

## ウラン鉱床の探査法について\*

V. G. Melkov

小 西 善 治 訳

本論文はソ連におけるウラン鉱床の探査法の要諦である。地質学的にウラン鉱床の賦存地域を決めるのには、まず有望な地域を区別するとともに、探査の遂行順位を決めるために有望の度合を決めることである。賦存地域を区別するには、まず後火成作用に伴なう有望な鉱床型の賦存する地帯および堆積源の鉱床の賦存する有望な古期堆積盆地を識別することが必要である。

後火成作用に伴なうウラン鉱床は、原生代・カレドニア運動期・ヴァリスカン運動期・ラミド変革期ならびにアルプス造山運動期に形成された複雑な褶曲構造帯に賦存している。そのほかに熱水性ウラン鉱床は、次のような特性の発達している地帯に賦存していることが考えられる。

(1) 大規模な破砕帯 種々型をとつて、回春—消滅—回春が繰り返された多数の潜在裂縫の発達する地帯

(2) 花崗岩質岩漿の小規模の半深成貫入岩体。地表に近く進入する貫入岩体および地表流出、これらの岩石類は1つの岩漿溜から分化生成されたものである。

(3) 多数の岩脈、特に輝緑岩質岩脈<sup>註1)</sup> 岩脈の発達している地帯 古期堆積盆地で有望な地帯を識別するためには、次の点を考慮に入れる必要がある。すなわちウラン鉱床は、すでに原生代の地層から始まつて古生代の地層（特にオルドヴィス系・石炭系・2層系）、中生代の地層（三層系・ジュラ系・白堊系）および新生代の地層（特に古第三系）中に賦存している。さらに堆積性型のウラン鉱床の賦存している可能性のある岩相としては次のものが考えられる。

1) 陸源性岩相(潟成岩相・潟・湖成岩相) 石炭および砂岩で代表される。

2) 頻海の浅水成岩相(海進期に生成されたもの) 砂岩・有機源石灰岩・磷灰土・有機物質に富み、しばしば磷を含む粘土、ときにはヴェナジウム・硫黄・弗素・モリブデン・鉄・バリコン・ストロンチウム稀土類、まれではあるがニッケル・コバルト・亜鉛・鉛・クロム・ジルコニウム・ハフニウムおよびスカンジウムを含む粘土で代表される。

このような岩相には、次のような場合にウランが濃集してくるようである。すなわち岩石の化学的浸蝕分解が物理的浸蝕に較べて著しく卓越するような乾燥気候のもとで、準平原化と海蝕準平原化作用とが働いた乾陸地帯に、含ウラン鉱床が賦存する傾向がある。

堆積性ウラン鉱床のこのような著しい賦存条件は、ウランの物理、化学的性質と全く一致している。6価のウランは、酸性および中性の自然水にウランイオン ( $UO_2^{2+}$ ) の形で溶解するが、アルカリ水中に炭酸塩ウラニル、錯化合物の形で溶存している。第1型のものでは水から直接、第2型のものでは錯化合物が破壊 (pH 値が一時下がった場合) されてから、ウランは種々の吸着剤 (有機物質・炭素質物質等) およびおそらく磷酸塩で抽出される。アルカリ水から生じるウランは、6価のウランに比較して還元過程の影響を蒙つて4価の状態に沈澱する ( $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ ,  $OH^{-} + HS^{-} \rightarrow S^0 + H_2O$  等)。溶液から抽出された6価のウランは4価の状態に移行する。

著者はウランの探査には、まず第一にウラン鉱床地区および好都合な岩相のみられる堆積盆地の浸蝕度合を考慮することが必要であると述べている。さらに有望な地区は、含ウラン層が完全に削剝されないで、比較的低下の浸蝕を受けている地区である。そのほかに、堆積層にあつては、褶曲構造の特性と変成作用の度合、すなわち、(1) 含ウラン層準の賦存状態の変化 (2) 変化に伴なうウランの再分布と再配置 (3) 鉱化作用を受けている岩石の本質的な変化 (再結晶作用、圧砕作用等による) を研究すべきである。

