

核燃料の探査

Exploration Techniques for Uranium

角 田 晴 信*
Harunobu Sumida

1 はじめに

核燃料として使われる元素はウラン、プルトニウム、トリウムである。このなかでプルトニウムは原子炉内でウラン(^{238}U)から転換して生ずるものであり、トリウムはその利用技術開発が遅れているため現在需要は少ないことから、核燃料探査は実質的にウラン探査を意味するといえる。

さて1981年12月で世界の原子力発電設備は266基1億6千万kWに達した。その中の主流を占める軽水炉に必要な天然ウラン量が100万kW級で年間227トンであることから、極めて大ざっぱに見積れば年間4万トン弱の天然ウラン U_3O_8 が消費されていることになる。さらに2億3千万kWが建設中であることからこれらの完成時には10万トン/年のウランが必要となってくる。ところで自由世界のウラン資源埋蔵量は200万トン程度と評価されている¹⁾。これが今後の原子力発電計画に見合うほど充分であるかどうか議論のあるところであるが、長期的視野に基づく探査努力が必要であると考えられる。

2 探査法の分類

ウラン探査法について国際原子力機関(IAEA)が1972年に発表した資料によれば次の様な分類になっている²⁾。

- (1) 地質調査
- (2) 地表放射能測定(携帯用GMカウンター, シンチレーションカウンターを用いる探査)
- (3) トータルカウントカーボン(車輦に取り付けた全計数型放射能測定器を用いる探査)
- (4) トータルカウントエアボン(航空機に搭載した全計数型放射能測定機を用いる探査)

- (5) 携帯用およびカーボンガンマ線スペクトロメーターを用いる探査
- (6) エアボンガンマ線スペクトロメーターを用いる探査
- (7) 土じょう中のラドン測定
- (8) 河川水, 湖沼水中のラドン測定
- (9) 河川および湖沼の堆積物の地化学探査
- (10) 土じょうの地化学探査
- (11) 水理地化学探査
- (12) 植物を利用する探査
- (13) 放射能探査を除くその他の物理探査(地震重力, 磁気, 電気, 電磁の各探査法)
- (14) 探鉱試錐ならびに検層(放射能および電気検層)

物理探査法についてみると, 検層やラドン法を含めて放射能測定に関係ある方法とそれ以外の物理探査法にわけるのが普通である。

放射能探査は探査が始められた頃からの主要な役割を果たしており, 世界のウラン鉱床の大部分は放射能探査によって発見されたといっても過言ではあるまいと思われる。一方その他の物理探査法は従来あまり利用されていなかったようである。けれども最近の傾向として一般の物理探査法への関心も徐々にではあるが深まりつつあり, 利用されるケースが増えている。これは露頭探査の時代が終り, 潜頭鉱床探査の時代, それも地表下数百米の深部を探査する時代になったことを示している。

3 ウラン探査の経緯

ウランの探査は実質的には第2次大戦後に始まったとみてよい。戦後37年が経過し現在も先進各国を中心に探査活動が続けられているが, ブームといわれる程盛んに探査が行なわれた時期が2度あった³⁾。

最初は大戦後の冷戦状態を背景とした軍備競争の激化によって起り, 1950年代始めに探査活動のピークに達し米国, カナダ, 南アフリカ等で大鉱床が発見さ

* 動力炉・核燃料開発事業団中部探鉱事務所探鉱技術開発班長
〒509-51 岐阜県土岐市景町定林寺字園戸959-31

れた。そして鉱山が開発され、生産が急上昇する一方
で国際緊張の緩和による軍需の飽和によって、1959
年の4万3千トンの生産をピークとしてブームは終息
した。

さて1955年第1回原子力平和利用国際会議で原子
力発電が提唱されて以来、原子力発電の利用が徐々に
進んだが、その過程においてもウランの供給過剰の時
代が続いていた。けれども1973年の第1次石油ショ
ック以降ウラン価格が急騰しそれまで6 USドル/ポ
ンド付近で安定していた価格が1978年には40ドルを
超えた。こうした状況に対応するかのように米国、カ
ナダ、フランス、西独、日本、オーストラリア等各国
が探査活動を拡大し、1979年に2度目のピークに達
した。そして同年スリーマイル島の事故以来米国の原
子力発電所建設にブレーキがかかる一方、世界景気の
停滞による原油値下り傾向に歩調を合せてウラン価格
が低落し、現在ピーク時の半値になったため、過熱と
もいえたブームは去った感がある。

