

高緯度地帯における放射性鉱物探査

奥野孝晴*・佐久間秀樹*

Radioactive Mineral Explorations in Polar Regions

Takaharu OKUNO* and Hideki SAKUMA*

Abstract: Uranium exploration has been carried out in the northern part of Canada in winter where the natural conditions are rather critical. A number of geophysical and geochemical exploration techniques have been employed to delineate various kinds of uranium mineralization as well as favorable geological structures.

Those techniques are considered to be applicable to radioactive mineral exploration in outcropping areas of Antarctica where thickness of the ice cover is minimum.

Among those techniques, a combined airborne geophysical survey utilizing a medium-sized helicopter is highly recommendable for the reconnaissance stage of the activity.

要旨: カナダの高緯度地帯では、冬期の極地に特有な自然条件のもとでウラン鉱床の探査が行われている。南極地域における放射性鉱物探査を露岩地域、あるいは氷雪による被覆がきわめて薄い地域に限定して実施するならば、基本的にはカナダの高緯度地帯で用いられている各種の地球科学的探査法を適用することが可能である。

概査の第1段階としては、中型ヘリコプターによる総合的な空中物理探査が、南極地域においても特に有効であろうと考えられる。

1. ま え が き

動力炉・核燃料開発事業団はアフリカ、北米、オーストラリアなど世界の各地で、自ら鉱業権を取得してウラン探査を実施している。このうち、北緯 62 度付近のカナダ盾状地北部に保有している北西準州テクルシリレイクおよびデュバント鉱区等の冬期探査とその経験は、南極地域のウランや放射性鉱物探査の参考となると思われるので、同地域における探査の方法を重点にとりまとめた。

カナダ高緯度地帯での探査は、盾状地の深部を対象とする必要性から、各種の地球科学的探査法が適用されている。岩盤が氷河堆積層に覆われ、湖沼が発達するこの地域での探査は、試錐を別とすれば、何らかの探査の手がかりは地球科学的手段による他はなく、既存の探査法をより深部に適用するための測定法、解析法の改良が進められている。

* 動力炉・核燃料開発事業団資源部。Raw Materials Division, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 9-13, Akasaka 1-chome, Minato-ku, Tokyo 107.

2. 自然条件

カナダ北西準州の調査は、湖面の解氷する6月上旬から9月上旬の夏期と、湖が完全に結氷する1月上旬から4月上旬の冬期に行われる。冬期作業中の現地の自然条件は、下記の通りである。

日照時間	午前8時－午後5時（1月中旬）
作業時間	午前9時－午後4時
気 温	－40°C～－20°C
積 雪 量	（陸上）20-100 cm（湖上）0-10 cm
湖の結氷	50-80 cm
天 候	好天多く、降雪は少ない。ときに強風。

3. 地 質

カナダ盾状地のアサバスカ砂岩地域には、約20万tのウランが確認されている。これらのウラン鉱床は、次のような特徴を備えている。

- 1) 上部原生代基底部の不整合面から下方100m以内の下部原生代の岩石中に、鉱体が存在する。
- 2) 北東－南西方向の断層構造帯と、鉱体分布は関連している。
- 3) 下部原生代のグラファイトを含む層に鉱体が多く発見されている。
- 4) 鉱体周辺の岩石には変質作用が認められ、塩基性岩脈と関連する場合もある。

したがって、この地域のウラン探査は、直接放射能またはウランの存在を確認する作業のほか、上にのべた地質的特徴を把握する作業手段が適用される。

4. 空中物理探査

4.1. エアボーン

対象面積数千km²の最初の概査の手法としては、通常下記の仕様の固定翼機による広域放射能調査および磁気調査を行う（図1, 2, 3）。

1) 機器

γ線スペクトロメーター：ウラン（Bi²¹⁴）、トリウム（Th²³²）、カリウム（K⁴⁰）のγ線量および全γ線量を計測しうる4チャンネルスペクトロメーターで、クリスタルはNaI(Tl) 1000立方インチ以上とする。