著者は次にウラン探査の地質的基礎について述べている。こゝではまず、 $\alpha$  線、 $\beta$  線、 $\gamma$  線以外に、紫外線で蛍光

\* 原子エネルギー 第1号

註 1) オフィテイツク構造の完晶質石基と斜長石・輝石の斑晶を伴う輝石斑岩をいう。

を發するウラニル化合物の特性を利用すべきであると述べている。さらに鉍床地区の酸化帯の上部に、いわゆる拡散塩類變成帯 (salt aureole) を形成するウランとウラン系列の放射性元素 (イオニウム・ラジウム・ラドン<sup>註1)</sup>) の特性も利用すべきである。これらの放射性元素はγ線の強度を高めるからである。この種變成帯は化学的浸蝕が卓越している地域では広範囲に分布している。著者は探査にあたっては、ラドン・ラジウム・イオニウムは地下水中に溶存して鉍床地帯外に分布していることに注目すべきであると述べている。

物理的浸蝕の卓越している地域や、珪化初成ウラン鉍石が賦存している地域では、初成鉍石が相当広範囲にわたって機械的變成帯、主として瀝青ウラン鉍からなる沖積性砂鉍床および原地砂礫鉍床を形成していることがある。

著者はさらに放射能異常地帯を調査するにあたっては、既知のウラン鉍床型の特性を特色づけている鉍化作用の分布の規則性、浸蝕地帯におけるウランの挙動等について知ることが必要であると述べている。

この規則性は後火山作用によつて生成された鉍床型に適用できると述べて、規則性をあげている [こゝでは Davidit (ウランを7%含むチタン鉄鉍) を含む鉍床については省略する]。

(1) 後火山作用で生成されたウラン鉍床は、岩漿分化作用の晩期のメンバーに属する花崗岩漿と密接な関連がある。その化学的成分としては、シリカと揮発成分とに富み、アルカリは比較的少なく、マグネシウム・鉄・カルシウムは著しく低い。

(2) 含ウラン鉍床は、大規模な破砕帯に賦存していないが、このような地体構造を形成した広域地塊運動に伴なつて形成された引張裂罅中にみられる。これらの裂罅を充填するウラン鉍脈は、ときにブランチを出し、彎曲し、火成岩脈・石英脈または不毛岩脈で切られている。しかしときには、その母岩は酸化鉄 (block 状をなす) で著しく汚染されていることがある。ウラン鉍床は、広域破砕帯がブランチを出している箇所分布しているようである。ウラン鉍床が賦存する裂罅の特性は、多重回春性 (multiple-rejuvenation) を示している (スミルノフによつて唱えられた鉍床成因説で、詳細はソ連地質文献訳集で刊行予定)。

(3) ウランは、剛性岩石中に主として發達した構造性裂罅中に濃集する傾向がある。すなわち種々の變成岩 (結晶片岩・片麻岩・珪岩・角岩等) ・花崗岩・花崗閃緑岩・酸性火山岩等中に胚胎する傾向をもっている。ウランの賦存に最も好都合な地帯は、變成岩系または著しく變成作用を受けている岩石の發達している地帯であつて、特にそのなかでも2価の鉄族鉍物に富む地帯、例えば緑泥石族および角閃石族中で鉄分の含有量の高い変種および磁鉄鉍等である。

貫入岩体・火山岩・火山碎屑岩中ではウランが大規模に集中している地帯は、粘土化作用、緑泥石化作用、滑石化作用、葉織石化作用 (pyrophyllitization) のような熱水変質作用の行われている地帯である。さらに塩基性組成の火成岩岩脈 (輝緑岩質功岩型) の盤肌中にみられる粘土質の薄層中にもウランは濃積する傾向がある。

広域變成作用を受けていないが、きわめて低度の變成作用を蒙っている普通の堆積層中では、後火成作用に基づくウラン鉍床はまだ発見されていない。例外としては、これらの地帯でも、“剛性岩石”に隣接する地帯では、ときにはウラン鉍床が賦存していることがある。