国内における探査についてみれば、1954年(昭和
29年)初の原子力予算の成立にしたがって、工業技
術院地質調査所によって始められた。そしてエアボ
ンやカーボン放射能探査が行なわれ、人形峠(岡山
県)や東濃(岐阜県)の鉱床が発見された⁴⁾。

1956年原子燃料公社が設立され地質調査所と平行
して探査を開始した。原子燃料公社は1967年動力炉・
核燃料開発事業団となったが、引続きウラン探査を進
め現在に至っている。

探査法としてはカーボンが最も積極的に行なわれ
た。そして露頭発見の手がかりを得て地質調査や試錐
探鉱に進み鉱床を明らかにしてゆく過程で電気探査法
(比抵抗法)や地震探査法(主に屈折法)、ラドン法等
の物理探査法も利用された。又当時発展しつつあった
強制分極法の適用試験が人形峠および東濃の鉱床上で
行なわれた。

石油ショック以降動力炉・核燃料開発事業団でも探査
の規模が拡大されると共に、海外の探査に重点が移っ
てきた。カナダ、オーストラリア、西アフリカ等にお
いて広大な地域を対象にしてエアボーン探査が行なわ
れた。そしてエアボーンで発見した放射能異常に対し
カーボンや携帯用放射能測定器による精密調査や地
質調査を行ない最後に試錐に至る。こうした基本的な
探査のプログラムに一般の物理探査法を取入れ、探査
の効率化に役立てようとする考え方が徐々に現実のも
のとなってきた。例えば西アフリカにおいて重力探査、

電気探査、ラドン法等が行なわれ、将来地震反射法も
計画されている。オーストラリアでは地震、重力、磁
気、強制分極、ラドンの各方法が行なわれた。カナダ
ではエアボーン放射能、磁気、電磁法を組み合わせた調
査を実施し、地上磁気探査やVLF(電磁法の1種)も
精密調査に利用された。

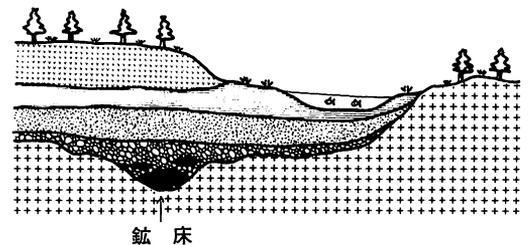
4 ウラン鉱床の特徴と物理探査法

物理探査では探査の対象の物理的性質が異なること
を利用するが、ウラン鉱床の最大の特徴は放射線を放
出する点にある。したがって各種の放射能探査によっ
て鉱床の地表における露出部すなわち露頭を発見でき
る。放射線には α 線、 β 線、 γ 線があるが、そのなか
でも最も透過力の大きい γ 線(X線と同じ電磁波で波長
はX線より小さい)でも岩石厚さ30cm、表土80cm程
度で遮蔽されるので潜頭鉱床は発見できない。

ラドンはウランの娘元素の一つで不活性気体である
が、地下の鉱床から地表部へ拡散、移動する。このラ
ドンガスが放出する α 線(ヘリウム原子核)を測定し
ラドンガスの濃集点を見出すことで潜頭鉱床発見の手
がかりが得られる。

ウランが濃集して鉱床を生成する機構が重要である。
世界的にみてウラン鉱床には様々の型があるが、代表
的に物理探査の対象となっている砂岩型と不整合関連
型といわれる鉱床がある。