エアボーン磁力計：プロトン磁力計またはフラックスゲート磁力計を用いる。

電波高度計

追跡カメラ

ドップラー航法装置

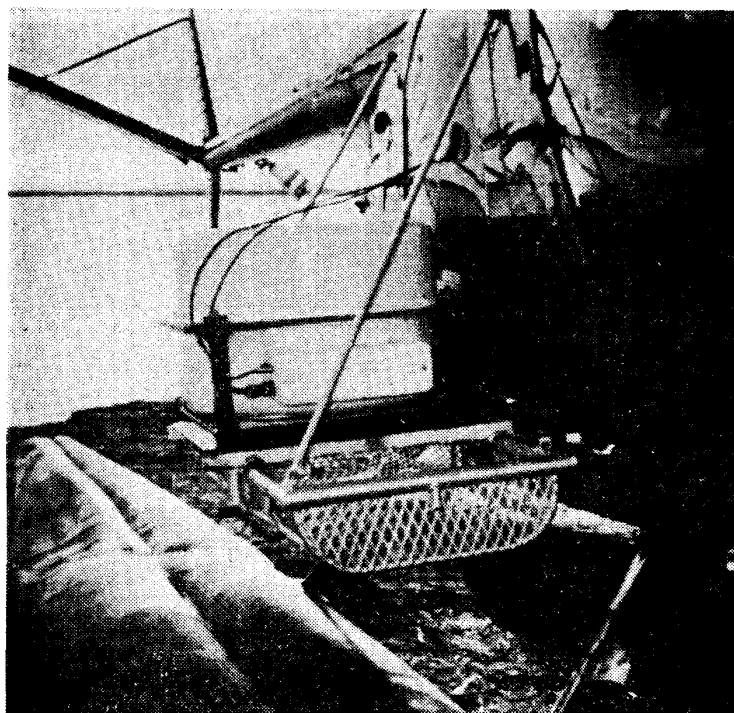


図 1 エアボーン測定装置 (測定部). この測定器は体積 1000 立方インチの NaI クリスタルを用いている.

Fig. 1. Airborne spectrometric survey system (detector crystal).

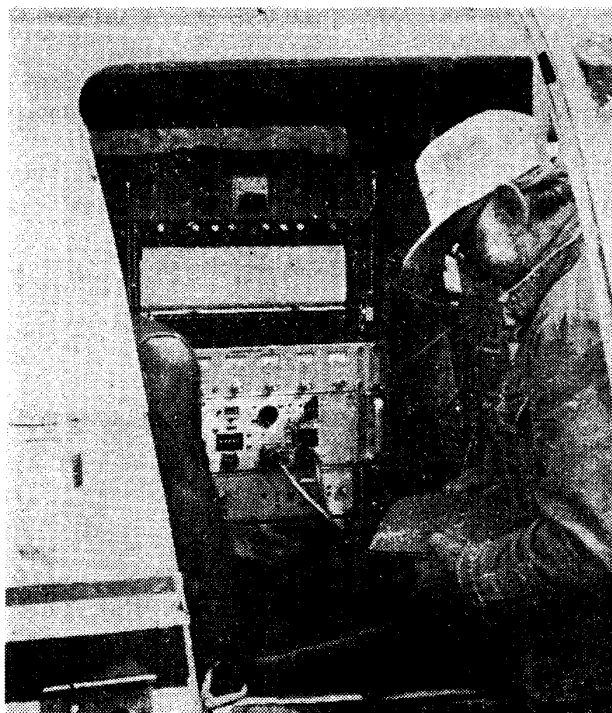


図 2 エアボーン測定装置 (計数・記録部). 6 チャンネルのスペクトロメーターおよび 6 ペンレコーダー

Fig. 2. Airborne spectrometric survey system (counter, recorder).

