

アメリカおよびカナダにおける核原料物質探査技術

佐野 凌 一*

The Techniques for the Exploration of Nuclear Raw Materials in the United States of America and Canada

By

Shun'ichi Sano

Abstract

This report describes the systems of the exploration for nuclear raw materials by the federal governments and the techniques of the exploration, especially the application of geophysical methods. The writer wishes his sincere thanks to the United States Atomic Energy Commission, the United States Geological Survey, and the Geological Survey of Canada for their kind attitude toward the writer as a training during the period from Oct. 1956 to Jan. 1957. The writer thanks also the Atomic Energy Commission of Japan for the fund of the foreign training program granted to the writer.

1. 緒言

筆者は昭和31年9月29日から32年1月17日まで、原子力関係留学生としてアメリカおよびカナダに派遣され、その間 Division of Raw Materials, U. S. Atomic Energy Commission; U. S. Geological Survey および Geological Survey of Canada の各施設において核原料物質探査技術、とくに物理探査技術について研修した。北米合衆国およびカナダにおける核原料物質探査技術について概略をここに紹介する。

2. 探査組織

2.1 国家機関による探査

アメリカおよびカナダでは数年前まで国家機関により核原料物質の探査が行われていたが、現在では個々の鉱床の探査はすべて民間の事業として解放されている。

アメリカでは Division of Raw Materials, U. S. Atomic Energy Commission および U. S. Geological Survey において探査が行なわれてきた。現在でもこれらの機関において地質学的・鉱床学的研究を主体とする地域調査、鉱床探査に関する技術の基礎的研究が実施されている。

U. S. Atomic Energy Commission では Grand Junction Operation Office^{註1)} および各地の Area Office, Sub Office 等に探査技術員を分散配置してい

る。このうち、Grand Junction Operation Office には Exploration Division 内に Geologic Branch を設け、約 100名の人員を擁している。当 Branch では Colorado Plateau のウラン鉱床の調査を担当し、Colorado Plateau を4つの District に分割し、さらにこれらの District をいくつかの Area に分けて、所属の地質調査員に分担調査させている。これらの地質調査員の一部は鉱床所在地附近の Area Office に駐在し、またとくに重点的に調査する鉱床附近にはトレーラー・ハウスを主体とする現場作業所 (Camp) が駐けられる。またこの Geologic Branch には Chief's Office, Petrology-Mineralogy Section, Geologic Report and Information Section, Geophysics-Geochemistry Section が設けられ、地質調査作業を援助する。また Grand Junction Operation Office の Engineering Service Branch 所属の Instrument Section, Photogrammetry Engineering Section, Drafting and Photography Section 等が Geologic Branch の作業に協力する。また Engineering Service Branch に Airborne Section が属していたが1956年9月に解散して、現在は4機を Operation Office および Area Office に分散配置している。

Grand Junction Operation Office 以外では、Denver Area Office^{註2)} に比較的大規模の探査部門が属している。当 Area Office では Rocky 山脈東側のウラン鉱床の調査を担当するとともに、物理探査・地化学探査班

* 物質探査部

註 1) Grand Junction, Colorado

註 2) Denver, Colorado

を有し、各地域の物理探査・地化学探査を担当している。

これらの機関による鉱床調査事業ならびに他の国家機関鉱床調査事業および関連技術の研究は Associate Director for Exploration, Division of Raw Materials, U. S. A. E. C. によつて統轄される。

U. S. Geological Survey では核原料物質探査に関する特別な部門を設けず、Geologic Division 内に Trace Element Planning and Coordinate Official (TEPCO) を置き、原子力関係予算による事業の企画・統制を行っている。TEPCO は Washington D. C. および Denver^{註3)} に各1名をおき、それぞれに10名以上の事務局員が従属している。

U. S. Geological Survey は本部を Washington D. C. におき、本部において主としてアメリカ東部の地域における調査事業を担当し、U. S. Geological Survey, Denver において中・西部における調査事業を担当している。一般に U. S. Geological Survey が行っている原子力関係事業は Division of Raw Materials, U. S. A. E. C. に直属する機関において行われている鉱床調査事業に比較して、基礎的・研究的である。ウラン鉱床の地質学的・鉱床学的研究のほか、各種岩石中のウランの分布・岩石中の炭質物・岩石中のウランの風化による移動・ウラン鉱物の合成・地殻における安定同位元素の分布・地質年代の決定・大気中におけるラドンおよびトリウムの分布・中性子検層を含む放射能検層法・γ線の散乱などの研究が原子力関係予算によつて遂行されている。

カナダにおいては Radioactive Resources Division, Geological Survey of Canada および国家資本によつて設立された Eldorado Mining and Refining Limited によつて探査が行なわれていたが、民間による探査事業が成長するにつれ、Eldorado Mining and Refining Limited の探査部門は解散し Geological Survey of Canada の Radioactive Resources Division は Mineral Deposits Division に吸収された。また Radioactivity Division, Mines Branch, Department of Mines and Technical Survey および National Research Council Laboratory においても探査技術に関する研究が行なわれた。

2.2 民間による探査に対する援助

アメリカでは民間によるウラン鉱床の探査を奨励した。民間に対する援助はおもに情報の提供・鉱石の試験の形で行なわれている。

U. S. Atomic Energy Commission の予算による調

註 3) Colorado

査研究活動の報告書のうち、機密を要しないものは公開され、一般に販売される。そのうえ各州の公立図書館ないし大学図書館において公衆の閲覧に供する。鉱床探査に関する報告書はすべて公開される。U. S. Geological Survey では、原子力関係予算以外の予算による調査・研究と同様に同所の報告書として出版する価値があることを所長が認めたものにかぎつて U. S. Geological Survey Bulletin または U. S. Geological Survey Professional Paper として出版される。U. S. Geological Survey で原子力関係予算によつて行われた研究調査については、少なくとも年1回宛 U. S. Atomic Energy Commission に対して報告書が提出され、これらは U. S. Atomic Energy Commission から出版される。