著者は、ウラン鉍床が1回性のものでなく、数階梯、数段階にわたつて脈動的に生成過程が繰り返されて生成されたと述べている。すなわち鉍床の生成は気成階梯に始まつて後熱水階梯 (post-thermal stage) に終り、その生成はほとんど6階梯以上にわたっている。各階梯は、新しい曳裂性擾乱の出現と既潜在裂罅の回春で識別される。さらに著者によれば鉍床生成の初期階梯には、交代作用 (曹長石化作用等) が働き、孔隙、溶解性空隙が生成されることが知られている。

ウラン鉍床の生成は、最晩期の晶出階梯と普通関連性をもち、時間的にもまた空間的にも特異な型をとる。ウラン階梯には、比較的少量的であるが特徴的な共生元素が出現する。主要な定常共生元素は酸素・珪素・鉄である。定常的には出現しないが、多量に出会する共生元素は、炭素・カルシウム・弗素、次に少量であるが、マグネシウム・アルミニウム・硫黄・稀土類さらに出現頻度が劣るが、砒素・亜鉛・鉛・銅を伴なっている。

種々の条件下でこれらの共生元素<sup>註2)</sup> が集つて主要な鉍物の様々な共生関係が形成される。例えば瀝青ウラン鉍+シリカ (メタコロイド) 型、瀝青ウラン鉍+石英+赤鉄鉍型、瀝青ウラン+石英+方解石または白雲石型、瀝青ウラン+緑泥石型 (塊緑泥石型と月柱石型)、ときには瀝青ウラン+螢石+方解石+その他の鉍物型、この主要鉍物型以外に少量の黄鉄鉍・閃亜鉛鉍・方鉛鉍・硫砒鉄鉍・硫砒銅鉍等が生成される。稀土類、ときには方鉛鉍・アルミニウム・珪素およびある種の他の元素は、独立の鉍物を形成しないで、瀝青ウランのメタコロイド系の組成中に含まれ

ている。

さらに著者はウラン階梯には上述の鉱物型以外に多様な含ウラン鉱石型が生成されると述べている。多量の亜鉛・鉛の硫化物を伴う型、銅・ビスマス・バリウムの硫化物と硫酸塩類とを伴う型、銅・鉄・モリブテンの硫化物を伴う型、含ナトリウム珪酸塩・アルミ珪酸塩・磁鉄鉱・赤鉄鉱を伴う型、自然銀・砒素・ビスマス・コバルトおよびニッケルの砒化物、鉄と銅の硫化物を伴う型、鉄硫化物・ハイドロアルミ・珪酸塩(水雲母、モンモリオン石等)・螢石等を伴う型。

ウラン鉱床の多様な鉱物組成は、鉱床の規模と鉱石の品位とに相関関係があるようである。著者は一般的な傾向として次のような現象があると述べている。すなわち大規模な高品位のウラン鉱床では、硫化物はきわめて少なく、ときにはほとんどみられない。著しく多量の硫化物を伴うウラン鉱床は、規模が小さく、ウランの含有量も低品位であることを示している。

ウラン鉱物の生成階梯では母岩の変質はほとんど伴わない。母岩の変質として明瞭にあげられるものは、赤鉄鉱化作用(母岩が赤色を呈する)と緑泥化作用(母岩が緑色を呈する)のみである。ウラン階梯に最も密接な関係のある変質作用は、炭酸化作用(白雲石の生成)、珪化作用(ジャスピロイド・珪岩状石英)、Argillite 化作用(水雲母・モンモリオン石・ハロイサイト石・高陵石が種々様々な量でしばしば混在している)、螢石化作用である。

著者は酸化帯の問題をとりあげ次のように述べている。浸蝕作用が長期にわたって行われた“老年期の酸化地帯”では、6 価のウラン(多くの場合瀝青ウラン、粉状または薄層状瀝青ウランの酸化帯中に生成されている)は溶解し、鉱床の賦存地域外に移動する一般的な傾向がみられる。