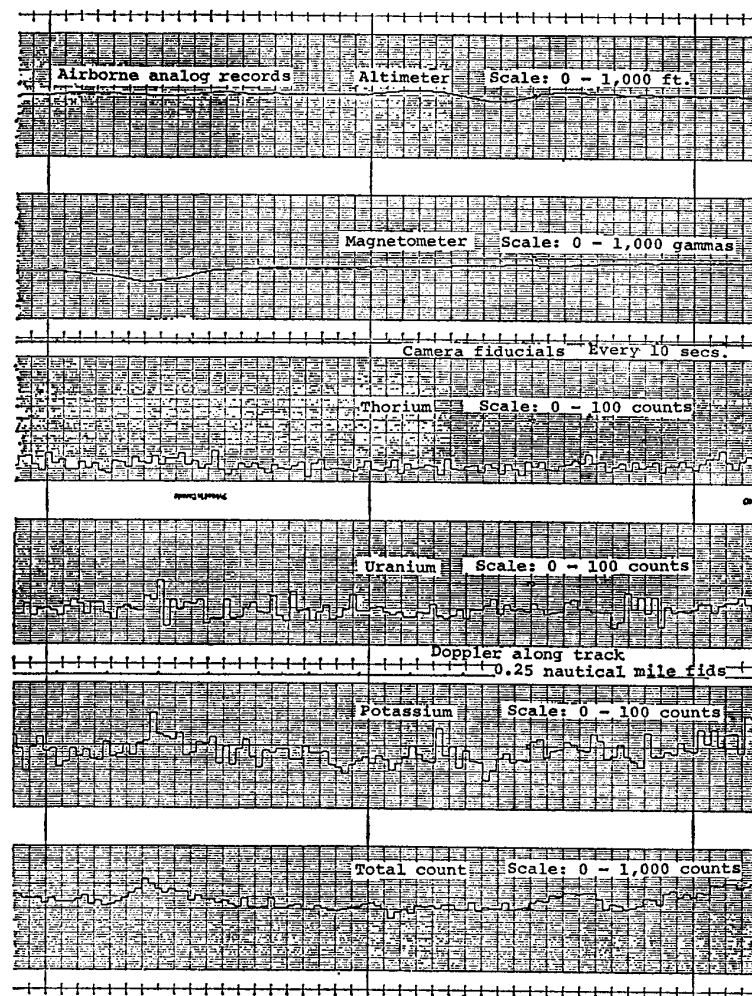


図 3 エアボーン測定チャート (6 チャンネル)
Fig. 3. Airborne spectrometric data chart (6-channels).

2) 測定条件

飛行線間隔 200 m

飛行高度 100 m \pm

飛行速度 200 km/h

調査の成果図として、トータル γ 線コンター図、ウラン異常分布図、磁力コンター図を作成する。

4.2. ヘリボーン

地形が複雑な地域や、エアボーンの精査段階としては、中型ヘリコプターを用いて集中的な調査を行う。ヘリコプターには、4チャンネル γ 線スペクトロメーター、プロトン磁力計、高度計、追跡カメラを組み合わせたエアボーンシステムを搭載し、50 m またはそれ以下で飛行測定し、必要により着陸して踏査を行う。ヘリボーンの乗組員は、パイロット、ナビゲーター、機器オペレーター各1名と地質技師2名で構成する。

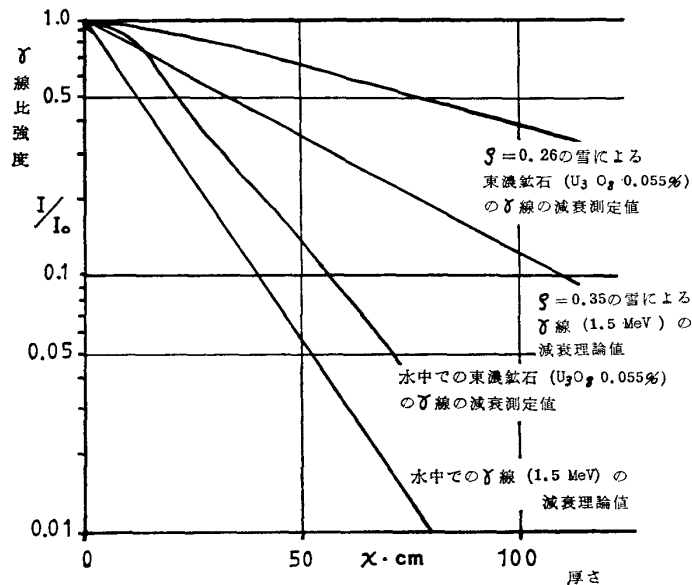


図 4 γ線の減衰実験

Fig. 4. Data on gamma-ray decrement test.