空中放射能探査によつて発見された放射能強度異常地域ないし地点を示した地図が U. S. Atomic Energy Commission または U. S. Geological Survey によつて出版され、また上記機関の本部・支所等において公衆の閲覧に供していたが、現在ではこの種類の地図の出版は中止されている。民間の探査事業が政府の援助を必要としない程度に発展したからである。同様な理由によつて U. S. Atomic Energy Commission による試錐作業も中止された。

民間の探鉱者から送附された鉱石試料については U. S. Geological Survey または U. S. Atomic Energy Commission 所属の施設によつて無料で物理的分析 (Radiometric Assay) が行われ、ウラン当量 (% U_3O_8 equivalent) が測定される。従前はウランの化学分析および鉱物鑑定も民間の探鉱者のために行われていたが、民間における探査事業の発展とともに中止された。

カナダにおいては放射性鉱物鉱床探査に関する報告は主として Geological Survey of Canada から出版される。Geological Survey of Canada ではまた民間の探鉱者のために鉱石試料の物理的分析を無料で行なっている。しかし物理的分析を行う民間会社と競争しないために、1鉱床地域に対して6個以下の試料に制限されている。

3. 探査技術

アメリカおよびカナダにおいては鉱床探査と探査技術の研究とが同時に出発したために、鉱床探査は必ずしも組織的・系統的には行われなかつた。

空中放射能探査はアメリカにおいて非常に有効な探査法であると考えられているが、カナダにおいてはその有効性はあまり認められていない。地表概査や鉱石・試錐

岩芯の検査等によつても多数の鉱床が発見された。しかし民間における探査活動が非常にさかんであつてその現状が充分把握されていないので、どの探査法がどの程度有効であつたかはわかつていない。

アメリカの一部の研究者は統計的研究の結果に基づいて、地表水のウラン含有量の地域的分布の測定が鉱床概査として有効であると主張している。

探査技術については、1955年ジュネーブで開かれた国際原子力平和利用会議に多数の報告が提出され、その後とくに著しい発展はみられない。したがつて以下には、物理探査技術を中心として同会議の報告には示されていないことがらや、とくに重要と思われている事項に関し記述する。

3.1 空中放射能探査

飛行機に放射線測定器を設備し、迅速に放射能強度の異常を探索する空中放射能探査は各国家機関や民間において盛んに行なわれている。U. S. Atomic Energy Commission では小型機による低高度探査、U. S. Geological Survey や Geological Survey of Canada では大型機による高高度探査が実施され、民間では各種の探査が行なわれている。

U. S. Atomic Energy Commission による空中探査

前述のように U. S. Atomic Energy Commission では Grand Junction Operation Office に Airborne Section を置き、9機を所有していたが、Airborne Section 解散後は Salt Lake City^{註4)}、Grand Junction に各1機、Denver に2機を分散配置し、他の飛行機を売却した。

これらの飛行機は Peiper Super Cab で、Mount Sopris Instrument Corporation 製 SC 188DA 型ないし Nuclear Enterprises Ltd. 製 MARK VI 型シンチレーション・カウンターを搭載する。シンチレーション・ヘッドは直径5"、厚さ2"の Na I (TI) に5"の増倍型光電管を使用したもの各1個を用いる。なお自記記録計を装備し Mout Sopris Instrument Corp. 製の装置には電波高度計を附属する。

1調査班は操縦士1名、調査員1名、また飛行機1台と自動車 (Station Wagon) 1台とからなる。操縦士は整備士の資格を併せもつことが必要であつて、僻地においても常に飛行機の整備が充分できるよう配慮されている。

調査地はもちろん地質学的考察に基づいて選定される。作業に使用する地形図としては、入手可能な地形図のうち縮尺 1/60,000~1/10,000 程度のものを用いる。

註 4) Utah

調査飛行はおもに等高線に沿い 50~150 ft の間の一定対地高度で行なわれる。対地高度を一定に保つためには、100ft 以下の場合には操縦士の目測により、100ft 以上の場合には電波高度計による。また峡谷 (Canion) では崖に沿い崖の面から数 10 ft の一定距離で飛行する。飛行速度は 50~75mph である。

飛行中に調査員は記録紙上に川・道路などの著目の目標を通過した位置を記入し、また放射能強度がバックグラウンド・カウントの 3 $\frac{1}{2}$ 以上の値になったときはその位置を地図上に記入する。一度通過しただけでは異常の位置を明瞭に把握できない場合も多いから、通常施回して2度以上異常点を通過する。

調査飛行は払暁から約 3~4 時間、1週間 5日宛実施される。したがつて1機当たり1カ年約 700 時間、約 30,000 line mile 飛行する。通常1調査班に対して2つの調査地を与え、一方が天候が悪くても他方の調査地で飛行できるように計画する。調査の経費は器材の償却費を除外し、燃料費・整備費・俸給等で1機1時間当たり 60\$ 程度であつて、商業機を備い上げ使用する場合の数倍に達する。しかし危険な作業であるので U.S.A.E.C. では経費にかゝらず飛行機を専有して整備に万全を期しているのである。

Colorado Plateau においては多数の鉱床ないし鉱床地帯が空中探査によつて発見されたが、放射能異常が認められたにかゝらず鉱床の露出を発見できなかった場合、逆に鉱床の露出が実在するにかゝらず空中探査によつて放射能異常が認められなかった場合も多い。これらの現象は大いウランおよびその崩壊生成物の地層中の移動の差異によつて説明されている。

過去においては放射能異常地点を地図上に図示して公表する業務が主体であつたが、現在では地質学的・鉱床学的研究に対する資料を蒐集することを目的としているので、多くの場合測定結果は等放射能強度線図 (Isorad Map) として表現される。しかしこの図面は公表されていない。

