セシウムもしくはバリウムの移動があった」とするのは、天然原子炉停止後の数百万年以降と考えるべきなのでしょうか。この頃ですと、セシウム135およびセシウム137の多くは、それぞれバリウム135およびバリウム137へと変化しているはずですが、それまでにセシウムとバリウムの間で大きく動きが異なることがないとするなら

ば、バリウム138に対するバリウム135およびバリウム137の比は、**図6-11**の計算値に示すような比となると考えられます。ところが、実際には、試料ごとに異なった値を示しており、どうもこの考えとは矛盾したものであることが分かります。化学の教科書にもあるように、同じ元素の同位体どうしは、化学的には同じ性質を有しています。したがって、バリウムが地下水などに溶けて移動したとしても、同位体の比が大きく変化することは考えにくいことです。ということは、各試料におけるバリウム同位体比の値の違いは、バリウム135およびバリウム137がセシウム135およびセシウム137であった頃に地層中を移動し、その程度の違いが各試料のバリウム同位体比の値に反映されているのだと考えられます。

以上の(a)および(b)の考察をまとめると、実は、セシウムの移動は、原子炉の活動中もしくは停止後ただちに起きたのだということが推論できます。そして、各試料のバリウム135/バリウム137比が変わらないということは、何らかの理由によりとどまったセシウムは、その後、ほとんど移動することなく、長い期間を経てバリウムへと変化していったと考えられます。

一方で、この研究には、調査対象の天然原子炉領域は地下深くにあって、他の元素の多くは高い割合で残っていた(^{xxv}_{xxvi})のに対して、バリウムが残っている比率は六分の一に満たないことも示されています。

このことから、セシウムやバリウムは他の元素に比べて移動しやすい元素であるといえます。しかし、セシウムやバリウムの一部がその場所にとどまっていたことも事実です。それは、主としてこの

場所にアパタイトという、多くの金属を取り込んで放さない鉱物があったためと考えられています。

では、大部分のウランやプルトニウムはその場所にとどまったのに対して、なぜセシウムは天然原子炉から移動してしまったのでしょうか。

六―三で述べたように、ウランとプルトニウムがとどまった理由の一つは、ウラン鉱物の中に両元素が安定して存在したからでした。ところがセシウムは、ウランやプルトニウムとは大きさが異なるため、鉱物中に安定して存在できなかったのです。その結果、簡単に鉱物から地下水中に溶け出してしまったのです^(xix)。

ウランとプルトニウムの場合、仮に溶け出したとしても、天然原子炉が酸素の少ない地下深くにあったため、地下水にほとんど溶けない化合物となりました。しかしセシウムは、酸素が少ないところでも水に溶けやすいため、地下水中に溶け出しました。さらに、セシウムが移動したと考えられる時点では天然原子炉が活動していたために温度差によって地下水が大きく移動しており、この地下水の流れとともにセシウムは天然原子炉の外に運び出されたと考えられます^(xix)。

さてそれでは、高レベル放射性廃棄物の地層処分の場合はどうでしょうか。オクロ天然原子炉で見られたようなセシウムの移動、すなわち「地下水に溶けやすく、したがって地下水の流れによって移動しやすい放射性核種の移動」を長期間にわたって抑制する工夫がなされています。すなわち、**図6-1**に示した多重のバリアにより放射性核種の移動を抑制するという地層処分概念が考えられて

います。セシウムをはじめとする高レベル放射性廃棄物はガラスにより固化され、このガラス固化体は金属製の容器(オーバーパック)で覆われます。金属製のオーバーパックは地下水との接触により腐食する心配がありますが、腐食速度などを考慮してガラス固化体と地下水の接触を少なくとも千年間は遮断できるような設計が考えられています。一方、ガラス固化体のガラスは私たちの身の回りでありふれた材料ですが、ある意味においては実に特異な性質を持っており、大きさの異なる分子でもその内部に閉じ込めてしまいます。そして、ご存じの通りガラスは水に溶けにくいので、内部に閉じ込められたセシウムは、天然原子炉とは異なり、地下水に溶け出すまでにかかなりの時間を要します。

さらに、オーバーパックの周囲は「ベントナイト」と呼ばれる、水を非常に通しにくい天然の粘土を用いた緩衝材で覆われます。天然原子炉では地下水に溶けたセシウムが水の流れにより容易に移動しましたが、地層処分の場合には緩衝材があるために、たとえセシウムがガラス固化体から地下水に溶け出しても容易には移動しないこととなります。また、緩衝材には水に溶けている物質を吸着する性質があるため、天然原子炉においてセシウムの一部がアパタイトに取り込まれそこにとどまっていたように、緩衝材に吸着されとどまることとなります。結果として、セシウムのような地下水に溶けやすい放射性核種であっても地下の地層処分場内に長期にわたってとどまることとなります。オクロ天然原子炉の研究で確認された、セシウムが地層内で移動しやすいという事実は、地層処分場においては、セシウムの移動を適切に妨げる工夫がいかに大切であるかを示しており、実際にこのような研究から得られる知見は地層処分の考え方に反映されているのです。