エアボーン，ヘリボーン放射能測定上の最大の問題は，氷雪によるマスキング効果である．媒質中のγ線の減衰は，一般には次の式であらわされる．

$$I = I_0 e^{-\mu m \cdot \rho x}$$

I_0 : 入射強度

I : γ線強度

μm : 質量吸収係数

ρ : 密度

x : 通過距離

上式は，単色のγ線について成り立つ理論値であるが，岐阜県東濃鉱山の鉱石を使用した試験では，鉱石のγ線エネルギー分布が広がっているため，測定される全体としてのγ線強度は上記の指数法則に合致せず，有効質量吸収係数は x とともに小さくなる傾向が明らかとなっている．これによれば，水，氷の場合 100 cm の厚さでγ線強度は 1% に減衰し，150 cm で 0.1% 程度となる．また雪の場合，さらさらした密度の低い雪 ($\rho=0.26$) の場合は 100 cm で 40% 程度であるが，一般の積雪 ($\rho=0.3-0.35$) では 100 cm で 10-20% に減衰する (図 4)．

したがって，露岩地帯の積雪量または冠水量は，測定時の重要な規制条件となる．

5. 地上物理探査

5.1. 地表放射能調査

数 V の電池を電源に，トランジスタ化された軽量小型の野外携帯用放射能測定器を使用して，露岩地帯のグリッド放射能測定を行う．測定器としては，全γ線を測定するもののほか，threshold 型スペクトロメーターを用いる．これによりウラン，トリウム，カリウムの



図 6 グリッド放射能測定. 調査地域内に格子状に設定された測線上で放射能測定を行う

Fig. 6. Grid radiometric survey.

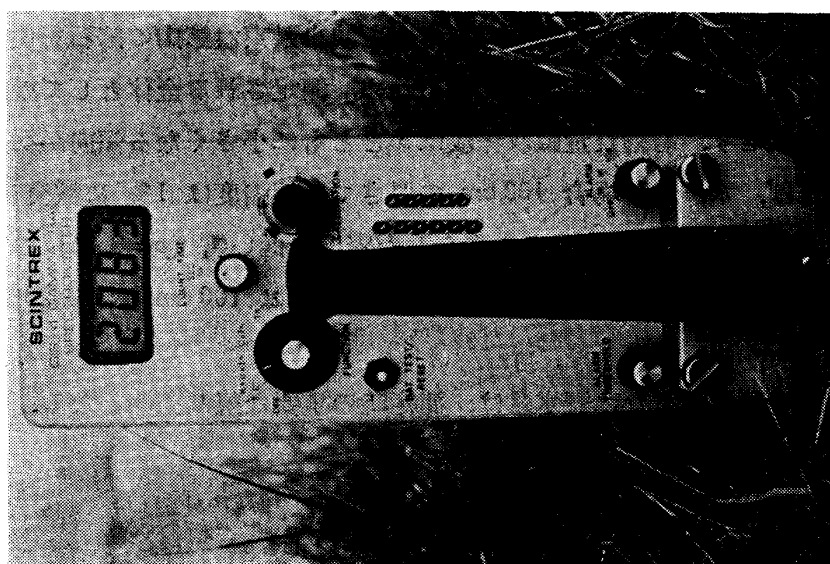


図 5 4チャンネルγ線測定器. 体積43立方センチのNaIクリスタルで4チャンネル(トータルカウンタ, トリウム, ウラン, カリウム)のγ線を測定する.