U. S. Geological Survey における空中探査

U.S. Geological Survey では経常的作業として空中磁気探査を実施しているが、この作業に伴つて同時に空中放射能探査をも行つている。しかし空中放射能探査では対地高度をなるべく一定に保つことが望ましいけれども、空中磁気探査では目的によつては海面上からの高度を一定に保つことが必要であるから、必ずしも同時に2種類の探査が行われるとは限らない。U. S. Geological Survey では Geophysics Branch に Airborne Surveys Section を置いて約 35名の人員をもち、その大部分は Washington D. C. にあるが Grand Junction

Operation Office, U. S. A. E. C. 内にも図化 (Compilation) のための施設を有する。大型機による高高度探査では従来の物理探査ないし地質調査と異なり企画・測定・図化・解析の諸作業がそれぞれ分離して行われる。

空中探査用放射線測定器は Oak Ridge National Laboratory^{註5)} および U. S. Geological Survey により製作されたシンチレーション・カウンターであつて、ヘッドとして直径4", 厚さ2"のNaI(Tl)結晶および5"の増倍型光電管を使用したものを6個使用する。測定器の構成は室内用の計数率計と同様であつて、直線増幅器、積分型波高弁別器・計数率計からなる。計数率計の自記記録計用出力増幅器は2個設けられ、うち1個は電波高度計の出力によつて利得が変化し、自動的に高度補正が行なわれる。なお、計数率計の較正を随時行えるように試験用発振器および標準放射線源を附属する。これらの測定装置の電源はAC 117Vを使用する。

放射線測定器および、空中磁力計のほか、電波高度計・垂直航空写真器を装備している。電波高度計は米軍制式APN-1型である。垂直航空写真器はFred Sonné Camera (Chicago Aerial Camera Co. 製のスリット式写真器)で、ジャイロ装置によつて常に垂直下の地物が連続的に撮影される。また目視によつて大体の位置を決定するため、垂直下を透視する照準鏡を使用する。

これらの各種測定器に対する電源は、飛行機に搭載しているガソリン発動機に直結した直流発電機(28V)を使用する。放射線測定器・試験用発振器に必要なAC 117Vは、さらに変流器により直流から変換される。

調査に使用する飛行機はDouglas DC-3であつて、2機を所有している。1調査班は機長・副操縦士・地点標定員・放射能測定員・磁気測定員各1名を最小限度としている。

調査の企画・実施のために使用する地形図は各種のものが用いられているが、おもに偏歪修整した垂直航空写真“モザイク”を使用する場合が多い。これらの地図上に飛行予定線を引き、予定線にできるだけ忠実にまた対地高度をなるべく500ftに保ちながら約150mphの速度で飛行する。これらの地図の縮尺は1"対1mile(約6.2万分の1)程度である。調査地の単位は多くの場合経緯度15°すなわち約30km四方の広さであつて、東西または南北方向に1/4~2mile間隔の測線をとる。別にこれらの測線群に直角に数本の測線をとる。相接する2つの測線を実際に互に交わらないように飛ぶためには、間隔が1/4mile以上であること、および操縦士が60時間以上の訓練飛行を受けることが必要である。

註5) Oak Ridge, Tennessee

調査飛行は払戻から3~4時間実施し、年間1機当たり約700時間、すなわち60,000 line mile 飛行し、約30,000 mile²を調査する。調査に要する経費は器材の償却費を除き消耗品費・俸給等飛行および図化作業を含めて1mile 当り7~10\$である。民間における空中探査会社による同種探査の経費に較べ約半額であるが、図化作業の能率は民間会社に比較して低い。

図化作業は4~5名1組で次の順序で行われる。

- 1) 垂直空中写真によつて飛行機の航跡を地図上に記入する。
- 2) 測定範囲・零線の異なる測定結果を統一する。
- 3) 測定器の指度の時間的変動を算定して測定結果を補正する。
- 4) 測定結果を地図上の航跡に記入し、等指度線(Contour)を引く。
- 5) 製図・印刷。

図化作業は空中磁気探査については常に行なわれるが空中放射能探査については地質学的に興味のある場合以外に対しては実施されない。図化のための作業員は約25名である。したがつて測定要員の2~3倍に達する。

また空中探査による等全磁力線図は出版されているが、現在では空中探査による放射能異常地点分布図ないし等放射能強度線図は出版されていない。

空中で測定される放射能強度に対する高度補正は半無限体に一樣に放射性物質が分布している場合に対して、飛行中に自動的に行われる。補正が自動的に行われる高度は50~1,000ftであつて、この範囲外の高度では放射能強度と高度との関係が簡単な函数関係から外れる。一樣な半無限体以外の放射線源、例えば点源に対してはもちろん上記の自動補正は成立しない。

空中放射能探査に関する基礎的研究としてγ線の散乱に関する理論的ならびに実験的研究が行われている。実際の探査結果に一応適用できる場合としては、一樣な半無限体の場合に空中放射能強度から岩石のウラン含有量を求める問題および地表に一端を露出する垂直半無限円柱状の鉱床の場合にその品位と半径を求める問題などが解かれた。これらの問題の解決に必要な数値計算の一部はNew York Universityの電子計算機研究室と協同行なわれた。

空中放射能探査によつて発見された放射能異常は、多くの場合鉱床の露出による狭い範囲の異常であつた。しかし近年になつてウラン鉱床に関連するそれほど著しくないが数mile²にわたる異常がみだされた。その一つはRocky山脈東側の変成岩中のウラン鉱床およびその周辺部においてであり、もう一つはTexas州の堆積

岩中に潜在するウラン鉱床およびその周辺部においてである。前者では岩石を採取して分析した結果、異常を示した地域の試料は、異常を示さない地域の試料に対して同種の岩石であるにもかかわらずウランおよびカリウムの含有量が多かつた。

