

## 報 文

553.495 : 553.26 : 550.835+553.495 (521.13) : 553.26 : 550.835

### 小型放射能検層器ならびに放射能検層による放射性鉱物鉱床の品位・ 鉱量の推定と宮城県大内地区における物理検層

佐 野 凌 一\*

#### A Portable Gamma Ray Logger and the Estimation of Grade and Ore Reserves in Radioactive Deposit with Reference to the Logging at Ouchi District, Miyagi Prefecture

by  
Shun-ichi Sano

#### Abstract

Variations of the distribution of gamma ray intensity in drill hole, with length of detector, thickness of radioactive bed and diameter of hole, were discussed.

A portable gamma ray logger was constructed for the prospecting in mountain regions and specially the diameter of scintillation detector is only 30 millim.

A method estimating thickness of horizontal ore bed and grade of ores was obtained from theoretical calculation utilizing a constant determined by experiment in drill hole. Moreover, the area between counting rate curve and base line on radioactivity log is proportional to the product of grade and thickness, independently of drill hole diameter and logging speed. Therefore, the ore reserves may be estimated rather easily and mean grade are calculated when proper value of thickness is given.

Gamma ray logging and electric logging were conducted in four drill holes at Ouchi district, Miyagi prefecture, where concentration of uranium had been discovered in carbonaceous substances. Feeble radioactivity anomalies were recognized in all drill holes, but mean grades are only 0.002 % equivalent uranium.

#### 要 旨

わが国のウラン鉱床の調査に相当していると考えられる小型の放射能検層器を試作した。この検層器の製作にあたって、検出器の有効部分の長さ、水平層の厚さと、坑井の直径とによつて、 $\gamma$ 線強度分布がどのように変わるかを検討した。

今回製作された小型放射能検層器は検出器プローブの外径が 30 mm のシンチレーション・カウンタで、乾電池を電源とするだけで深度に連動した自記記録ができる。

上記の理論的な検討における計算と、模型坑井による実験の結果とを使つて、水平層状の鉱体の層の厚さと品

位とを求める方法を示した。さらに、検層曲線と零線との面積が、坑井の直径や検層速度と無関係に、品位と層の厚さとの積を表わすことを示した。したがつて、平均品位や鉱量はむしろ容易に求められる。これらの方法を人形峠鉱山における検層曲線に適用して、その実用性を確かめた。

小型放射能検層器によつて、宮城県大内地区において放射能検層を実施し、微弱な放射能異常を認め、その平均品位を 0.002 % eU 程度であると推定した。これらの異常は炭質物を含む泥岩中にみられ、一部は微細粒砂岩中に存在する。電気検層を大部分の試錐孔について実施したが、全部の試錐孔について実施すれば、異常を示す地層の解釈に有力な資料を与えるものと思われる。

\* 物理探査部

1. 緒言

核原料資源調査の進展に伴い、ウラン鉱床の調査に必要な放射能検層器の製作および検層技術の研究が行われてきたが、昭和33年度においては、ウラン鉱床に対する試錐調査に伴って、一応ルーチン作業として放射能検層ならびに電気検層を実施する段階に至った。

本稿では、小型放射能検層器およびそれによる検層作業について、宮城県大内地区における物理検層の作業および結果を引用して説明する。

大内炭鉱は宮城・福島両県境付近の花崗岩を基盤とする堆積層中に胚胎する亜炭を稼行している。この亜炭層ないし周辺の地層にウランが含まれていることが、東北大学選鉱精錬研究所岡教授によつて発見され、さらに本所須貝貫二によつて、大内炭鉱事務所付近の亜炭層露頭において放射能異常が発見され、分析の結果ウランによるものであることが明らかとなつた。

大内炭鉱の炭質物中におけるウランの濃縮の発見の経過、大内炭鉱およびその周辺の地質・鉱床などについては、菅野<sup>2)</sup>・須貝他<sup>3)</sup>の論文が発表されている。

大内地区における検層作業には、筆者のほか、高木慎一郎・畑瀬安彦が参加し、電気検層を担当した。また岡山県人形峠鉱山における放射能検層の研究には、金谷弘が参加した。

検層曲線と地質柱状図との対比については、河野迪也に負うところが多い。また放射能検層の研究にあつて、とくに人形峠鉱山における測定および模型坑井の利用について、原子燃料公社探鉱部中村試錐課長および同人形峠出張所久保探鉱係長、その他同社の関係の方々から種々の便宜を受けた。厚く感謝の意を表す次第である。

