

中央カザフスタン、クズイルタウ-マッシフの花崗岩質岩石中のウ  
ランとトリウムの地球化学によせて\*

V.I. Baranov, Du Le-Tian

黒田 吉 益 訳

1. 花崗岩質マッシフ中のウランとトリウムの分布の規則性

クズイルタウ-マッシフは約 600 km<sup>2</sup>の広さを占めている。それはサルイタウ-マッシフと接しているが、両者とも巨大なプルトンのドームと考えられている。まわりの地層は、主として、下部原生界のポーフィロイドや珪岩からなっている。時代は二疊紀とされている。この地域には、この二疊紀のコンプレックスのほかに、東部の方に、カレドニヤ期と考えられているより古いコンプレックスもある。このコンプレックスはあまり広くなくて、全体のマッシフの6%である。岩石は閃緑岩・花崗閃緑岩などである。

クズイルタウ花崗岩は全マッシフの94%を占めており、優白質で assimilation はみられない。進入の全 phase にわたって鉱物組成も化学組成も一様である。それは、粒度とか斑状組織の程度とかのみで、お互いに区別される。組織の多様性が生じているのは、マッシフが浅いところで形成されたことと関係している。

マッシフの形成機構を、E.V. ネグレイ etc. は多相 (phase) と考えた(1)。この問題については、とくにしらべなかつたが、やはり若干の phase があり、各 phase の花崗岩の間はシャープな接触関係である。個々の phase の岩石の位置は、構造線やマグマが固化する時に生じた裂か系に支配されている。個々の phase の区分は、V.S. コプテフードロフニコフの方法で行なわれた：

- 1) 主進入相 (phase) 訳注) の花崗岩。粗粒 (C/gr), ばら色ないし灰色、わずかに斑状；
- 2) 副次的相 (phase) 訳注) の花崗岩。中粒 (M/gr)。2つの時期のものがあり、第1期のものは優白質で、第2期のものはアラスカイト質である。第1期のものには、はっきりした斑状組織をもったものと、等粒状のものとの2種類がある。

副次的相の第1期のものの形成時期は主進入相に近い。それは急冷帯が狭いか、欠除していることから証明される；

- 3) 脈状花崗岩。このグループには時期的におくれたものが入る：細粒 (F/gr), 灰色の低角度に傾斜した岩体、ばら色のアプライト質花崗岩の急傾斜した岩体やベグマタイト類。

細粒 (F/gr) 花崗岩には、等粒状と斑状の2つの組織をもったものがある。アプライト質花崗岩の組成と組織は F/gr 花崗岩と同じである。2つとも、他の phase の岩石に較べて、副成分鉱物と黒雲母がたいへん少ない。

上述の花崗岩中では、副次的進入相の第1期中粒花崗岩が指導的な役割を果たしている。それは全マッシフの約70%の広さを占めている。細粒花崗岩(脈状の)は21%、主進入相の細粒

\* В. И. Баранов, Ду Ле-Тянь : К геохимии урана и тория в гранитных породах Кызылтауского массива (Центральный Казахстан), Геохимия, No.12, p.1059~1067, 1961.

訳注) Obviously intrusive phase を主進入相とし、дополнительная интрузивная фаза を副次的進入相としたが、後述のように“副次的……”とした方が分布が広くて、主進入相とした方がよさそうである。

花崗岩は3%である。副次的進入相の第2期の花崗岩の分布は小さくて、マグマの分化物中のウランやトリウムをしらべる時にもあまり研究されなかった。サンプルは普通2~3kgのものをとった。

ウランとトリウムはクラシカルな放射化学的な方法で定量された。えられた結果から次のようなことを指摘することができる。

1) 花崗岩の各 phase の分布範囲を考慮すると、クズイルタウ-マッシュフのウランとトリウムの平均含有量は、それぞれ  $6.9 \cdot 10^{-4}\%$  と  $3.1 \cdot 10^{-3}\%$  となる。平均の Th/U 比は4.5となる。これを花崗質岩石全体の平均値 (A.P. ヴィノグラドフ(2)のデータ) に較べると、ウランは2倍以上、トリウムは約2倍多い。

2) ウランの量は、一般的にいて、マグマの早期の phase から晩期の phase にかけて増加する傾向にある。これは第1表と第1図によく現わされている。

3) マグマの分化作用の過程でウランがだんだん増加するのと反対に、トリウムはだんだん減少する。火成作用において似たような関係を示す2つの元素にとって、これはたいせつな違いである。またウランの量がかなり広い範囲にわたって変動するのに、いろいろの phase 中でもトリウムの量はほとんど一定であることも注意する必要がある (第2図)。ウランとトリウムのこの違いは、火成作用の過程における両元素の移動能力の違いによるものである。