砂岩型はアメリカのコロラドやワイオミングを主要
な産地とし、我国やニジェールにも類似の鉱床が存在
する。この型の鉱床は鉱床を胚胎する地層が中～粗粒



- 凡例
- 玄武岩
 - 泥岩
 - 砂岩
 - 礫岩
 - 基盤岩
 - 鉱体

供給源となった岩石から風化
溶脱され地下水によって運ば
れたウランが適当な地球学的
条件のもとで基盤構造の凹部
に濃集されたもの。

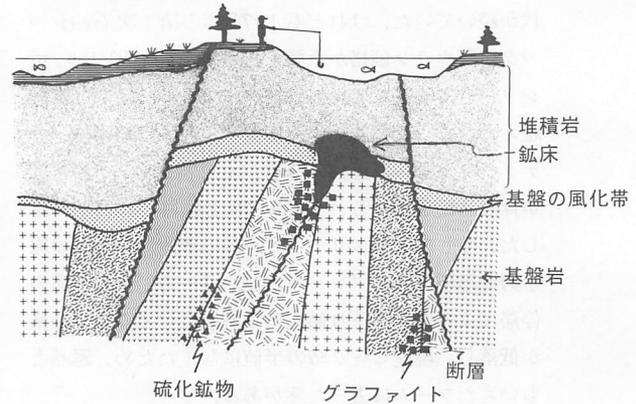
図-1 基盤岩のチャンネル構造に規制された鉱床の
概念図

の砂岩や一部は礫岩よりなり、鉍床の位置や形が古い河川の流路であるチャンネルに規制されているという特徴がある。それは酸化環境で6価のイオンとして水に溶けたウランが地下水によって運ばれ、透水性の砂岩層を通過してゆく間に炭質物や黄鉄鉱に富む還元環境で還元され、ウラン鉍物として固定され鉍床が生成されるからである。又チャンネルばかりでなく断層や破碎帯も同様に地下水の通路としてしばしば鉍床を規制する。それでチャンネル構造、断層や破碎帯、黄鉄鉱を多く伴う鉍床が物理探査の対象となる。

不整合関連型鉍床はカナダのアサバスカ地域やオーストラリアのアリゲーターリバー地域に大鉍床が発見されている。この型の鉍床は鉍床を胚胎する地層の多くが下部原生代（20億年以前）の変成岩類で、鉍化作用は基盤岩と堆積岩の境界である不整合面直下に限られている。又断層の影響をうけており、鉍床の近傍にグラファイト（石ぼく）や硫化鉍物がしばしばみられるという特徴がある。この型の鉍床の成因とされる有力な説は、20億年以前は大気中にまったく酸素が含まれていなかったためウラン鉍物は安定しており、濃

集して風化残留鉍床を形成したが、その後の大気中の酸素の増加にしたがって徐々に酸化されて地表水に溶け、断層や破碎帯を通過して地下に入り還元されて鉍床を作ったというものである。

それで基盤構造や断層の探査、グラファイトや硫化鉍物の存在に着目した探査が行なわれる。以上のことは表1にまとめられる。



不整合面上部に起因するウランが不整合面下部よりもたらされた熱水の影響やその他の適当な地球科学的条件によって不整合面付近に濃集されたもの。

図-2 不整合関連型鉍床の概念図

表1 ウラン鉍床探査に用いられる地球科学的探査法

探 査 法	探 査 目 的 ・ 対 象
放射能探査法	
(1) エアボーン	露頭、転石等地表付近の放射能異常
(2) カーボーン	同 上
(3) マンボーン	同 上
(4) ラドン法	潜頭鉍床に起因するラドンガス異常
地球化学探査法	岩石、土壌、湖底堆積物、自然水、植物中のウラン含有量およびウランと共存する元素の定量
地球物理探査法	
(1) 重力探査法	地質構造（主として基盤の構造）
(2) 磁気探査法	地質構造（特定の鉍物やそれを含む地層）
(3) 電磁気探査法	硫化鉍物、グラファイト、断層、破碎帯
(4) 電気探査法	
① 比抵抗法	基盤構造
② I P 法	硫化鉍物、グラファイト、粘土鉍物
(5) 地震探査法	
① 屈折法	地質構造
② 反射法	地質構造、岩質、岩相変化
(6) 検 層	
① 放射能検層	ウラン胚胎層の層厚および品位
② 自然電位検層	堆積岩の区分
③ 比抵抗検層	同 上

5 探査法の概要

5.1 エアボーン

探査を始める場合、文献調査等により地質学的検討を行なって探鉱鉱区を設定取得した後、まずエアボーン調査が行なわれる場合が多い。この理由はエアボーンが広い鉱区において放射異常の分布を迅速かつ経済的に調査し得る点にある。さてγ線は空気中を数百米透過して航空機に積んだγ線スペクトロメーターで測定される。

岩石や土じょう中のγ線源はウラン、トリウム、カリウムの3種がある。

ウラン...²³⁸Uの壊変系列

トリウム...²³²Thの壊変系列

カリウム...⁴⁰K (カリウムの同位元素で1.46 MeVのエネルギーをもつ)