Fig. 5. 4-channel gamma-ray spectrometer (Scintrex GIS-4).

γ 線を識別できる。 -20°C までの低温では操作上問題はない (図 5, 6)。

5.2. 重力探鉱

重力探査は、空中磁気図と同様探査の基本図として利用され、堆積盆地の基盤構造を大局的に把握するのに有効である。ウラン鉱床は、しばしば、断層破碎帯ないし変質帯と関連性をもち、変質帯と非変質帯の密度差は (キイレイクの例では) 0.2-0.4 で、これは重力探査のデータから容易に判別できる値である。

5.3. 地震探鉱

基盤深度、堆積構造、断層等地質構造解明の手段として弾性波探査が使用される。カナダ高緯度地方で主として用いられている方法は、非爆薬音源 (油圧ハンマーなどの機械振動) を元とする浅層反射法であり、探鉱機やデータ処理技術の進歩が著しく、最近利用の機会が増大している。

5.4. 電磁探査法

電磁法は、ウラン鉱床が断層や破碎帯、グラファイト等の導電性岩層と関連があるとみられる場合に利用されている。

V.L.F. 法 (低周波電磁誘導法) は、世界に十数カ所ある対潜水艦交信用送信局から発信される VLF 電磁波を利用する探査法で、20 m 程度までの浅所であれば有効な探査手段であり、EM-16 測定器等を用いての氷河堆積層におおわれた下層の岩石の構造調査に、その



図 7 電磁法測定 (VLF 法). 地表付近の断層等地質構造を解明する
Fig. 7. Ground electromagnetic survey (Geonics EM-16).



図 8 電磁法測定（水平ループ法受信器）。数十～数百ヘルツの低周波を用いて地表付近の地質構造の解析を行う

Fig. 8. Horizontal loop electromagnetic survey (Apex Max-Min II-Receiver).



図 9 電磁法測定（水平ループ法送信器）

Fig. 9. Horizontal loop electromagnetic survey (Apex Max-Min II-Transmitter).

迅速性，経済性からカナダ高緯度地方で広く活用されている。しかし，EM-16 タイプの測定器は南極地域においては，世界各地の送信局からの VLF 波を受信できないため，発信機なしには使用できない（図 7）。

水平ループ法のうち，探査上評価できるのは APEX 社の Max-Min II で，少なくとも深度 100 m まで，場合によっては 200 m 程度までの伝導体の追跡に成功している。

パルス EM 法は，エアボーンの入力法を基礎とした比較的新らしい地上物理探査法

で、この方法の利点は、送信信号が受信信号を妨害しないことによって直接的に2次電磁場を測定できるほか、解析時に周波数領域法の場合のように地形が問題にならないという特徴もある。この方法で、深度 200 m の探査に成功した例がある (図 8, 9)。

5.5. 電気探査法

IP 法は、サスカチワン州ビーバーロッジ鉍山にみられる鉍脈型ないし断層破碎帯に伴う鉍床探査に、良好な結果を得ている。ここでは比抵抗の低い領域と鉍体は一致するが、これ以外にも低比抵抗を示すものとして、岩脈、伝導度の高い鉍物や岩石、接触帯などがあり、解析上注意が必要である。

5.6. 磁気探査法

ウラン鉍床がしばしば塩基性岩脈にともなうことから、プロトン磁力計による磁力探査が行われるが、磁気の経時変化を除去する方法として開発された Gradiometer を使用する磁気垂直傾度法は、探査法として評価できる方法である (図 10)。



図 10 全磁力測定. 瞬時に地表付近の全磁力を測定するプロトン型磁力計
Fig. 10. Total field magnetic survey (Geometrics G-816).