2. 小型放射能検層器

2.1 水平層によるガンマ線強度分布

放射能異常を示す地層が薄い場合に、この地層を明瞭に検出するためには、有効部分が小さい検層器を用いるのがよいと考えられる。この問題を理論的に取り扱う。

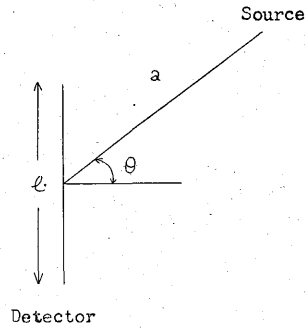
点状ガンマ線源と点状検層器との距離を  $r$ 、途中の媒質の吸収係数を  $\mu$  とすると、 $\gamma$  線の減衰は

$$(1 + \alpha\mu r) e^{-\mu r / r^2} \quad (1)$$

に比例すると考える<sup>4)</sup>。ただし  $\alpha$  は散乱の常数である。有効部分の長さ  $l$  である線状の検層器を考え、その各部分の感度は等しいとする。この検層器の指向性、すなわち点源による  $\gamma$  線強度の角分布  $I(\theta)$  は、

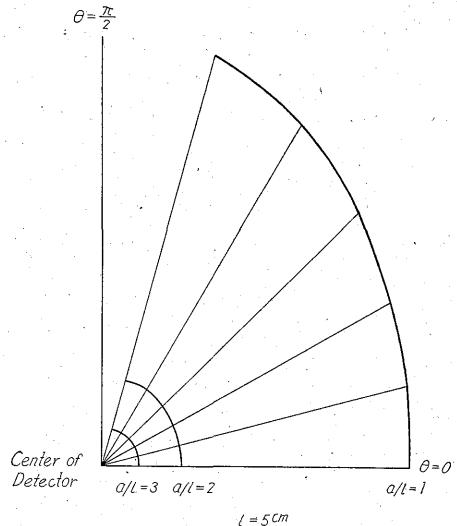
$$I(\theta) \propto \frac{\sec \theta}{4\pi a} \tan^{-1} \left( \frac{al \cos \theta}{a^2 - l^2/4} \right) \quad (2)$$

である。ただし、 $a$  は検層器の有効部分の中心と点源と



第1図 線状検層器  
Line detector

の距離、 $\theta$  は検層器と点源とを含む平面上で、検層器の有効部分の中心を通る垂線と検層器の有効部分の中心および点源を通る直線とのなす角である。 $l=5\text{ cm}$  のときの  $I(\theta)$  の計算値を第2図に示す。 $a=3l$  程度になるとこの検層器は実際上等方的になる。



第2図 線状検層器の指向性 (計算値)  
Calculated directional character of line detector

簡単のために、坑泥水もケーシングも存在しない鉛直な、直径  $d$  の試錐孔が、無限に続く厚さ  $\Delta z$  の放射性物質を含む水平層を貫いていると考える。この水平層中で放射性物質の含有量、例えばウラン当量 (eU) で表現される品位  $\sigma$ 、吸収係数  $\mu$  および散乱の常数  $\alpha$  が一定であるとする。 $\mu$  および  $\alpha$  は、上下の  $\sigma=0$  である地層においても、一樣で、かつ同じ値を取るものとする (第3図参照)。

上記の検層器がこのような試錐孔の中心を通る場合の  $\gamma$  線強度の分布  $I^L$  は、検層器の有効部分の中心から放射性物質を含む層の中心までの鉛直距離を  $z_0$ 、検層器の有効部分上の1点のその中心からの距離を  $\xi$  とすると