ウランおよびトリウムの壊変系列のγ線スペクトルは数百KeVから2.7 MeVの間に種々の娘元素から放出されるいくつかのエネルギーのピークをもっている。これらのピークのなかで図-3にみられるようにカリウムの1.46 MeV、ウラン系列のビスマス(²¹⁴Bi)1.76 MeV、トリウム系列のタリウム(²⁰⁸Tl)の2.62 MeVのピークを測定する。このように各チャンネル毎で測定することで放射能異常がU、Th、Kのうちのどの元素に関連したものであるかがわかる。又広いエネルギー巾のトータルカウント測定によって総合的な地質情報が得られる。これらの4チャンネルのデータは色々

な手段(放射能異常のリスト、コンター図、プロフィール等)で表現される。

5.2 ラドン法

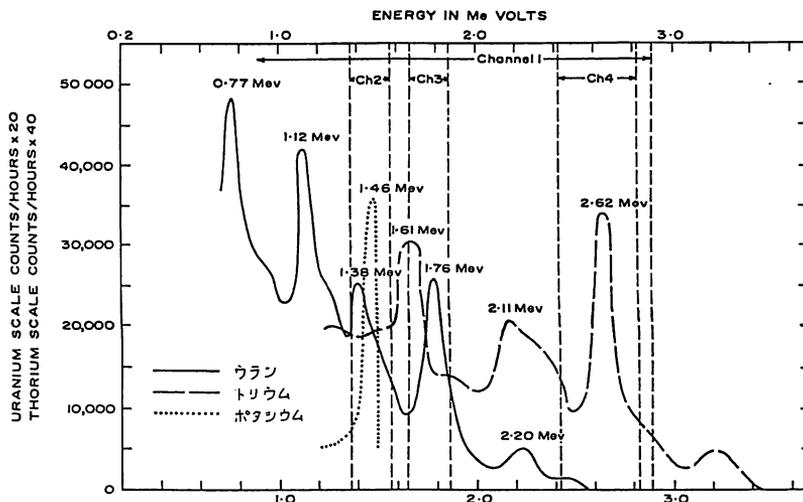
既に述べたようにγ線は数十cmの表土や岩石によって遮蔽されるので通常の放射能探査は殆んど露頭や転石の発見に限られる。ラドン(²²²Rn)はウラン(²³⁸U)の壊変系列の6番目の娘元素で不活性ガスであり、壊変してポロニウム(²¹⁸Po)となる際にα線を放出するが、このラドンガスが地下の鉱床から地中の空隙を通過して地表付近に移動する。

測定法はいくつかの種類があるがα線を検出できるプラスチックフィルムを用いるアルファトラック法と硫化亜鉛シンチレータを用いるエマノメータ法等がある。アルファトラック法はフィルムを小さなカップの内底にセットして地表下約50 cmに埋設し、数週間から1ヶ月の一定期間経過した後回収し、特殊なエッチング液で処理しα線の飛跡の数を読みとる。

エマノメータ法は地中にパイプで孔をあけ、地中のラドンを含むガスをポンプで吸引しシンチレータ内に導く。シンチレータ容器内には硫化亜鉛が塗布されており、α線が当たるとパルス状の光を発生し、これを光電子増倍管で電気信号に変えて計測する。

5.3 地化学探査法

ウランが酸化されて水に極めて容易に溶解、移動するという性質は重要で、現在知られているウラン鉱床の大部分は地表水又は地下水から沈澱したと考えられている。それで自然水や土じょう中のウラン濃度を測



PART OF THE ENERGY SPECTROGRAMS FOR THE URANIUM AND THORIUM DECAY SERIES AND THE 1.46 MeV POTASSIUM PEAKS (Based on U.K. Atomic Energy Authority A.E.R.E. Report EL/R2696)