6. 地球化学的探査

6.1. 湖水化探

探査対象地域には無数の湖沼が発達するので、広域探査法として、湖水中のウラン含有量の分析が一般に行われており有効である。夏期の調査として、ヘリコプターを使用して採水を行い、pH、電導度を測定し、のちにウランの分析を行う。

データの解析に際しては、まず調査地域の岩相別のバックグラウンド値（通常 0.1 ppbU 以下，異常値 10-20 ppbU）を定めることが重要である。この他の問題点は、次の湖底堆積物を用いる化探と共通する（図 11）。

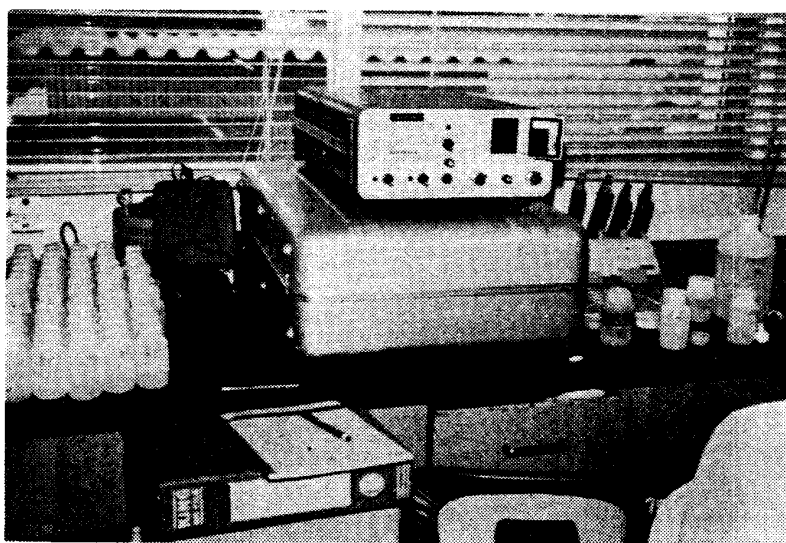


図 11 ウラン分析計。自然水中のウランを定量 (0.1-10 ppb) する
Fig. 11. Uranium analyzer (Scintrex UA3).

6.2. 湖底堆積物化探

最も広く適用されかつ評価されているのが、湖底堆積物中のウラン含有量の分析である。特に岩石の露出状態が悪く、湖沼系がいちじるしく発達しているような場所においては、広域的な湖底堆積物による化探で対象を絞ることが可能であり、直接的な広域探査手段であるエアボーン放射能探査と並んで、この方法が有効な場合が多い。

この探査を行う場合、対象地域のバックグラウンド値（通常 5-10 ppmU，異常値 20-500 ppmU）を定め、統計的に信頼性の高いデータを得るためには、対象地域の面積に応じた相当数の試料を採取しなければならない。動力炉・核燃料開発事業団のプロジェクトの例をとると、約 3000 km² の調査面積に散在する多数の湖から、合計 1500-2000 点の湖底堆積物を採取して成果を得ており、概査段階では 1 km² あたり 1-2 点というのが標準的な採取頻度である。

試料は、ヘリコプターを使用してエクマン式採泥器を用いて 1 時間あたり 10 試料程度の能率で採取し、分析は U, Th, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn 等について行い、あわせて有機物

の含有比を測定する。

この種の探査を行うにあたっては、

- 1) 湖底堆積物中のウランは、基盤岩や地表付近の地質によって異なり、同じ湖の底であっても中央付近と湖岸に近い場所ではその値が違ってくこと。
- 2) 岩石の風化の度合によっても値に大きな影響がみられること。
- 3) 湖底の堆積条件は季節とともに変化すること。

等に留意しなければならない。

6.3. 土壌化探

エアボーン異常地点、地表調査で明らかにされた露頭地帯、湖底堆積物中にウラン異常が発見された湖、湿地帯周辺のいわゆる異常地区周辺の土壌を分析する方法は、精査段階において一般的である。通常、平面的にグリッドを設定して土壌採取を行うが、湖沼の異常につ



図 12 土壌サンプリング。土壌サンプラーによって特定の層位の土壌を採取する
Fig. 12. Soil sampling.