硫化鉱石に富む地帯の酸化帯では、ウランは硫化物が少ないウラン鉱床または硫化物を伴わないウラン鉱床の酸化帯におけるよりもさらに易動性である。したがって二次変成帯が深成ウラン鉱物の分布帯に生成される。

膠結帯(還元帯)では、再沈澱した粉状瀝青ウラン鉱がみられる。活性酸化亜帯(膠結帯の現在の酸化亜帯)では、酸化作用が働き、瀝青ウランが溶解するので、薄層または粉状ウラン鉱が残留し、 $U^{4+}$  溶液が生成される。さらに上位の酸化亜帯では、ウラン鉱物は完全に流出しているが、その上の亜帯は雲母状ウラン鉱<sup>(註2)</sup>・含ウラン・燐・カルシウム質鉱物からなっている。初成鉱石中に銅硫化物および砒化物が存在する場合には、この亜帯では、砒素質、銅質の雲母状ウラン鉱が形成されている。この場合には亜帯の下部には、砒素質・銅質雲母状ウラン鉱(ジーンネル石・燐銅ウラン鉱・緑ウラン鉱)が分布し、その上部には、燐・カルシウム質鉱物(燐灰ウラン石)がみられる。地表面では、ウランの珪酸塩(ウラノフェン)およびウランが混在する鉱物(含ウラン方解石・玉滴石)がみられる。含ウラン褐鉄鉱には、全酸化帯を通じて出会う。

硫化物の少ない鉱床地帯および硫化物を含まない鉱床地帯の瀝青ウランの酸化帯では、種々のウランの水酸化物および珪酸塩が形成され、ついで微粒、潜晶構造の仮像の形でゴム石型の鉱物が生成される。しかし薄層状または粉状の瀝青ウランおよび雲母状ウランの数は酸化帯の上部に近づくとも増大する。

このように垂直には二次ウラン鉱物の帯状分布が認められるが、各帯の境界面は明瞭でなく、分化の程度も低い。

著者は堆積岩型のウラン鉱床を精査すると次のような法則性が放射能異常帯およびそれに接する地帯で認められるといっている。

1) 最低のウラン含有量を示すが、岩相的には好都合な海成堆積層が著しく広範囲にわたって発達している地帯の内部では、高ウラン含有帯は100m オーダーの狭い地帯で認められる。ウランがさらに enrich されている地帯では、数 km から数 10km にわたって汀線に沿って普通追跡できる。

2) 一般にはウランの石炭およびその他の燃料鉱物(土瀝青等)への濃集は、原生過程でなく、後成的過程でしばしば起きると考えられているが、炭田地域ではウランの含有量が縁辺部に向かうに従って上昇する現象が認められる。

普通の堆積岩中のウランは、Lower-higher の oxide の状態で一般に賦存し、有機物質(主として腐蝕質物質)との関連性があるのがしばしば認められる。この種の有機物質は、燐酸塩(燐灰土結核、魚類の骨格および外皮に含まれている燐)、炭酸塩(貝殻・鯛状岩・方解石等)の型で存在し、分散状態で出現する。単独のウラン鉱物(瀝青ウラン・粉状瀝青ウラン)は少量がまれに認められる。これらの鉱物は微細な分結物(しばしば顕微鏡の状態)の型を示している。随伴鉱物としては、一般には黄鉄鉱(30%)と少量の閃亜鉛鉱・方鉛鉱・ヴェナジウム硫化物・重晶石・輝水鉛鉱<sup>?</sup>等がみられる。弗素・稀土・スカンジウムおよびその他の元素は普通燐酸塩質岩石中に含まれている。ウ