図-3 ガンマ線エネルギースペクトル

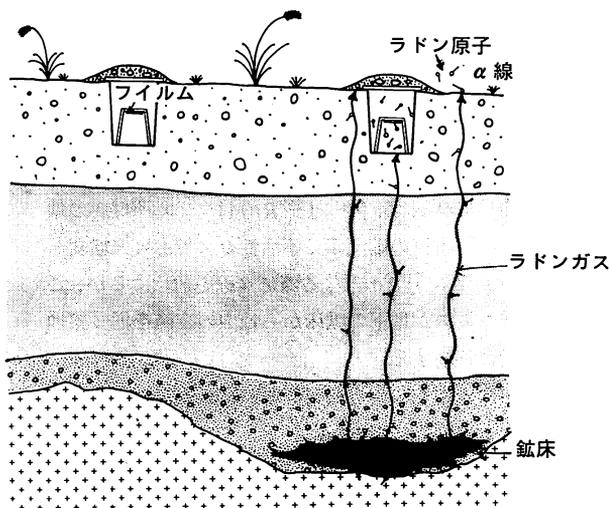


図-4 アルファトラック法概念図

定する。自然水では普通沢水や井戸水を対象にする。国内では河川の平均ウラン含有量は0.02～0.03 PPb (1 PPbは10億分の1)であり、0.5 PPb以上あれば明瞭な異常値とされる。有名なコロラドのウラン鉱床地帯では2 PPb程度で高い値を示している。なお海水中のウラン含有量は約3 PPbである。固体蛍光法やフィッシュトラック法はこうした極微量のウランの定量法である。

5.4 一般の物理探査法

ここでは放射能探査を除く物理探査法について簡単にふれる。

空中磁気探査は空中放射能探査と同時にこなされる場合が多い。空中磁気探査は各種岩石のもつ帯磁率や残留磁気の差異を反映した空間の磁力分布を測定することによって基盤構造や磁性岩体の分布を調査する手段である。測定器は主としてプロトン磁力計が用いられ、測線間隔は1～2 Km, 対地高度100～150 m, 飛行速度150～250 Km/Hである。

空中電磁法は一般に高品位硫化金属鉱床の探査や比抵抗分布図作製に用いられているが、ウラン探査では鉱床が断層や破碎帯、グラファイトを含む地層等導電性の地質に規制されている場合に利用できる。電磁法は原理的にコイルあるいはループを流れる電流によって発生させた交流一次磁場が、地中の導電帯に誘導電流を生じ、これによる二次磁場を測定するもので、いくつかの周波数の組合せ、送受信コイルの組合せ、外部送信源を利用するVLF法、過渡現象を利用するINPUT法など多種類の手法が利用されている。

地上物理探査では重力、磁気、電気(比抵抗法およ

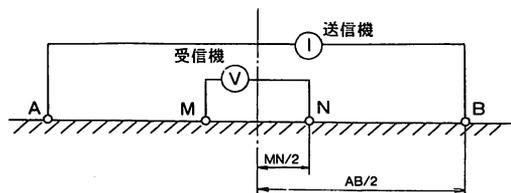


図-5

びIP法)、電磁(主としてVLF法)、地震(屈折法および反射法)の各方法がある。

国内では比抵抗垂直法と地震屈折法がしばしば実施された。これは堆積型ウラン鉱床が基盤構造やチャンネルに規制されていることから、その構造を調査するためである。比抵抗垂直法は最近海外でもしばしば行なわれている。この方法は図-5に示すように電流電極(A, B)および電位電極(M, N)が測点を中心に対称に配置される。(A, B)を通して電流を流し(M, N)の電位差を測定する。ABおよびMNを順次拡大してゆく。例えば堆積岩と基盤岩に比抵抗の差異がある場合、その境界深度がわかるので各測点のデータを総合し基盤の形状が求められる。

地震探査は石油探査の主要技術であるが、近年高分解能反射法の進歩によって石炭やウラン鉱床など、地下数百メートルの比較的浅い所を対象にした小規模構造の精密調査が行われるようになった。反射法は地表付近でダイナマイト等で衝撃を与え、生じた弾性波が地中を伝わり地層の音響インピーダンス(密度と弾性波速度の積)の異なる境界で反射し戻ってくるのを地表の受振器で測定するもので、データは磁気テープに記録された後コンピューターで処理される。

高分解能反射法では取扱う弾性波の周波数は100 Hz以上で、受振点間隔も5～10 mである。

ミニソーンは震源として従来のダイナマイトの代りに土木工事に用いるランマーを用いる高分解能反射法探査機であり、近年注目されている。ランマーの打撃のエネルギーは弱いので、数多くの打撃のデータを重ねることで反射波成分を強め、かつ各打撃の時間間隔を極めて短かくできるので測定時間も少なくすむ。