岩石中の黒雲母や副成分鉱物とトリウムの量の間には、明らかな対応関係がみられることも注意される (第2表)。

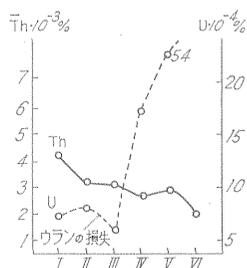
花崗岩中の各鉱物についてはトリウムの定量を行なわなかった。しかし、上述のデータから考えて、岩石中のトリウムの減少は、黒雲母・磁鉄鉱・モナズ石・燐灰石・ウラントリウム石の量の減少と関係があるということは、間接的に推定できる。このことから、マグマの分化作用の中でトリウムが定着するのは、若干の元素の存在と関係があると考えることができる。その元素としては、とくに燐がある。トリウムは燐とむすびについて、しっかりした燐酸塩化合物の形で容易に定着される。

花崗質マグマの連続的な分化作用の産物中で、トリウムの量がだんだんに減少することは、

第1表 クズイルタウ花崗岩中のウランとトリウム

進入の phase		U $n \cdot 10^{-4}\%$	Th $n \cdot 10^{-3}\%$	Th/U
カレドニヤ期の花崗閃緑岩(3*)		5.1	1.9	3.7
二疊紀の花崗岩類	主 進 入 相 C/gr 花崗岩(7)	7.2	4.2	5.8
	副次的進入相第1期 M/gr 花崗岩(22)	8.1	3.2	4.0
	脈 岩 類 F/gr 花崗岩(21)	5.9	3.1	5.3
	ア プ ラ イ ト(5)	17.1	2.7	1.6
	ベグマタイト(3)	54.0	2.9	0.5

\* ( )内の数字はサンプルの数



I—主進入相, II—副次的進入相第1期,  
III—副次的岩体細粒花崗岩, IV—急傾斜のア  
プライト岩体, V—ベグマタイト, VI—熱水  
性の産物。

第1図 各 phase の花崗岩中のウランの含有量の変化。



ないことと、岩石中の副成分鉱物の量が少ないことによって説明されるであろう。

5) 花崗岩中のウランとトリウムとの量と岩石の構造とは明らかな関係がある。それらの量は等粒状やわずかに斑状構造を示すものよりも、斑状構造の著しいものの方に多い。そのデータは第4表にある。

第4表 花崗岩の構造の違いによる平均含有量

岩石中の含有量 (%)	副次的侵入岩相第1期		脈状の F/gr 花崗岩	
	1*	2	1	2
U·10 <sup>-4</sup>	9.3	7.6	3.1	3.2
Th·10 <sup>-3</sup>	7.2	5.9	3.9	2.9

\* 1—斑状構造をもつたもの; 2—等粒状のもの。

6) ウランとトリウムの分布は facies については変化が少ない。もし、なんらかの変化があるとして論じるならば、マッシフの中央部 (main facies) からその縁辺部に向かって両方ともわずかに増えるということができる。

まわりの岩石中 (片麻岩) のこれらの元素の量は、花崗岩中と較べて低い、岩石の変成度によらず一定であり、ウランが 6.3·10<sup>-4</sup>%, トリウムが 2.1·10<sup>-3</sup>% (5個のサンプルの平均値) である。このことは、マグマが現在の位置を占めるにあたって、マッシフの内から外へ、揮発性成分や移動しやすい成分の拡散、またはそれと似たような形での移動が起こらなかったことを示すと考えられる。これは、マッシフ中で assimilation がわずかしか発達していないことと対応する。

## 2. 花崗質岩石の鉱物ごとのウランの分布

すでに述べたように、各 phase, facies のウランの量はかなり変動するが (第2図)、脈状の細粒花崗岩中ではその平均含有量が下がる。岩石中のウランの量の変動の原因を明らかにするためには、岩石を構成している鉱物ごとのウランの分布を調べることがどうしても必要である。

花崗岩中の鉱物ごとのウランの分布についてのデータはあまり多くない。最近の文献中に若干系統的なものがみられるだけである (8—11, 14, 16)。

マッシフの各侵入相 (phase) の岩石ごとに、鉱物中のウランの分布が研究された。21個のサンプルから鉱物を分離した。分離は磁石・電磁石・重液 (プロロホルム・ヨードメチレン)、それから双眼顕微鏡下での handpicking によって行なわれた。鉱物組成の計算は薄片によって行なった。ウランはルミネセンス法によって測定した (15)。高放射性の副成分鉱物は、直接的な remelting 法による微量分析を適用した (0.3~2.0 mg)。