なお、U. S. Geological Survey では Colorado Plateau の地下構造を決定するため原子力関係予算によつて空中磁気探査を実施している。

Geological Survey of Canada における空中探査

Geophysics Division, Geological Survey of Canada では U. S. Geological Survey とほぼ同様な方法で空中探査を実施している。

空中探査用放射線測定器は Physics Division, National Research Council Laboratory で製作されたものであつて、直径 2"、厚さ 4" の Na I (TI) 結晶および 2" の増倍型光電管によつて構成されるシンチレーション・ヘッド 2 個を使用する。このほか、空中磁力計・電波高度計・垂直航空写真器を使用しているが、対地高度変化に対する放射能強度の自動補正は行っていない。飛行機は Canso (空陸両用大型哨戒機) で冬期は飛行しないので機長および副操縦士は臨時的に他の政府機関から配属される。年間約 40,000 line mile を飛行する。

空中磁気探査結果は等磁力線図として図化され出版される。空中放射能探査結果は多くの場合バックグラウンド・カウント (湖水上の値) の 2 倍以上の地域を等磁力線図に記入することによつて表現される。等磁力線図の標準的な縮尺は 1" 対 1 mile である。図化のための作業員は 10 名弱である。

民間における空中探査

民間において依頼により空中探査を行う会社は多数あるが、Aeromagnetic Survey Co. (Tronto, Ontario, Canada), Aero Service Corp. (Philadelphia, Pa., U. S. A. および Ottawa, Ontario, Canada) の 2 社が大きい。この 2 社は Canso, Douglas DC-3, Beachcraft AT-11, Beachcraft D-18 および Anson などの双発機, Sikorsky S-55, Bell 47-G などのヘリコプター, Cesna 170, Cesna 180, Peiper Super Cab 等の軽飛行機等を多数所有して空中磁気探査・空中放射能探査・空中電磁探査等を実施しており、北米合衆国・カナダの地方政府機関ないし民間会社に対してのみならず、イギリス・オーストラリア・中南米・東南アジア諸国等、世界各国の政府機関や民間会社とも契約している。探査方法は U. S. Geological Survey, Geological Survey of Canada において行なわれているものと同様である。

U. S. Atomic Energy Commission で実施している

ような低空探査を行なっている会社ないし個人は多数あつて、その現況は充分把握されていない。

3.2 自動車放射能探査

アメリカにおける自動車放射能探査はおもに U. S. Geological Survey により研究され、実施されたが、現在では全国主要道路の調査を終わり、とくに鉱床学的・地質学的に興味のある地域において研究的に実施している。

放射線測定器は Mount Sopris Instrument Corp. 製 SC-128 型シンチレーション・カウンターである。直径 3"、厚さ 2" の NaI (TI) 結晶および直径 3" の増倍型光電管を用いたヘッド 1 個を自動車 (jeep station wagon) の屋根に取付けて使用している。ヘッドの下部および前後部は厚さ 1/2" の鉛で庶蔽されている。測定器および自記記録計は運転台のダッシュの下に取付けられ、運転者 1 名だけでも調査を行なうことができるようになっていいる。実際に自動車探査は運転者を含め 1~2 名で実施された。そして鉱床の露出による著しい放射能異常を発見することのみを目的とし、調査結果は出版ないし公表されていない。空中探査が容易に行われ、また有効であるため自動車探査技術はほとんど発展しなかつた。

U. S. Geological Survey, Denver では現在でも 15 組の自動車探査用シンチレーション・カウンターを所有し、その大部分は jeep station wagon に一部分は乗用車に取付けられている。自動車探査は独立の調査としてでなく、地質鉱床調査・技術指導のための出張に伴つて簡単に行われる。

U. S. Atomic Energy Commission では自動車探査によつてウラン鉱床地域の精査を研究的に実施している。測定器は直径 7"、厚さ 4" のプラスチック蛍光体を有するシンチレーション・ヘッドを備えた Nucleonic Co. of America 製シンチレーション・カウンターおよび直径 5"、厚さ 2" の NaI (TI) 結晶を有するシンチレーション・ヘッドを用いた Mount sopris Instrument Co. 製シンチレーション・カウンターを jeep station wagon の屋根に取付け、1 mile 以下の間隔をもつ測線によつて放射能強度の測定が行われ、等放射能線図が作製されている。あまり顕著ではない異常が潜在するウラン鉱床に関連するであろうと考えられているが、確実に証明された例はない。

いわゆる自動車放射能探査には属しないが、U. S. Geological Survey ではラドン測定装置を装備したトラック 2 台を所有し、天然ガス坑井のラドン含有量を測定している。現在までに数多くの測定結果が集積されているがウラン鉱床との関連についてはあまりはつきりした

結論は得られていない。測定器は電離函にヴァイブレーション・リード型電気計を結合したものであつて、University of Utah 註6)で設計・製作されたものである。

3.3 地表放射能探査

自動車放射能探査以外の地表放射能探査は地質鉱床調査に伴ない、地質調査員によつて行なわれるのが普通である。したがつて定量的な測定は必ずしも要求されない。定量的な資料は採取された岩石・鉱石の試料についての各種の測定によつて得られる。もちろん、探査の初期においては地表における精密放射能測定が実施された。そして同一地域において多数の試錐孔を掘り、地表下の放射能強度と地表における放射能強度との比較が行われた。また空中放射能探査による測定結果との比較も行われた。

U. S. Geological Survey, Denver の Radiation Laboratory では 1952, 53 年に携帯用シンチレーション・カウンターの研究を行い、増倍型光電管の出力を単一波発生回路に直結し、整形されたパルスを整流して真空管電圧計で指示する型式の回路を完成した。現在アメリカおよびカナダで市販されている携帯用シンチレーション・カウンターはほとんどこの構成に従がつている。