IP法(Induced Polarization 強制分極法)は斑岩銅鉱床のように硫化銅鉱物や黄鉄鉱が鉱染状に存在する対象に有効な探査法である。国内でも各種の金属鉱床に適用されたが、ウラン鉱床については人形峠や東濃の鉱床に対し適用性試験が行なわれた。IP法は大地に電流を流した際、金属鉱物と周囲の電解液との境界に分極が生じ、これが電流を切った際過渡電圧とし

て現われるのを測定するものであり、ウラン鉱物がしばしば黄鉄鉱を含む炭質物と共存することから、この方法の適用性がある。

地上電磁法のうちVLF法がカナダ、アフリカで利用されている。VLFというのはVery Low Frequency、大変低い周波数の意味で波長10 km以上、周波数30 KHz以下の電磁波を意味するが、このVLFの送信局が世界各地に十数ヶ所あって、対潜水艦交信用の強力な電磁波を日夜送信している。この電磁波を利用する探査法がVLF法と呼ばれる。地下に導電性の物体があれば電磁場に乱れが生ずるがVLF法では磁場の状態を測定する。この方法は測定が容易で費用も大してかからないことから、地質マッピングの補助手段として、ウラン鉱床を規制する断層や破碎帯、変質帯の探査法として利用されている。

重力探査法は岩石密度の差異によって生じた地表の重力分布を探査する方法である。一般に堆積岩は基盤を構成する火成岩や変成岩に比べて密度が低いので、堆積盆地では周辺よりも重力値が小さくなる傾向を示す。又重力図は空中磁気図と同様探査の基本図としても利用される。

5.5 試錐と放射能検層

地質構造の探査を主目的とする構造試錐ではコア(岩芯)を採取するコア試錐を実施し、採取した岩芯について地質学的検討を行なう。コアを採取しないノンコア試錐はしばしば経費的に極めて有利であるため、ある程度地質が把握された地域内で鉱床探査を目的として実施される。

いずれの試錐においても掘削終了後放射能検層を実施する。

放射能検層は試錐孔中にプローブ(放射線を検知するシンチレータと電気回路を内蔵している)を入れ、孔壁周辺部の放射性鉱物を調査するもので、得られたデータ(検層図)から鉱化帯の品位や層厚を推定する。放射能検層と組み合わせて電気検層を行なう場合が多い。電気検層は比抵抗とSP(自然電位)を測定するが、岩相変化を反映した情報が得られる。

図-6では放射能異常のあるところで自然電位が負の側へ変化し、比抵抗が極めて増加しており、この付近に地層の境界があることを示している。

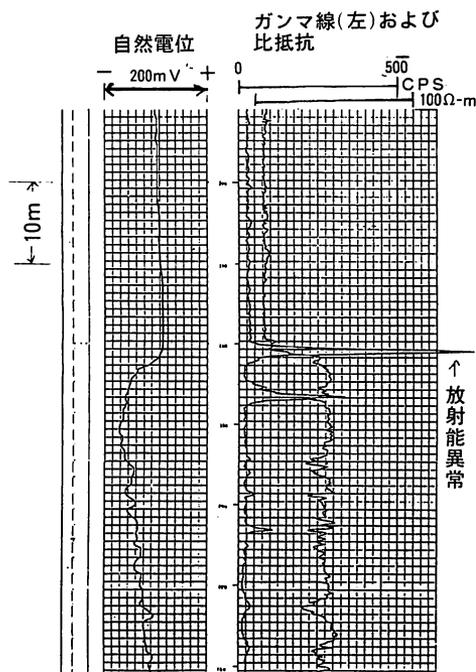


図-6 放射能および電気検層図

6. おわりに

ウラン探査技術について、物理探査法の利用を中心に述べた。これらの方法が一層役立つためには、対象とするウラン鉱床および周囲の母岩の物理的性質や特徴について、多くの情報、知識を集積することが重要であると考えられる。今後の発展を期待したい。

参考文献

- 1) 林昇一郎, 世界の核燃料資源開発の現況, 日本原子力学会誌, Vol 22, No 9 (1980)
- 2) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Uranium Exploration Methods (Proc. Panel, Vienna, 1972), IAEA, Vienna (1973)
- 3) 動力炉・核燃料開発事業団, ウラン資源 (1980).
- 4) 物理探鉱技術協会, 最近における物理探鉱の進歩, 20周年記念 (1968).