(i)  $z_0 + \xi > dz/2$

$$\begin{aligned}
 I^L = & (1+\alpha) (I_0\sigma/2\mu) \left\{ \int_{\tan^{-1}\{d/(2z_0+2\xi-dz)\}}^{\pi/2} \int_{-l/2}^{l/2} [\exp\{-\mu(z_0+\xi-dz/2-d \cot \theta/2) \sec \theta\}] \sin \theta d\theta d\xi \right. \\
 & \left. - \exp\{-\mu(z_0+\xi+dz/2-d \cot \theta/2) \sec \theta\}] \sin \theta d\theta d\xi \right\} \\
 & + \int_{\tan^{-1}\{d/(2z_0+2\xi-dz)\}}^{\pi/2} \int_{-l/2}^{l/2} [1 - \exp\{-\mu(z_0+\xi+dz/2-d \cot \theta/2) \sec \theta\}] \sin \theta d\theta d\xi \\
 & + \alpha (I_0\sigma/2\mu) \left\{ \int_{\tan^{-1}\{d/(2z_0+2\xi-dz)\}}^{\pi/2} \int_{-l/2}^{l/2} [\mu(z_0+\xi-dz/2-d \cot \theta/2) \exp\{-\mu(z_0+\xi-dz/2-d \cot \theta/2) \sec \theta\}] \right. \\
 & \left. - \mu(z_0+\xi+dz/2-d \cot \theta/2) \exp\{-\mu(z_0+\xi+dz/2-d \cot \theta/2) \sec \theta\}] \tan \theta d\theta d\xi \right. \\
 & \left. - \int_{\tan^{-1}\{d/(2z_0+2\xi-dz)\}}^{\pi/2} \int_{-l/2}^{l/2} \mu(z_0+\xi+dz/2-d \cot \theta/2) \exp\{-\mu(z_0+\xi+dz/2-d \cot \theta/2) \sec \theta\} \tan \theta d\theta d\xi \right\}
 \end{aligned} \tag{3}$$

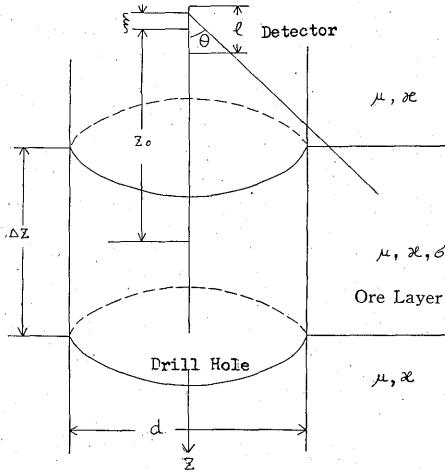
(ii)  $z_0 + \xi \leq dz/2$

$$\begin{aligned}
 I^L = & (1+\alpha) (I_0\sigma/2\mu) \left\{ \int_{\tan^{-1}\{d/(2z_0+2\xi+dz)\}}^{\pi/2} \int_{-l/2}^{l/2} [1 - \exp\{-\mu(z_0+\xi+dz/2-d \cot \theta/2) \sec \theta\}] \sin \theta d\theta d\xi \right. \\
 & \left. + \int_{\tan^{-1}\{d/(2z_0+2\xi-dz)\}}^{\pi/2} \int_{-l/2}^{l/2} [-\exp\{-\mu(z_0+\xi-dz/2-d \cot \theta/2) \sec \theta\}] \sin \theta d\theta d\xi \right\} \\
 & - \alpha (I_0\sigma/2\mu) \left\{ \int_{\tan^{-1}\{d/(2z_0+2\xi+dz)\}}^{\pi/2} \int_{-l/2}^{l/2} [\mu(z_0+\xi+dz/2-d \cot \theta/2) \exp\{-\mu(z_0+\xi+dz/2-d \cot \theta/2) \sec \theta\}] \right. \\
 & \left. \times \tan \theta d\theta d\xi \right. \\
 & \left. + \int_{\tan^{-1}\{d/(2z_0+2\xi-dz)\}}^{\pi/2} \int_{-l/2}^{l/2} [\mu(z_0+\xi-dz/2-d \cot \theta/2) \exp\{-\mu(z_0+\xi-dz/2-d \cot \theta/2) \sec \theta\}] \tan \theta d\theta d\xi \right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

ここで、 $I_0$ は検出器および放射性物質の性質によつて決まる常数である。地層の厚さが無限大になると、上式はきわめて簡単になり、

$$I^L = (1+\alpha) I_0\sigma/\mu \tag{5}$$

であつて、試錐孔の直径  $d$  に無関係になる。 $\mu=0.1 \text{ cm}^{-1}$  および  $0.2 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha=0$  および  $1$  として計算した結果を示すと第4~6図のようになる。