いては、後背地流域について湖を取り囲むように等間隔で採取する方法がある。

土壌は A1 層（土壌の表面近くで腐植が集積している層位）を採取する。試料採取時には周辺の地形、水系、礫・砂・軟泥等の含有比、有機物・炭質物の含有率などを記載し、分析する元素は、湖底堆積物の場合と同様である（バックグラウンド値 1-5 ppmU, 異常値 10-200 ppmU）。また採取時には、その地点の放射能強度を測定する。

北緯 62 度付近の調査地では、夏でも早い時期には A1 層が凍結していて試料採取に困難を伴うので、この探査をプロジェクトに組み入れる場合は、この点を注意しなければならない。標準的な作業量は、10-50 m グリッドで採取する場合、作業員 2 名で 1 日あたり 20-30 試料である（図 12）。

6.4. 植物化探

この 2-3 年の間に、同地域において植物を用いた化探の適用試験が、サスカチワン州鉱物開発公社によって実施されている。用いられた植物は、地域に一般的にみられる針葉樹の幹、枝葉、樹皮のほかラブラドルティール、ブルーベリー等の下草類、苔などで、現在までの結果ではスプルース（もみ）、ジャックパインなどが良好な結果を示し、ウランの良い指標となることが知られている（バックグラウンド値灰分中 1 ppmU 以下、異常値 5-30 ppmU）。

キイレイクにおける適用例では、土壌分析では不鮮明であった異常帯が、植物の化探ではいちじるしい異常として検出されている。これは、地下水が酸化環境にあるところでは、土壌中のウランの大部分が溶脱される一方、植物組織中には濃集するという機構として考察されている。すなわち、土壌が常に酸化還元の状態に強く影響を受けるものと考ええると、植物を用いる化探の意義が生じてくる。

6.5. ラドン測定法

地下に賦存する潜頭ウラン鉱床から発生するラドンガスを地表付近で測定し、地下のウランの存在を推定する調査法で、トラックエッチ法とエマノメーター測定法とがある。

トラックエッチ法は、ラドンガスに起因する α 粒子の飛跡数をフィルム面のエッチングにより数える方法で、実際には精査地域にあらかじめ設けた測定点にフィルムを設置し、2-3 週間放置後回収したものを計測する。トラックエッチ法は、長時間にわたって累積的に計測を行う方法であるため、周期的なバックグラウンド値の変動等の影響を相殺した測定結果が得られる特長を有する。探査例では、氷河堆積物によって 20 m 程度の被覆をうけている堆積型ウラン鉱床の分布が、明瞭にラドン等品位線図の異常として示されている。

エマノメーター測定法は、各測定点に掘削した数十 cm の孔内空気を吸入ポンプで採取し、その場でラドン検出器によって測定を行う。 ^{222}Rn （ラドン）、 ^{220}Rn （トロン）とを識別できる可搬型シンチレーション測定器としては、EDA 社製 RD-200 型などがある。現地作業では掘削を除いて、作業員 2 名で 1 日あたり 25 点程度の測定が可能である。

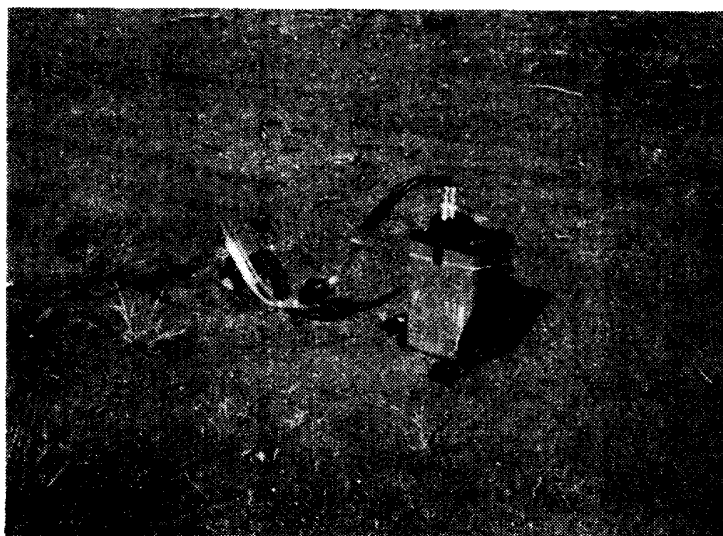


図 13 ラドンエマノメーター．ポンプにより土壌ガスを採取しているところ
Fig. 13. Radon emanometer (EDA-RD 200 System).