おわりに

さて、オクロ天然原子炉をめぐるお話は以上です。みなさんは、「天然の原子炉」にどのような感想を持ったでしょうか？自然界に存在しないと考えられていた原子炉は、約四六億年にわたる地球史の中で間違いなく存在していたのです。

私たちは、天然原子炉の発生から消滅まで、いわば天然原子炉の一生を見てきました。さらに、天然原子炉が消滅した後の地層を調べることで、約二〇億年前に始まった原子炉活動で生じた元素の地層中でのふるまいの一端を知ることができました。

ウランやプルトニウムなど元素の多くは、オクロ天然原子炉が原子炉としての機能を失った後も、あまり大きくは移動せず、そこにとどまっていたことが分かりました。その理由は、これらの元素が鉱物中の成分として存在していたため安定した状態にあったと考えられるからです。また、これらの元素は、仮に鉱物から溶け出したとしても、地下深部の酸素の非常に少ない環境にあったため、地下水にほとんど溶けない化合物となったとも考えられています。

一方で、セシウムのように酸素が少ない環境でも地下水に溶けやすい元素は、天然原子炉の活動にともなう周囲との大きな温度差にも影響されて、地下水とともに

大きく移動したことが分かりました。地層処分システムの構築にとって、セシウム
の移動に配慮することの重要性を示唆しているといえるでしょう。

このように、天然原子炉を学ぶことが、現在の原子力発電所等からの廃棄物を処
分する上で、いかに重要な情報となる可能性を持っているかについてもご紹介して
きたわけです。

何ととっても、実験室での研究では、オクロサイトと同じだけの時間をかけて行
うことはとても不可能です。この意味においても、オクロ天然原子炉は「自然の実
験室」であり、地層処分を考える上で貴重な研究対象であることが分かります。私
たちが生きている地球の未来を考える上で、自然の歴史に学ぶことの重要性をお伝
えし、少しでも読者のみなさんの自然科学への興味を膨らませていただくことがで
きたら、また、私たちの将来にとって重要な問題である高レベル放射性廃棄物処分
について考えるきっかけとしていただけたらと願いつつ、本書のおわりにしたいと
思います。

謝辞

本書は多くの方々のご協力の下、オクロ天然原子炉に関する先行研究を集め、原子力を専門としない一般の方々の読みやすさにも配慮して、取りまとめたものです。

広島大学教授・日高洋氏には、オクロ天然原子炉研究の詳細な科学的内容について懇切丁寧に教授頂くとともに、本書の構成や内容に関して貴重なご意見を頂きました。

藤井勲氏には、オクロ天然原子炉に関する多くの貴重な情報を、快くご提供頂きました。

核燃料サイクル開発機構ならびに原子力発電環境整備機構の関係各位には、専門家の立場から数多くの貴重な技術的意見を頂戴しました。

ここに協力頂いた皆様のお名前を記して、感謝の意を表します。

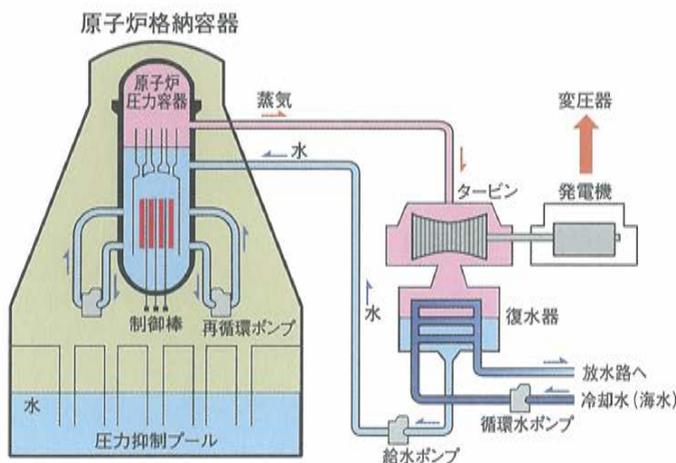
付録——原子力発電所

原子力発電所は下の図のようなシステムで、原子炉とは、ウラン等の核分裂性物質を燃料として、核分裂反応を維持させる装置です。

原子炉の中央に置かれる燃料は、耐熱性のよい二酸化ウランを焼き固めたペレットを、中性子を吸収することの少ないジルコニウム合金製の管の中に詰めたもので、この管を数十本束ねて一つの集合体とし、それを格子状に並べたもので炉心を構成しています。この炉心は原子炉压力容器の中に収められています。

炉心の燃料集合体の間には、カドミウム、ホウ素のような極めて中性子を吸収しやすい物質で作られた制御棒が挿入されており、この制御棒をゆっくり抜いていくと、炉心の核燃料中ではウラン235の核分裂連鎖反応が持続して、核分裂の数に応じた熱が発生します。