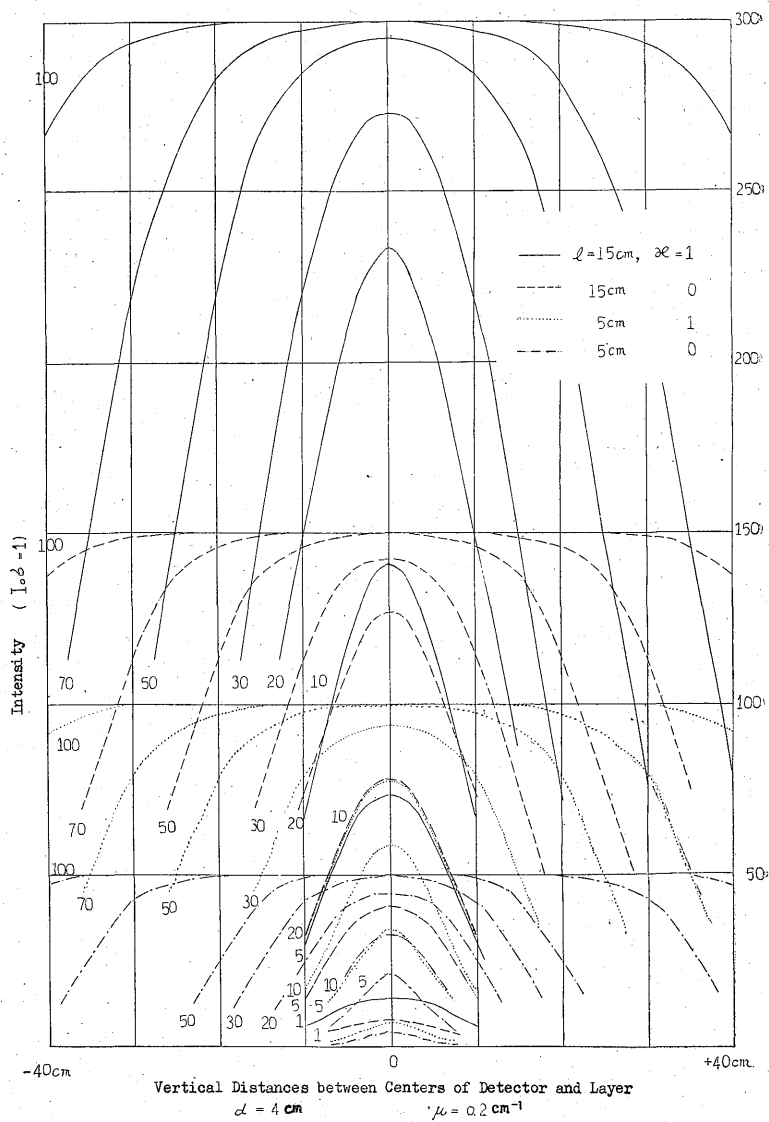


第3図 鉛直試錐孔と水平層  
Horizontal ore layer and vertical drill hole

第4図は検出器の長さについて  $l=5 \text{ cm}$  と  $15 \text{ cm}$  の場合を比較したもので、 $d=4 \text{ cm}$ 、 $\mu=0.2 \text{ cm}^{-1}$  および  $\alpha=0$  および  $1$  とした。第5図は吸収係数について  $\mu=0.1 \text{ cm}^{-1}$  と  $0.2 \text{ cm}^{-1}$  の場合を比較したもので、 $d=4 \text{ cm}$ 、 $l=5 \text{ cm}$  および  $\alpha=0$  および  $1$  とした。また第6図は試錐孔の直径について  $d=4 \text{ cm}$ 、 $6 \text{ cm}$  および  $8 \text{ cm}$  の場合を比較したもので、 $l=5 \text{ cm}$ 、 $\mu=0.2 \text{ cm}^{-1}$  および  $\alpha=1$  とした。 $\gamma$ 線強度は検出器の有効部分の単位面積当りの感度が等しいとして、すなわち  $I_0\sigma=1$  として計算してある。