ランで富化されている堆積岩が酸化作用を蒙っていない場合には、褐色、赤色を示さず、しばしば灰緑色および灰色を呈している。

3) 岩石の変成作用と石灰岩の再結晶化作用が進むと有機物質とウランとの関連性は乱される。岩石類は、最初には瀝青石灰岩型の硬い高炭化作用産物に転移する。しかしウランは、含ウラン鉱床地帯に後成的に主として分布する瀝青ウランおよびその他の鉱物の型で認められる。

4) 低品位のウラン鉱床の酸化帯では、二次ウラン鉱物としては、含ウラン褐鉄鉱および疎に存在する鱗片状磷灰ウラン石、磷銅ウラン鉱以外はほとんど認められない。比較的高品位の酸化帯では多量の磷酸塩（アルカリ雲母状・ウラン鉱物・アルカリ土類の雲母状ウラン鉱）および硫酸炭酸塩 [schrekingerit.  $\text{NaCa}_3(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ] が普通生成される。

ヴァナジウムに富む含ウラン堆積層では、二次ヴァナヂン鉛鉱（チューヤ・ムニン石・カーノット石）が生成される。あらゆる場合を通じて二次ウラン鉱物には、褐鉄鉱・石膏・鉄・マグネシウム・アルミニウム等の硫酸塩および磷酸塩を随伴する。

### 探 鉱 方 法

#### 空中探査<sup>註2)</sup>

自動車探査 この方法は空中探査法の補足として行われる。この方法は空中探査で確かめられた $\gamma$ 線異常帯および空中探査のブランク地帯の補足とに利用される。そのほかに見込みのある地帯で比較的小地域を限って大規模の調査を行う場合に使用される。しかし探査の密度が自動車の機動性と道路網とに依存し、必要とされる間隔測線に沿って測定が行えない場合があるから、自動車探査は、野外調査の原則による調査ができない場合がある。探査は空中探査と類似の放射能測定器を使用する。

水理地質学的探査 この方法は厚い沖積層（ $\gamma$ 線が吸収されて明らかでない）で被覆されている見込みのある地帯の探査や、潜在鉱体が明らかにできる可能性がみいだされるに従って check する意味で用いられる。この方法は、自然に湧出する水または試掘坑から湧出する水、流水中から水を採取し、放射能元素の含有量、塩類の分布状態、酸化還元電位、ウランの崩壊分解によつて生じた放射性または非放射性（気体状）産物およびその他の測定値を求める。ほとんどすべての採集された水は野外で特殊の迅速分析法で分析される。次に一般の水理地質学的観察をもとにして、放射能水理化学（Radio hydro chemistry）的研究を行い、水理地質学的研究に基づいて必要な定尺の放射能異常水理化学図を作成する。

著者は野外調査では、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線調査のほかに5m以下の間隔で岩石、土壌サンプル、土壌中に含まれているガス成分の採取、植物試料の蒐取も行うことが必要であると述べている。エマネーション調査を行う際には、特殊試料採取器によつて0.8~1.0mの深度からトロンおよびラドンの試料採取を行うべきである。トロン・ラドンの濃集の決定は、試料採取箇所で行い、数分間で完了することが必要である。塩類変成帯がみられる沖積土中のウランの測定調査には、定量蛍光分析を利用すべきである。すなわちウランは弗化ナトリウムに融解して蛍光体をつくり、この蛍光体を紫外線で刺戟すると蛍光を発する。この蛍光体の輝度は、ウランの濃度と比例関係にあるから、未知ウランの量は $1 \sim 5 \cdot 10^{-2}\%$ までは知ることが可能である。

#### 地植物探査 (Geobotanical survey)

- 1) 灰化せる植物中の放射性元素（主としてウラン）およびその他の元素を分析する方法。
- 2) 各種植物を図面上にプロットし、ウラン鉱床地帯でのみ出会う元素が植物の生育に及ぼす影響を観察するとともに、植物に含まれている化学元素の変化を研究する方法。

この方法によると、深度20~25m下にある潜在鉱床（沖積土下）を明らかにすることが可能である。

訳註 1) ソ連では“共生元素”の考え方を導入して鉱床の成因を地球化学的な立場で解析し、探鉱の指針としている。共生元素の分類を次に掲げておく。

(1) 超塩基性岩石類(ツンカンラン岩・カンラン岩)

a) Cr, Fe, Mg (クロム鉄鉱・蛇紋岩)