えられたデータから、クズイルタウ花崗岩中の鉱物ごとのウラン分布の特徴を次のようにまとめることができる。

1) 岩石のウランの大部分は副成分鉱物中に含まれる (平均67%。造岩鉱物中には33%)。

第5表から明らかなように、副成分鉱物に含まれるウランと造岩鉱物中に含まれるウランの

第5表 3つのおもな phase の岩石の平均値

phase	サンプルの数	造岩鉱物中の U <sub>r</sub> (%)	副成分鉱物中の U <sub>a</sub> (%)	U <sub>a</sub> /U <sub>r</sub>
主侵入相 C/gr	3	16.5	83.5	5.1
副次的相 M/gr	8	31.8	68.2	2.2
岩脈 F/gr アプライト	8	43.4 *	56.6	1.3

%の違い,  $U_a/U_r$  は岩石の粒度, すなわち, マグマの結晶作用の速度に関係がある。より細粒の岩石, それはマグマからの結晶作用の速度が早かったものと考えられるが, その場合にはマグマの中にあったウランのかなりの量を, 造岩鉱物がとりこんでいる。しかし, より粗粒の岩石の造岩鉱物は, 岩石中のウランの一部しかとりこんでなくて, 大部分は副成分鉱物がもっている。

2) 造岩鉱物中のウランの存在形式は, かなり多くの研究者によって論議されている (9—14, 17—20)。多くの形が提案されているにもかかわらず, 無色鉱物へのウランの定着の機構は, みんな機械的な捕獲ということになっている。結局, 他の過程, たとえば, epigenetic な, とくに花崗岩自身の自変成作用による二次的な付加というような定着の可能性はかえりみられていない。もしも, そのようなものだとすると, melt から機械的に捕獲してきたウランの量は, 結晶作用に近い条件の時の, それらの鉱物をつくるもととなった melt に含まれていたウランの量によってきまってしまうことになる。粗粒, 中粒の花崗岩は連続的に進入してきたものであるが, それらの中のウランのもともとの量はほとんど同じであった (それらはそれぞれ平均  $7.2 \cdot 10^{-4}$ ,  $8.1 \cdot 10^{-4}$ % であったと考えられる。), そして, それらの多くのサンプルから分離された無色造岩鉱物中のウランの量がほとんど変化がないということはたいへん面白い事実である。データは第6表にあげてある。

第 6 表 各 phase の石英と長石中のウランの量

サンプル No.	C/gr 花崗岩			M/gr 花崗岩		
	75	53	79	86	91	93
$n \cdot 10^4\%$	1.6	1.0	1.7	1.8	1.6	1.2

上述のことから, 無色鉱物, 石英や長石中のウランの量は, その鉱物を析出した melt のウランの濃度をある程度反映するということが考えられる。

3) 無色造岩鉱物中のウランの量が, 各 phase ごとにあまり変動がないのであるから, これら花崗岩サンプルのウラン含有量の大きな変動の原因は副成分鉱物にあると考えられる。換言すれば, 似たような条件下で形成された花崗質岩石中のウランの量はおそらくトリウムもそうであろうが, 主として岩石中の副成分鉱物の量と, その鉱物自体の中のウランの量によってきまる。若干の脈のまわりの花崗岩をのぞいて, 黒雲母中にウランが多いことは, radiograph にも示されるように, その中に, いろいろの高放射能鉱物 (ジルコン・ウラントリウム石・モナズ石・燐灰石・螢石) の小さい包有物を含むことによるものであることは強調しなければならない。

若干の具体的な例についてさらに詳しく述べよう。

a) もしも, ある phase の花崗岩のサンプルについて, 無色造岩鉱物中のウランの量は同じであるが, 岩石全体のウランの量が違うという場合には, 副成分鉱物中のウランの分布が違っている (第7表)。

上述のデータから, サンプル No. 91 と No. 86 とは無色造岩鉱物中のウランの量はほとんど同じであるが, 岩石中のウランの量は, それぞれ  $9.0 \cdot 10^{-4}$ % と  $16.5 \cdot 10^{-4}$ % で違うことがわかる。褐れん石・燐灰石・ジルコン・黒雲母中のウランの量が大きく変動することが, 岩石と副成分鉱物中のウランの量が相互関係にあることを示している。

b) いろいろの花崗岩中の黒雲母や副成分鉱物中のウランの量をしらべると, その中のある鉱物中のウランの量は, 主進入相の岩石から副次的進入相の岩石にかけては増加し, 副次的進入相から脈状岩へかけては減少することがわかる。各副成分鉱物の  $U_M$  岩石中のウランに対する%もまた同様である。そのデータは第8表にあげてある。