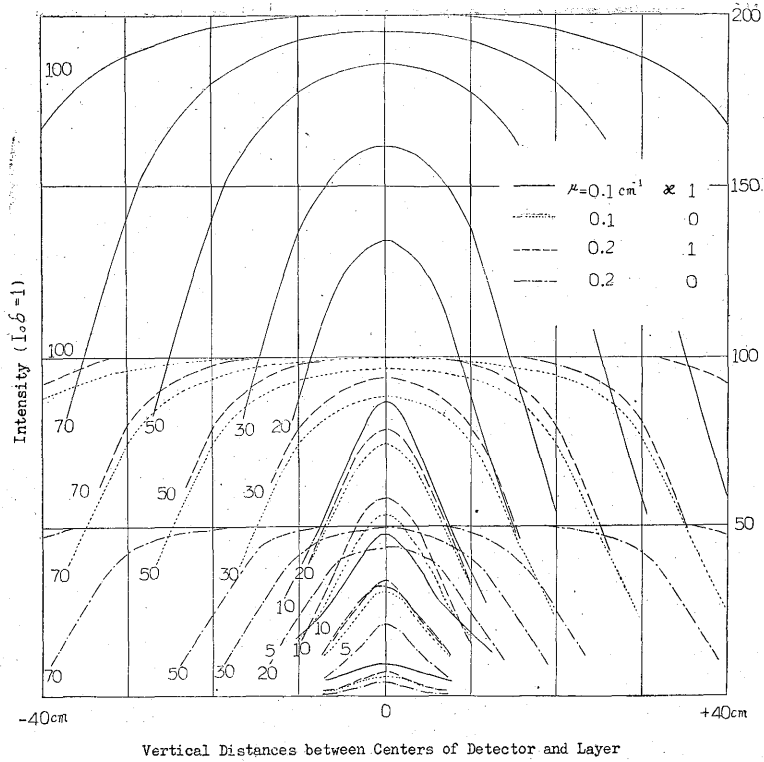
これらの計算結果を見易くするために、水平層による  $\gamma$ 線強度の変化のピークの形の特性を示す量として、半値幅と極大強度の厚さ無限大の層の強度に対する比を採用する。半値幅とは、極大強度の半分になる2つの位置の間隔である。これらの2つの量と層の厚さとの関係を第7図ないし第10図に示した。ここで、 $\mu=0.1 \text{ cm}^{-1}$  および  $0.2 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha=0$  および  $1$  とし、 $\mu=0.1 \text{ cm}^{-1}$  の場合には  $l=5 \text{ cm}$  および  $15 \text{ cm}$ 、 $\mu=0.2 \text{ cm}^{-1}$  の場合には  $l=5 \text{ cm}$ 、 $15 \text{ cm}$  および  $30 \text{ cm}$  とした。また  $d=4 \text{ cm}$ 、 $6 \text{ cm}$  および  $8 \text{ cm}$  の3つの場合について計算した。

層が厚い時は半値幅は層の厚さに等しいが、薄くなると半値幅は層の厚さより広くなり、遂には、層の厚さに対して半値幅がほとんど変化しないようになる。すなわ

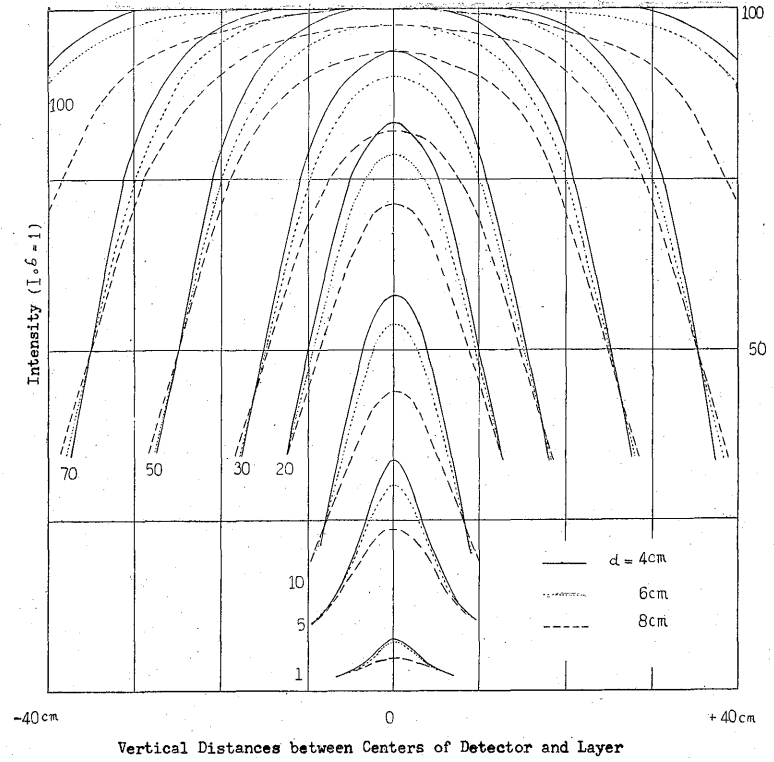


Figures beside Curve mean Thickness in cm.