註 3) 地質調査所月報, Vol. 7, No. 10, 1956 参照

- b) Cr, Fe, Pt 白金族の金属
- c) 石綿・滑石 菱苦土石 ( $Mg \cdot Si \cdot H \cdot O \cdot C$ )
- (2) 塩基性岩石類(斑レキ岩・ノーライト・輝緑岩)
  - a) Fe, Ti, V (斑レキ岩中の磁鉄鉱・チタン鉄鉱)
  - b) Fe, Cu, Ni, Co, Pt, Pd, S, O (ノーライト・カンラン輝緑岩に伴なう磁硫鉄鉱・黄銅鉱・硫鉄ニッケル鉱・磁鉄鉱)
- (3) アルカリ岩石類(閃長石・霞石閃長石) P, Fe, F ときには Zr, Ti, Nb, TR (燐灰石・磁鉄鉱・稀土類元素を伴なう鉱物)
- (4) 酸性岩石類(花崗岩・花崗閃緑岩・石英閃緑岩) W, Mo, Sn, Li, F, B, ときには Be, Bi, Nb, Fa ペグマタイト質花崗岩中にみられる元素
  - a) Fe, W, Mo, Cu, Sn (接触交代鉱床)
- (5) 熱水鉱床(鉱脈型) 酸性貫入岩石と成因的に関連性のある鉱床
  - a) Au, Fe, S, As (金, 砒素鉱物鉱床)
  - b) Zn, Pb, Ag ときには Cu, Au, Cd, Jn, Ge, (多種金属鉱床)
  - c) Ag, Cu, Ni, Bi, U ときには Cu, Fe, As (5元素組成のウラン鉱床)
- 5 共生元素がウラン鉱床の探鉱指針となるという説は現在ソ連では論争が起こっている。
  - d) Au, Ag, Te, Se (テル・金・銀鉱床)
  - e) Hg, Sb, S, F ときには As (螢石を伴なうアンチモン・水銀鉱床)
- (6) 残留鉱床
  - a) Fe, Mn, ときには Ni, Co, Mg, Cr (ラテライト質鉄鉱・ニッケル鉱)
  - b) Al, Fe (ラテライト・ボーキサイト)
  - c) P, Ca, F (燐灰土)
  - d) V, U, Cu
- (7) 湖成堆積鉱床
  - a) Na, Ca, Mg, K, Cl, S, C, H, O (岩塩鉱床・カリ鉱床・マグネシウム鉱床・石膏・硫黄鉱床・アスファルト鉱床)
  - b) B, Na, Ca, Mg (硼酸塩)

訳註 2) 雲母状ウラン鉱

本鉱物類はソ連では、主として2価金属の複塩で表わされる含水塩基性磷酸塩・亜砒酸塩・ヴァナジン酸塩の広範な鉱物族である。こゝで2価金属の複塩とは  $Cu^{2+}Ca^{2+}$  次いで  $Mg^{2+} Fe^{2+} Mn^{2+} Ba^{2+} Pb^{2+}$  および  $K^{1+}$  と  $U^{6+}$  の複塩で、 $U^{6+}$  は  $O^{-2}$  アニオンが附加して、 $(UO_2)^{2+}$  錯(カチオン)イオンを形成する。この種鉱物族中で最も広範囲に分布するものは8分子の  $H_2O$  との化合物である。この種鉱物族の特性は一方向に完全劈開があつて、雲母に近似している。

燐銅ウラン鉱, 燐灰ウラン鉱 tyuyamunite  $Ca(UO_2)_2 (VO_4)_2 \cdot 8 H_2O$  Carnotite  $K_2(UO_2)_2 (VO_4) 3 H_2O$  ( $UO_2^{6+}$  3.41%) は雲母ウラン鉱物族である。