このほか、全強度型の携帯用シンチレーション・カウンターの試作も行われたが、温度変化による指度の変動が大きいため未完成のまま、試作が中止された。前記の型式で充分であると考えられているので、その後新しい型の試作は行われていない。

U. S. Atomic Energy Commission および U. S. Geological Survey では各種の市販携帯用シンチレーション・カウンターおよびガイガー・カウンターを購入し使用している。U. S. Atomic Energy Commission では Electronic Laboratory (Engineering Service Branch, Grand Junction Operation Office 所属)によつて、また U. S. Geological Survey では Radiation Laboratory, U. S. Geological Survey, Denver によつて、すべての携帯用放射線測定器が管理され、関係の国家機関に対して貸出される。これらの Laboratory は電子工学技術者によつて構成され、各種測定器の修理・調整・検定および研究を行っている。

携帯用放射線測定器として各種の製品が使用されているので、測定結果を例えば計数率で表現すると、同じ場所でも異なつた測定器で測れば値は異なる。したがつて測定器による測定値が直ちに比較できるようにするために、U. S. Geological Survey ではラジウムの点源からの一次 γ 線による電離強度すなわち mr/hr 単位によつて携帯用測定器を較正することを勧告した。現在市販され

註 6) Salt Lake City, Utah

ている製品はほとんど mr/hr 単位によつて指示されている。 mr/hr 単位で較正する場合には、被較正測定器を U. S. National Bureau of Standard によつて検定された 1~5 mg 程度の白金カプセル入ラジウムから 1~7 m 離れたいくつかの位置に置いて指度を読み取り、標準ラジウム線源の検定値から計算される mr/hr の値にてできるだけ合うように被較正測定器の目盛を定める。シンチレーション・カウンターの場合には散乱 γ 線の影響が大きいので、一次 γ 線を鉛で遮蔽し、散乱 γ 線による測定値の部分を求めて差引かなければならない。この較正法の偏差は 20% と考えられている。

カナダでは携帯用測定器の較正に対しては特別な勧告は行われていないが、北米合衆国における情勢を反映して最近の市販製品はほとんど mr/hr で較正されている。

Radioactivity Division, Mines Branch, Department of Mines and Technical Surveys で国家機関で使用する携帯用測定器の修理・調整が行われており、その大半がこの Division で製作された。

3.4 放射能検層

Colorado Plateau においては、探鉱試錐に伴ない、地質学的・鉱床学的資料蒐集のため、また鉱量計算のため放射能検層が大規模に行われている。

U. S. Geological Survey による放射能検層

U. S. Geological Survey で現在経常的作業に使用している放射能検層器は U. S. Geological Survey の Radiation Laboratory で製作したものであつて、9 台を所有している。この装置は jeep station wagon ないし小型トラックに積載され、直径 7/8", 長さ 7" の G・M 計数管を使用し、測定器の構成は実験室用の計数率計と同様である。検層器に必要な電源は自動車のエンジンに連結した AC 120V・2.5kW の発電機によつて供給される。ケーブルの長さは 2,000 ft で巻取器は交流電動機によつて駆動される。巻取器の回転と電子管式自動平衡型記録計の記録紙の送りとはセルフ・シンクロナス・モーターによつて連動する。

検層速度すなわちケーブルを引揚げるときの速度は 5 ft/min で計数率計の時定数を 3 sec とする。現在の装置でこの測定条件で 0.01~1.0 % eq. U_3O_8 の鉱床が厚さ 0.5 ft まで検出できる。カーノタイト鉱石および砂で作つた模擬坑井によつて装置を検定し、検層結果によつて直ちに鉱床の品位および厚さが求められる。坑井内にケーシングや坑泥水が存在するときは別の実験資料によつて補正される。しかし、Colorado Plateau のウラン鉱床に対する試錐孔ではケーシングや坑泥水が存在することはまれである。検層班は原則として 1 班 1 名 (自動車の運転

者を含む)で構成される。

現在使用している放射能検層器はいくぶん時代遅れとなつたので、Mount Sopris Instrument Corp. 製 Scintillation Spectrometer SR-300 型を購入し逐次切換えるよう準備を行っている。しかしこの装置に取付けるシンチレーション・カウンター・プローブの型式は決定されていない。またこの装置は Newtron-Gamma 検層・Gamma-Gamma 検層の研究にも使用される予定であるが、これらの検層技術がウラン鉱床の探査に有効であるとは期待されていない。

また山岳地帯の試錐孔で使用するために小型の検層器が U. S. Geological Survey, Denver の Radiation Laboratory で25台製作された。回路構成は携帯用シンチレーション・カウンターと同様であつて増倍型光電管の出力をケーブルのインピーダンスに整合させるためケーブルの両端にトランスを挿入した点が異なるだけである。電流計型自記記録計の送りは坑井口へケーブルを導くために使用されるプーリーの軸に取付けたフレキシブル・ワイヤーによつて連動する。ケーブルの長さは1,000 ft である。これらの検層器は Radiation Laboratory によつて管理され、地質調査員による地質・鉱床調査に際して貸出される。この装置による定量的測定は期待されていない。

U. S. Atomic Energy Commission による放射能検層

Grand Junction Operation Office に9台、Denver Area Office に1台の放射能検層器を所有する。これらのうち3台は電気検層と放射能検層とを同時に行う方式のものである。