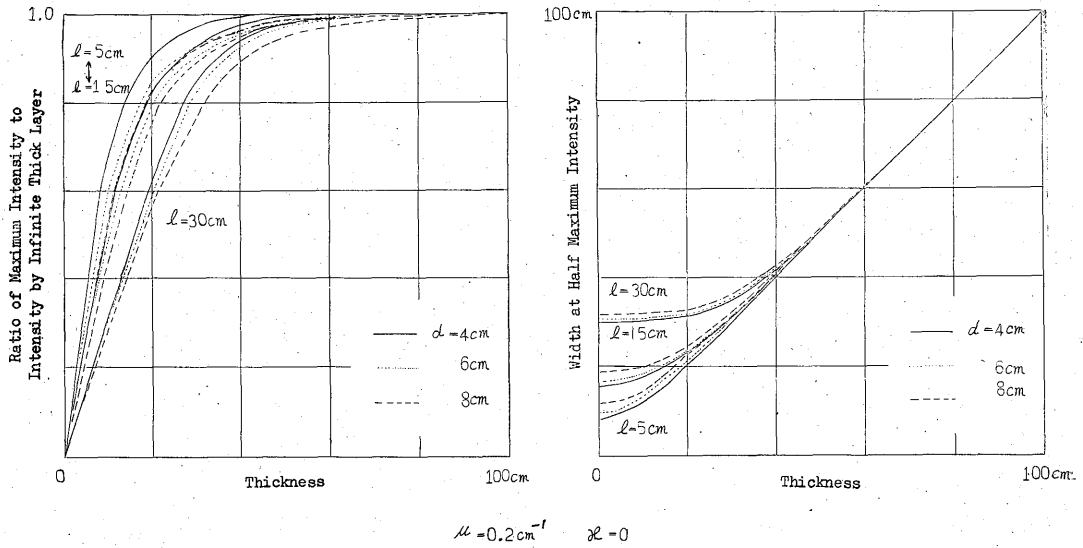
第4図 試錐孔内の水平層によるγ線強度分布 (I)  
 Response curve for horizontal layers of various thicknesses (I)



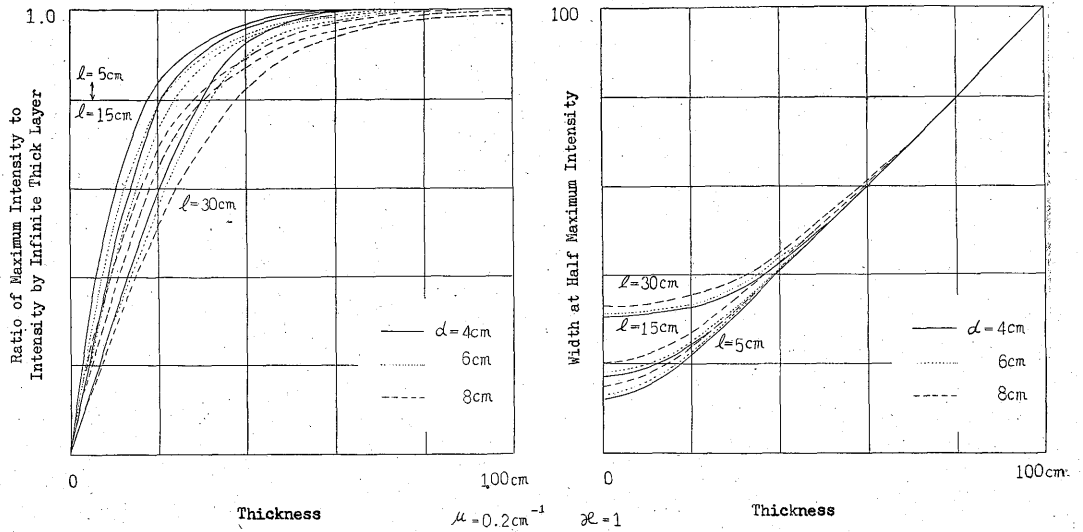
第5図 試錐孔内の水平層による $\gamma$ 線強度分布 (II)  
Response curve for horizontal layers of various thicknesses (II)