炉心は水中に置かれています。この水が冷却材となって燃料から発生する熱を奪い、自らは高温になって沸騰します。圧力の高くなった水蒸気は原子炉压力容器内の気水分離機を通ったのちタービンを回し、発電機を回転させる発電が行われます。タービンから出た水蒸気は海水などで冷却されて水に戻り、再び原子炉に送り込まれて炉心から熱を奪います。原子炉压力容器は原子炉格納容器の中に閉じ込められています。



原子力発電所のしくみ

出典

- (i) 『理科年表 平成17年版』(丸善) 三六〇—三六三頁、二〇〇四年
- (ii) P. K. Kuroda, "On the nuclear physical stability of the uranium minerals" *J.Chem. Phys.*, 25, 781, 1956
- (iii) P. K. Kuroda, "On the infinite multiplication constant and the age of the uranium minerals" *J.Chem. Phys.*, 25, 1295, 1956
- (iv) 黒田和夫「17億年前の原子炉 核宇宙化学の最前線」(講談社) 一九八八年
- (v) 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』四三九号) 三〇—三九頁、一九九一年
- (vi) 藤井勲『天然原子炉』(東京大学出版会) 一九八五年
- (vii) 日高洋「オクロ鉱床によるナチュラル・アナログ研究の現状と展望」(『地球化学』二八号) 一四三—一五四頁、一九九四年
- (viii) 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) 二八—四八頁、一九八五年
- (ix) 『原子力ポケットブック2004年版』(社団法人 日本原子力産業会議) 一八五頁、二〇〇四年
- (x) 日高洋「オクロ天然原子炉の地球化学的特徴と核化学的特性」(『JAERI-Conf』97-009) 一九九七年
- (xi) 電気事業連合会のホームページ、http://www.fepc-atomic.jp/basic_study/plut/
- (xii) 核燃料サイクル開発機構「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術の信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—」(JNC-TN1400 99-020) 一九九九年
- (iv) Svensk Kärnbränslehantering AB, "Processes in the repository evolution.", Background report to SR 97, SKB TR-99-07, 1999
- (iv) Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, "Project Opalinus Clay: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste", NTB 02-05, 2002

- (x) M. Benedict, "Nuclear Chemical Engineering", McGraw-Hill, series in nuclear engineering, 1981
- (xi) A.G. Croff, "ORIGEN2 – A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code", ORNL-5621, Oak Ridge National Laboratory, 1980
- (xii) H. Hidaka, P. Holliger, "Geochemical and neutronic characteristics of the natural fossil fission reactors at Oklo and Bangombé (Gabon)", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.62, pp.89–108, 1998
- (xiii) H. Hidaka, "Isotopic study of natural fission reactors at Oklo and Bangombé, Gabon", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 239, No. 1, pp.53–58, 1999
- (xiv) D. G. Brookins, "Radionuclide Behavior at the Oklo Nuclear Reactor, Gabon", *Waste Management*, Vol. 10, pp.285–296, 1990
- (xv) D・G・ブルッキンズ「放射性廃棄物処分の基礎へ地球化学的アプローチ」(現代工学社) 一九八七年
- (xvi) R. Bros, et al., "Occurrence of naturally enriched ^{235}U : Implications for plutonium behaviour in natural environments", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.57, pp.1351–1356, 1993
- (xvii) K. Horie, H. Hidaka, F. Gauthier-Lafaye, "Isotopic evidence for trapped fissionogenic REE and nucleogenic Pu in apatite and Pb evolution at the Oklo natural reactor", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 68, pp.115–125, 2004
- (xviii) 日高洋「地層処分に関わる天然類似現象とその観察 20億年前の原子炉」(電気評論 1999-9) 一八一―二二頁、一九九九年
- (xix) D. G. Brookins, "Alkali and Alkaline Earth Element Studies at Oklo", *Waste Management*, pp.275–282, 1981
- (xx) H. Hidaka, P. Holliger, A. Masuda, "Evidence of fissionogenic Cs estimated from Ba isotopic deviations in an Oklo natural reactor zone", *Earth and Planetary Science Letters*, 114, pp.391–396, 1993
- (xxi) H. Hidaka, F. Gauthier-Lafaye, "Redistribution of fissionogenic and non-fissionogenic REE, Th and U in and around natural fission reactors at Oklo and Bangombé, Gabon", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.64, pp.2093–2108, 2000

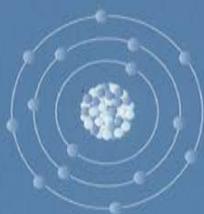
この小冊子は、経済産業省資源エネルギー庁の委託により（財）原子力環境整備促進・資金管理センターが制作したものです。

発行日 2005年3月

編集・発行 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

〒105-0001 東京都港区虎ノ門2-8-10（第15森ビル4F）

TEL：03-3504-1081（代表） <http://www.rwmc.or.jp>



自然が生み出した原子炉

——その誕生から消滅まで&地層処分へのヒント

編集・発行 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

〒105-0001 東京都港区虎ノ門2-8-10 (第15森ビル4F)

TEL : 03-3504-1081 (代表) <http://www.rwmc.or.jp>