放射能専用の検層器は Grand Junction Operation Office の Electronic Laboratory で製作されたもので、直径1 $\frac{1}{8}$ "・厚さ1 $\frac{1}{2}$ "の NaI (TI) 結晶を使用するシンチレーション・カウンターである。装置はすべて jeep station wagon に積載され、自動車のエンジンに直結した AC 120V・4 Amp. の交流発電機が電源として使用される。巻取器は $\frac{1}{2}$ H.P.・15Vの直流電動機により駆動され、直流はセレン整流器により供給される。ケーブルを坑口へ導くために自動車内に取付けたプーリーの軸と電子管式平衡型記録計の送りとはセルシン・モーターによつて連動する。ケーブルの長さは2,000 ft でケーブルに対するインピーダンス整合はトランスによつて行われる。

検層速度は10 ft/min, 時定数 2 sec, 記録紙送り速度は1 in 対 1 ft で、鉱床の厚さに対する分解能は約 0.1ft と考えられる。U. S. Geological Survey, Denver と同様な模擬坑井による検層器の検定も行われているが、検

層結果の解析はおもに岩芯試料の分析値との比較によつて求められた関係を使用する。鉱床の品位および厚さを求めることを目的としていることには変わりない。

U. S. Atomic Energy Commission では原則として放射能検層と同時に電気検層が実施される。電気検層は地層の区分をするために使用され、放射能検層と電気検層とを併用することによつてウラン鉱床の賦存する地層・鉱床の品位および厚さが求められる。Colorado Plateau におけるような堆積岩中の鉱床では一つの鉱床に対して普通多数の探鉱試錐が行われるので、多数の坑井による検層結果から鉱床を賦存する地層の形状・鉱床の品位および形状を推定する。U. S. Geological Survey では放射能検層を物理探査の一つの技術として取り扱っているのに反して、U. S. Atomic Energy Commission では検層技術は地質鉱床調査に直結するものとして取り扱われている。また検層結果によつて求められた鉱床の厚さおよび品位に関する資料は Ore Reserve Branch, Grand Junction Operation Office に送られ、鉱量計算に利用される。鉱量計算では採算のとれない鉱床を考慮にいれる必要はないから、品位0.15% U₃O₈ 以下、厚さ4 ft 以下のものは計算から除外される。

放射能検層および電気検層を同時に行う検層器は Mount Sopris Instrument Corp. によつて U. S. Atomic Energy Commission のために製作されたもので、一つのプローブ内にシンチレーション・カウンター(計数率計・高圧電源を含む)および単極式比抵抗法用電極とを含む。

民間における放射能検層

ウラン鉱床に対する放射能検層は U. S. Atomic Energy Commission あるいは U. S. Geological Survey に類似した方法によつて行われている。

Grant, New Mexico の北方の Ambrosia Lake Area では、1955年に、30年前に試掘された石油に対する探鉱試錐坑井の岩芯試料の放射能測定を端緒として、ウランの大きな鉱床が地表下約 100m に存在することが発見された。こゝでは探鉱は試錐によつて行われる。すなわち1 mile 四方の地域を設定し1,000 ft 間隔の格子点で試錐を行い鉱床賦存の可能性が認められると、さらに200 ft 間隔で試錐を行う。これらの坑井のうち岩芯試料を採取するのは50本に対して1本の割合であつて大部分の坑井では試料は採取されない。岩芯試料を採取しないときには試錐の費用は試料を採取するときの数の1になる。すべての試錐坑井は放射能検層および電気検層によつて調査され、この結果によつて鉱量計算が行われる。直接試錐機や検層器を所有する鉱業権者は少なく、試錐作業や検層作業はそれぞれの専門会社に契約して行われ

る。U. S. Atomic Energy Commission が行っているような放射能および電気検層が 8 cent/ft 程度で請負われている。

U. S. Atomic Energy Commission は地質学的・鉱床学的見地から選択した鉱床地域において民間鉱業権者所有の試錐坑井の検層作業を実施している。この際検層結果(図面)が鉱業権者に送附されるが、調査員がその説明をすることは禁止されている。U. S. Atomic Energy Commission は民間の依頼による調査は行わない。

前記のような自動車に設置されたや、大型の検層器のほか、携帯用放射線測定器に簡単に取付けられるプローブが市販されていて、一般の探鉱者や探鉱技術員によって広く使用されている。

カナダにおいては検層作業の重要性は認められているが、物理探査技術者が少なく検層技術の研究を行う余裕をもたないため、独自の発展はみられない。

3.5 放射能探査以外の物理探査のウラン 鉱物鉱床への応用

重力探査

U. S. Geological Survey では Colorado Plateau 全体の地下構造を決定するため、空中磁気探査とともに重力探査を実施している。重力探査には wordon 重力計を使用し、測点を 1~1.5 mile 間隔にとり、測点の高度は精密気圧高度計によって測定される。高度の誤差は気圧高度の測定の方法によるけれども、多くの場合数 ft 内外である。重力探査および空中磁気探査の結果によって石油坑井から得られた地質学的知見を参考として数理的に Colorado Plateau の地下構造が計算されつつある。しかし成果は公刊されるまでに至っていない。

地震探査・電気探査およびその他の地表物理探査

Colorado Plateau の堆積岩中のウラン鉱床に対して U. S. Geological Survey, Denver および Denver Area Office, U. S. Atomic Energy Commission によって各種の物理探査が実施されている。

U. S. Geological Survey の Ground Surveys Section の大部分が Denver におかれ、探査用地震計 2 台、電気探鉱器・シュミット型磁力計・電磁探鉱器・重力計各数台を所有している。探査用地震計のうち 1 台は旧式の屈折用で他の 1 台は G. S. I. 製の反射用小型 24 成分の装置である。

Denver Area Office, U. S. Atomic Energy Commission では探査用地震計 2 台、電気探鉱器数台を所有している。探査用地震計のうち 1 台は旧式の屈折用で他の 1 台は Houston Technical Laboratory 製の反射用小型 24 成分の装置である。