図 14 ラドンエマノメーター．エマノメーターによりラドン濃度を測定しているところ
Fig. 14. Radon emanometer (EDA-RD 200 System).

この方法は、現在のところ比較的安価な概査法であり、特に岩石の露出が少なく覆土、湖沼、湿地帯の卓越している地域で、対象を絞る手段としては有効である。データを解析するうえでは、測定される地表のラドンガスの移動のメカニズムを、他の探査法との組み合わせによって推定し、より信頼性の高いものとするのが望ましい (図 13, 14)。

6.6. ヘリウム測定法

深部のウラン、石油、ガスと地表のヘリウム異常との相関が知られており、土壌または地下水中のヘリウム含有量の測定調査が各地で適用され始めている。このために可搬型の小型質量計が使用されている。

7. む す び

以上、カナダ盾状地北部、北西準州で行っている放射性鉱物探査の方法を略述した。この経験にもとづき、南極地域において放射性鉱物探査を行うとしたなら、どのような方法が適用可能か若干考察して、この稿のむすびとしたい

南極の気象条件は厳しいことが知られているが、各種探査機器に最も影響すると考えられる温度、湿度条件は、少なくとも南極の夏期に関する限り、カナダ高緯度地方の冬期の作業環境より良好といえる。したがって、カナダ高緯度地方の冬期作業で使用可能な表1に示すような機器は、南極地域で活用できよう。

表 1 探査機器の使用条件
Table 1. Operation temperature range of geophysical equipments.

探 査 法	名 称	機 器 実 例	適 用 温 度
エアボーン放射能	γ 線スペクトロメーター	Scintrex GAD 6-4 channel	-20°C ~ +55°C
" 磁 気	プロトン磁力計	Geometrics Model G-813	-40°C ~ +85°C
地 上放射能	γ 線スペクトロメーター	SPP 2	-20°C ~ +55°C
" 磁 気	垂直傾度計	Gradiometer	-40°C ~ +85°C
" 電磁気	低周波 EM	ABEM-TURAM 2S	-40°C ~ +60°C
" 電 気	IP-比 抵 抗	McPHAR-P660	-40°C ~ +60°C
" 重 力	重 力 計	Scintrex C626	-40°C ~ +60°C
" 弾性波	反 射 法	Mini Sosie	-20°C ~
" ラドン	エ マ ノ メ ー タ ー	EDA-RD200	-30°C ~ +50°C

温度条件以上に重要なものは、氷雪による各種地球科学的情報（シグナル）に対するマスキング効果で、カナダ高緯度地方においては、冬期でも積雪や湖沼の結氷の厚さは数 m を越えることは稀であり、この点が南極の氷床とはまったく異なり、これが探査を計画するうえで最大の障壁となろう。したがって、露岩地帯、氷雪の薄い範囲が調査地域に選定されなければならない。

比較的露岩の多い地域の極地概査を想定すると、エアボーンデータは南極地域においてすでに相当量蓄積されているので、作業手順の1つとして次のようなことが考えられる。まず、中型ヘリコプターによる空中物理探査を行う。ついで露岩地域の放射能測定調査、および周辺潜頭部のラドン調査、化探を行う。対象となる鉱床の性質にしたがって、地震、重力、磁気、電気等地上物理探査を行い、深部の構造を推定したうえで、試錐段階へ進む。1つの可能性として、このような一連の探査手順が考えられるであろう。

(1983 年 2 月 16 日受理; 1983 年 5 月 6 日改訂稿受理)