第7表 副次的進入相第1期の M/gr 花崗岩の2つのサンプルの各鉱物ごとのウランの含有量の比較

鉱物	鉱物中のウランの量, $n \cdot 10^{-4}\%$		岩石中のウランに対する鉱物中のウラン ( $U_M$ ) の割合 (%)	
	サンプル No. 91	サンプル No. 86	サンプル No. 91	サンプル No. 86
石英+カリ長石 +斜長石	1.6	1.8	17.2	11.0
黒雲母	30	270	5.6	19.6
磁鉄鉱	21	32	2.3	0.8
ジルコン	3300	4300	3.9	1.0
モナズ石	2930	2600	1.3	4.2
褐れん石	4%	17.9%*	44.5	54.0
燐灰石	125	650	0.1	0.2
ウラントリウム石	1.3%		2.2	
total			77.1	90.8

\*radiograph によると、非常に細かい閃ウラン鉱、あるいはそれと似た高放射性の鉱物が褐れん石と伴っていることが示されている。

第8表 各 phase の花崗岩中の鉱物のウランの平均含有量の変化と  $U_M$  の値

鉱物	主進入相の花崗岩(3)		副次的進入相第1期(6)		脈状花崗岩	
	ウラン含有量	$U_M$	ウラン含有量	$U_M$	ウラン含有量	$U_M$
褐れん石	3.8%	30.7	3.3%	32.6	2.8%	23.5
黒雲母	28	1.5	145	9.1	84	4.2
ジルコン	2570	6.2	3720	5.9	2170	1.5
ウラントリウム石	0.5%	0.4	5.7%	5.0	0.6%	0.4
モナズ石	1630	1.0	3200	1.5	3232	0.7
磁鉄鉱	13	1.0	26	1.5	23	0.8
螢石	16	0.1	36	0.1	13	0.1
燐灰石	160	0.1	279	0.1	—	0.4

備考: 褐れん石とウラントリウム石以外は  $n \cdot 10^{-4}\%$  である。

第9表 いろいろの花崗岩中の黒雲母や副成分鉱物中のウランの含有量の変動

副成分鉱物	鉱物中のウラン含有量のインターバル (%)		副成分鉱物	鉱物中のウラン含有量のインターバル (%)	
	平均値 (%)	平均値 (%)		平均値 (%)	平均値 (%)
ウラントリウム石	0.5—13.8	3.8(6)	スフェン	0.019	0.019(1)
褐れん石	1.3—5.4	3.2(15)	黒雲母	$9 \cdot 10^{-4}$ — $3 \cdot 10^{-2}$	0.01(14)
ジルコン	0.16—1.4	0.36(17)	螢石	$3 \cdot 10^{-4}$ — $4 \cdot 10^{-2}$	0.0045(20)
モナズ石	0.1—0.88	0.31(17)	磁鉄鉱	$3 \cdot 10^{-4}$ — $2 \cdot 10^{-2}$	0.004(20)
燐灰石	0.009—0.07	0.02(8)			

備考: ( )中の数字はサンプルの数。閃ウラン鉱は量が少ないのでしらべなかった。

脈状の F/gr 花崗岩のウラン含有量は異常に低いことを先に指摘した。鉱物ごとのウランの分布をしらべると、それは黒雲母や副成分鉱物中のウランの量が少ないことと、それらの鉱物自体も少ないことによっていることがわかる。それは、また、それらの岩石の形成期に移動しやす成分や揮発性成分の損失を証明するものである。

4) いろいろの花崗岩中の黒雲母や全副成分鉱物中のウランの量をしらべると、それが1つの

第 10 表 ウランの分布のバランスにおける各副成分鉱物の役割

鉱物	U <sub>M</sub> の量のイン ターバル (%)	平均値 (%)	鉱物	U <sub>M</sub> の量のイン ターバル (%)	平均値 (%)
褐れん石	14.8—48	30(15)	モナズ石	0.1—4.2	1.2(17)
黒雲母	0.3—19.6	7(14)	磁鉄鉱	0.1—3.6	1.2(20)
ジルコン	0.2—15.9	4.7(17)	螢石	0.1	0.1(20)
ウラントリウム石	0.4—14.7	3.5(6)	燐灰石	0.1	0.1(8)