電気探鉱器はいずれもそれぞれの実験室において製作

されたものである。地表がきわめて乾燥しているので、硫酸銅溶液による電極を用い比較的低い周波数の矩形波交流 (0~30 cycle) によって比抵抗測定を行っている。通常直流と 30 cycle 交流との両方で比抵抗測定を行う。両方の測定値が異なる場合には地層が抵抗のほか容量をもつと考えている。このような現象は堅い細粒の砂岩中に硫化鉄鉱が存在する場合に認められ、瀝青ウラン鉱が硫化鉄鉱と共存することがある。

U. S. Geological Survey, Denver の Physical Properties Laboratory では岩芯試料に矩形波電流を流し、試料中を流れる電流波形の崩れをブラウン管オシロスコープで観測して、同様な結論を得ている。

しかし地表物理探査は一般に十分な成果をあげているとは認められていない。試錐作業が比較的容易であるため、探鉱試錐の経費が比較的低廉であることにもよると思われる。

物理検層

放射能検層以外の物理検層としてはおもに電気検層が行われている。U. S. Atomic Energy Commission および民間物理探査会社ではおもに単極法による比抵抗法および自然電位法を実施しており、U. S. Geological Survey では Well Instrument Development Co. 製 Widco ZDM-141 などにより各種電気検層法を実施している。これらの電気検層は前述のように堆積層の区分をするために用いられている。Colorado Plateau では乾燥して坑井水を含まない坑井が多い。乾燥した坑井では坑壁に押付けられるように作られた特種な電極を使用する。

3.6 地化学探査

U. S. Geological Survey では地化学探査の研究が行われ、現場で岩石、土壌中の U, V, Mo, Se, Cu, Co および Nb などを分析する方法が考案された。ウランの分析には一種のペーパー・クロマトグラフ法が用いられ、1 gr の試料でウラン含有量 4~400 ppm が定性的に測定できる。

U. S. Geological Survey, Denver の Geochemical Exploration Section では格子分光器を積載したトラック 1 台および地化学探鉱用トラック数台を所有し、現場において上記以外の各種の元素の分析も行っている。分光分析用トラックは 30 種以上の元素の半定量分析を 1 日約 20 試料程度行うことができる。

Denver Area Office, U. S. Atomic Energy Commission および U. S. Geological Survey, Denver では協同でまたそれぞれ独立して地表水ないし地下水のウラン含有量の分布とウラン鉱床との関係を研究している。水のウラン分析はおもに実験室で行われる。したが

つて輸送中におけるウランのいわゆる老化現象をさけるために酸を加えて pH を 1.0 だけ下げようとしている。かなり多くの研究者がウラン鉱床に対する概査ないし地域調査として地表水のウラン含有量の分布の測定が有効であることを主張している。

3.7 ウランおよびトリウムの分析

放射能測定による分析

U. S. Atomic Energy Commission および U. S. Geological Survey において核原料物質探査作業中に採取されたすべての岩石・土壌・鉱石の試料は 100 mesh に粉碎して雲母端窓型 G・M 計数管によつて β 線強度の測定が行われる。 β 線強度の測定値は瀝青ウラン鉱を輝緑岩 (diabase) に適当な割合で混ぜて作った標準試料による測定値と比較してウラン当量 (U_3O_8 eq.) で表わされる。4, 2, 1, 0.5% U_3O_8 に調製した標準試料 (standard samples for counting equipment) が New Brunswick Laboratory, U. S. Atomic Energy Commission 註 7) から 1 組 4 個各 100gr につき 10\$ で市販されている。放射能測定によつて 10~20gr の試料を用いて最高 10% U_3O_8 eq. 最低 0.001% U_3O_8 eq. 程度の測定ができる。通常、1つの試料につき 5 分間測定を行う。この場合測定限界は 0.01~0.02% U_3O_8 eq. で、測定器 1 台、測定員 1 名で 1 日 30~40 個の試料を処理できる。

放射能測定による U_3O_8 eq. の値は必ずしも化学分析によるウランの含有量と一致しない。試料中に含まれているウラン系元素が放射能平衡にない場合も多いし、ウラン系元素とともにトリウム系元素が含まれている場合もあるからである。したがつて U. S. Atomic Energy Commission では 0.03% U_3O_8 eq. 以上、U. S. Geological Survey では 0.01% U_3O_8 eq. 以上の試料ならびに地質鉱床調査員からとくに要求のあつた試料はすべて化学分析によつてウラン含有量が決定される。そして放射能測定による % U_3O_8 eq. と化学分析による % U_3O_8 との比は探鉱上の重要な因子と考えられている。すなわちウラン鉱床の周辺部から中心部に向かつてこの比が変化してゆく現象が認められている。また、U. S. Atomic Energy Commission の Ore Buying Station (鉱石買上所) でも両方の測定を行つて買上価格の決定をしている。

U. S. Geological Survey では、NaI (Tl) 結晶を使うシンチレーション・カウンターによる γ 線エネルギーの分析によつて、ウラン系およびトリウム系元素がいずれも放射能平衡にある場合にウランおよびトリウムの分

析を行う方法を研究した。この方法によると放射性鉱物の場合には数 10mg の試料によつて、鉱石 (1.0~0.1% U_3O_8 eq.) の場合は 0.5gr の試料によつて 2 チャンネル各 30 分の測定でウラン・トリウムの分析が可能である。岩石 (0.001~0.0001% U_3O_8 eq.) の場合には 100~200 gr の試料を用いる。この程度の試料ではカリウムの γ 線の影響が認められるから、3 チャンネルを用い各 2 時間の測定でウラン、トリウムおよびカリウムの分析ができる。