第6図 試錐孔内の水平層による $\gamma$ 線強度分布 (III)  
Response curve for horizontal layers of various thicknesses (III)



第 7 図 水平層による  $\gamma$  線強度分布の特性 (I)  
Characteristics of response curve by horizontal layer (I)

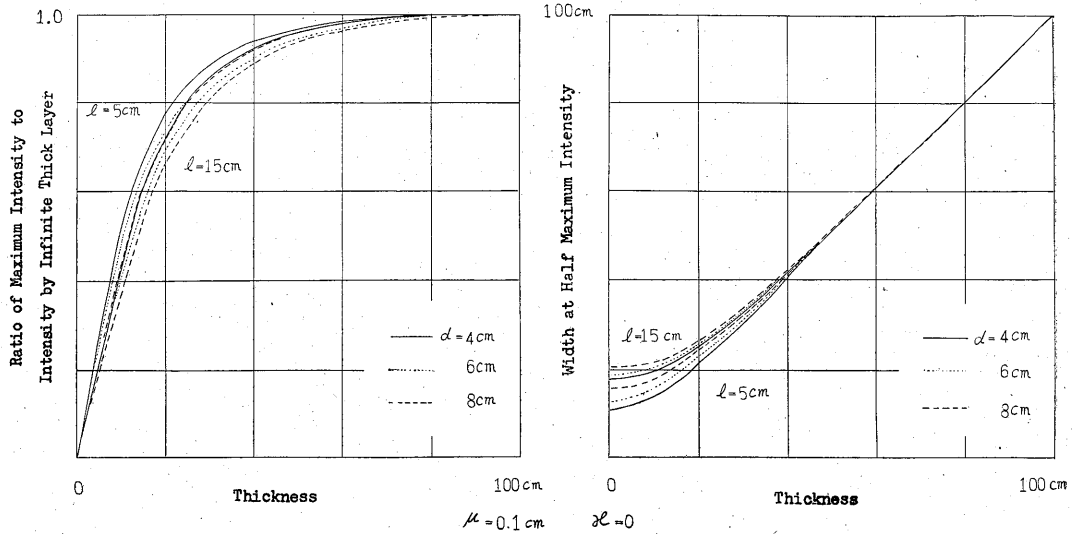


第 8 図 水平層による  $\gamma$  線強度分布の特性 (II)  
Characteristics of response curve by horizontal layer (II)

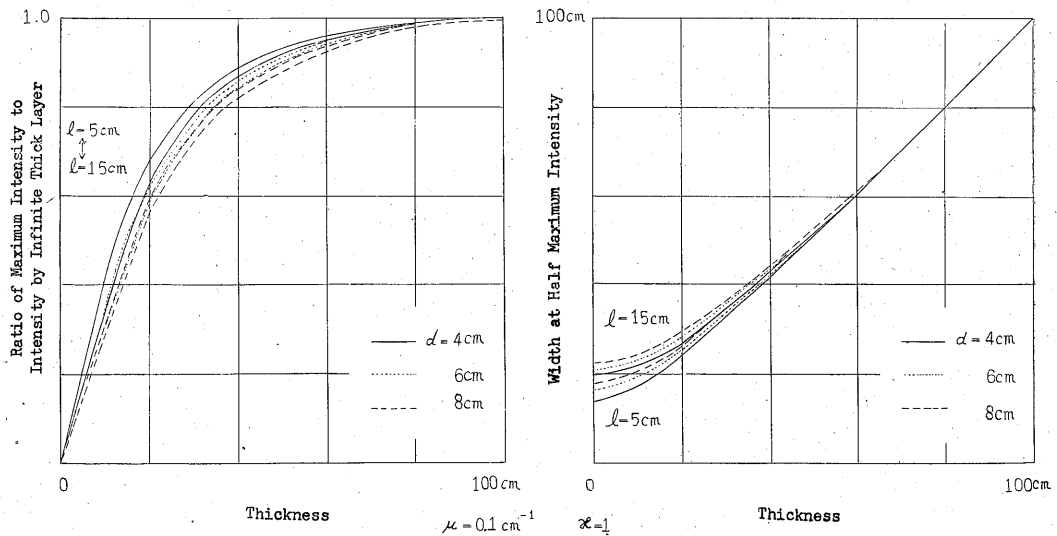
ち薄い層に対しては半値幅はその厚さに対応しない。この傾向は試錐孔の直径に関係し、試錐孔に直径が大きいほど半値幅の最小値は大きい。検出器の有効部分の長さについてみると、半値幅と層の厚さとの関係は  $l=30\text{cm}$  の場合は他の場合に較べて著しく異り、半値幅の最小値は検出器の有効部分の長さにはほぼ等しい。ところが  $l=15\text{cm}$  および  $5\text{cm}$  の場合の半値幅と層の厚さとの関係の差異はあまり著しくなく、半値幅の最小値は検出器の有効部分の長さよりかなり大きい。すなわち、試錐孔の直径の影響が大きくなり、検出器を小さくしても薄い層