備考：( )内の数字はサンプルの数。

鉱物中でも、鉱物間でも一定していないことがわかる (第 9 表)。

すでに注意したように、岩石を構成する鉱物中のウランのバランスシートの中で、ある鉱物が果す役割は、その鉱物自体の中のウランの量だけでなく、岩石中に含まれているその鉱物の量にもよる。第 10 表から明らかのように、全 phase の花崗岩を通じて、ウランのおもな濃集は褐れん石で、ある場合には、ジルコン・黒雲母・ウラントリウム石である。磁鉄鉱・螢石・燐灰石、さらにはモナズ石・スフェンでさえも大きな役割を果すことはできない (第 10 表)。

上述のことを総括して、鉱物中のウランの分布について、次のような結論をすることができる。

1) 花崗岩中のウランの量 (多分トリウムについてもいえることであろう) とその構成鉱物中のウランの量は明らかに相互関係をもっている。これらの鉱物は 3 つのグループに分けられる：無色造岩鉱物、副成分鉱物、黒雲母である。最初の 2 つは多くの点で区別される。とくに、形成時期、ウランの定着する機構、岩石中のウランの分布に果す役割において違ふし、また、放射性元素の存在形態、混合元素の関係においても違っている。黒雲母はその中間的な傾向を示す。

2) ある phase の花崗岩中のウラン含有量の変動は、もっぱら、副成分鉱物、黒雲母中のウランの濃集の程度と、脈のまわりでも未変質岩石中では、その中のこれらの鉱物の量によてきまる。

3) 花崗岩中のウランの大部分は、それが造岩鉱物中にあるにせよ、また副成分鉱物中にあるにせよ、その岩石の形成条件、とくにその岩石をつくるマグマの結晶作用の速度に一番関係をもっている。調査した花崗岩類の副成分鉱物の中では、褐れん石が大きな役割を果してきた。それは岩石のウランの、平均して 30% を占めていた。

#### 文 献

- 1) E. B. Негрей, В. А. Павлов. Геология и петрография гранитных интрузий Сарытау и Кызылтау Ин-т геол. рудных месторождений, петрографий, минералогии, геохимии, АН СССР, 1956—1959.
- 2) А. П. Виноградов. Геохимия, No. 1, 1956.
- 3) А. П. Крылов. Геохимия, No. 3, 1958.
- 4) И. И. Абрамович. Геохимия, No. 4, 1959.
- 5) М. С. Филиппов, Л. В. Комлев. Геохимия, No. 5, 1959.
- 6) С. Д. Туровский. Геохимия, No. 2, 1957.
- 7) А. А. Смыслов. Геохимия, No. 3, 1958.
- 8) E. C. Ларсен, Ж. Фэйр. Распределение урана и тория в интрузивных породах. Ядерная геология. Изд-во иностр. лит., 1956.
- 9) E. C. Ларсен, Ж. Фэйр, Д. Готтфрид, В. Л. Смит, Докл. иностр. ученых на Международн. конф. по мирному исполъз. атомн. энергии. Геология атомных сырьевых

материалов, 1956.

- 10) Л.В.Таусон, Б.И.Злобин, Л.Л.Леорова. Геохимия, No. 7, 1956.
- 11) Л.В.Таусон. Геохимия, No. 3, 1956.
- 12) Л.Л.Леорова, Л.В.Таусон. Геохимия, No. 7, 1958.
- 13) J.W.Rogers John and A.S.Adams John. Autoradiography of Volcanic Rocks of Mount Lassen. Science **125**, No.3258, 1957.
- 14) И.Г.Ченцов. Вопросы геохимии, Тр. Ин-та геол. рудных месторождений, петрографии, минералогии, геохимии, вып. 28, 1959.
- 15) Л.Л.Леорова. Геохимия, No. 8, 1956.
- 16) A.S.Adams, J.Kenneth, John Asmond, Rogers. Geochemistry of the uranium and thorium. Physics and Chemistry of the Earth 3, 1959.
- 17) И.Е.Старик, К.Ф.Лазарев. Радиохимия, No. 1, 1959.
- 18) Дж.И.Нейерберг. Уран в изверженных породах в США. Докл. иностр. ученых на Междунар. конф. по мирному исполъз. атомн. энергии. Геология атомных сырьевых материалов, 1956.
- 19) В.И.Герасимовский. Атомная энергия, т. III, 12, 1957.
- 20) А.Я.Крылов, Л.Я.Атрашенок. Геохимия, No. 3, 1959.