カナダにおいては Radioactivity Division, Mines Branch, Department of Mines and Technical Surveys において別の方法が研究され、各国家機関で実施されている。雲母端窓型 G・M 計数管による β 線強度の測定およびシンチレーション・カウンターによる γ 線の測定を同時ないし次々に行い、2つの測定値からウラン系元素の平衡・非平衡にかかわらずウランの含有量を求める。トリウムの有無はシンチレーション・カウンターによるエネルギー分析によつて判定する。この方法によつて 0.005% U_3O_8 , 0.01% ThO_2 まで測定できると称している。もちろんウラン系元素がはなはだしく平衡からはずれているときは正しいウランの含有量は求められない。しかしおもにこの方法でウラン含有量を求め、必ずしも化学分析を実施しない。これは北米合衆国では探査の初期にはほとんどすべての鉱床が 2 次鉱床であつたけれども、カナダでは最初から 1 次鉱物鉱床が発見されたという事情を反映していると考えられる。

ウランおよびトリウム化学分析

岩石・鉱石試料のウランの化学分析には U. S. Geological Survey で研究された蛍光光度計による方法が用いられている。この方法による感度のよい蛍光光度計も U. S. Geological Survey で研究、製作された。現在では 2, 3 の製品が市販されている。蛍光法によると 0.1~0.2 gr の固体試料を用いて 0.00001~0.2% U_3O_8 , 100~500 cc の液体試料を用いて 1 ppb までの分析が可能である。また蛍光光度計 1 台、作業員 1 名によつて 1 日 20 個の試料、蛍光光度計 1 台、作業員 3 名によつて 1 日 80~100 個の試料を処理できる。0.0001% U_3O_8 程度以下の分析には試薬・器具の汚染に充分注意しなければならないので、それ以上の含有量を有する試料の分析と分離して行われる。

ウランの含有量が多い場合には比色法や容量法などが用いられる。U. S. Geological Survey の研究によると、容量法では 1~5 gr の固体試料を用いて 0.05~10% U_3O_8 の分析が可能であり、比色法では 1~5 gr の固体試料を用いて 0.01~0.5% U_3O_8 の分析が可能である。

New Brunswick Laboratory, U. S. Atomic Energy

註 7) New Brunswick, New Jersey

Commission では 0.01~100 % U_3O_8 あるいは 2~10 % ThO_2 を含む鉱石の数種類の分析方法を標準化して公表している註8)。New Brunswick Laboratory, U. S. A. E. C. からは分析用標準試料4種類が一般に販売されている。1種類 100gr につき 2.50\$ である。分析用標準試料はまた U. S. National Bureau of Standard からも販売されている。

岩石中に含まれている微量のトリウムの分析方法は U. S. Geological Survey で研究され、有機色素を用いて分光光電光度計によって比色する方法が実施されている。分析者1名によつて6個の試料が3日間で処理される。

U. S. Geological Survey ではこのほか、X線螢光法によるウランおよびトリウムの分析法および質量分析装置によるトリウムの分析法が研究され、それぞれ相当な成果をあげているが経常的作業としては実施されていない。

カナダではおもに北米合衆国と同様なウランの分析法が実施されている。 Rn^{220} (トロン)の放射能を測定してトリウムの分析を行う方法が Radioactivity Division, Mines Branch で標準化され、各国家機関でトリウムの分析法として実施されている。

ウランの壊変生成物の分析

U. S. Geological Survey, Denver では放射能測定によるウラン含有量と化学分析によるそれとが異なるときは、崩壊生成物の分析を行つて、どのように放射能平衡が崩れているかを調査している。この方法は化学的分離と α 線シンチレーション・カウンターを用いる半減期の測定と吸収体によるエネルギー分析を組合せたもので、

0.1~0.5 gr の 0.02% U_3O_8 eq. 以上を含む固体試料の Th^{230} , Ra^{226} , Rn^{222} , Pb^{210} および Ra^{228} 含有量の測定が可能である。この分析の結果を用いて2次鉱物の生成年代が計算される。

上述の方法では含有量が低い場合の測定が困難なので、 Rn^{222} (ラドン)の α 線の測定による Ra^{226} (ラジウ

ム)の分析が U. S. Geological Survey で行われている。U. S. National Bureau of Standard で標準化された電離箱を用いる方法で Ra^{226} 最低 10^{-14} gr 含む試料まで測定できる。

3.8 鉱物分離

U. S. Geological Survey, Washington; U. S. Geological Survey, Denver および Grand Junction Operation Office, U. S. Atomic Energy Commission には鉱物分離のための設備が設けられているが、大規模な作業は行われていない。一般に鉱石の品位が良好であるため、特殊な研究の目的で鉱物試料を分離する以外にはあまり必要でないと思われる。実際に Grand Junction Operation Office の鉱物分離設備はほとんど使用されていない。鉱物分離では重液による選別と Frantz Isodynamic Separator による選別とがおもに行われ、比較的多量の試料を処理する際にはテーブルによる選別も併用される。

U. S. Geological Survey, Denver では上記の周知の分離法のほか、超音波を利用した分離を行つてよい結果を得ている。

Geological Survey of Canada も同様な設備を有する。こゝでは Isodynamic Separator のほか Super Panner がよく使われているようである。

3.9 粉碎作業

U. S. Geological Survey, Washington; U. S. Geological Survey, Denver; Grand Junction Operation Office, U. S. Atomic Energy Commission および Geological Survey of Canada では岩石・鉱石試料を粉碎するための設備を有する。

各機関とも作業過程は同様で、jaw crusher により数 10mesh 程度に粉碎し、pulvilizer によつて 100 mesh 程度に粉碎する。さらに細かく粉碎する必要があるときは hammer mill を使用する。粉碎後は試料容器を回転することによつて試料をよく混合し一様性をよくする。U. S. Geological Survey, Denver では jaw crusher 2 台、pulvilizer 4 台を使用し、3名の要員で年間約 25,000 件、約 80,000 lb の試料を処理し、1件当りの費用は約 30\$ である。

註 8) Manual of Analytical Methods for Determination of Uranium and Thorium in Their Ores, 1955