の検出に対してあまり有効でないことが認められる。

こゝでは、無限に続く水平層を考えているが、実際に試錐孔を中心として層がどの程度続いていれば無限に続くのみならずよいかということ、(3)および(4)式の被積分関数の  $\theta$  による変化の状況などによつて推定することができる。細かい考察は省略して結論だけを述べると、無限に続く場合の  $\gamma$  線強度の 95~90% を与えるような層の拡がりは無限に続く場合と同等であるとすれば、試錐孔を中心として直径 1.5~1.0m の範囲までに拡がっていればよい。したがつて、實際上、大い



第9図 水平層による $\gamma$ 線強度分布の特性 (III)  
Characteristics of response curve by horizontal layer (III)



第10図 水平層による $\gamma$ 線強度分布の特性 (IV)  
Characteristics of response curve by horizontal layer (IV)

体は無限に続くものとして取り扱つてさしつかえないといふことができる。

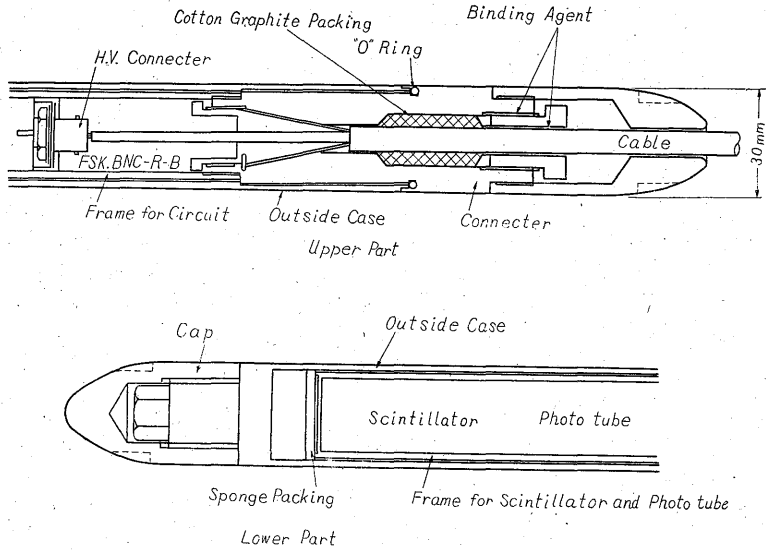
## 2.2 小型放射能検層器

わが国のウラン鉱床は、人形峠鉱山のような堆積型鉱床であつても山岳地帯にあるので、小型で携帯に便利な放射能検層器が要求される。また金属鉱山での試錐、とくに坑道内での試錐では直径 40 mm 以下の試錐孔が掘さくされるので、検出器プローブの直径は 30 mm 程度であることが必要である。なお、岩石の種類による放射能強度の相違を測定して地質鉱床学上の資料を得るためには、感度のよいシンチレーション・カウンタを用いる

ことが望ましい。

このような要求から、“小型放射能検層器”と呼ばれているものを試作した註1)。検出器としてシンチレーション・カウンタを使用した。光電子増倍管には外径が 3/4" の Du Mon't K 1382 (6953) を使用し、螢光体には NaI(Tl) の 1/2 "φ×2" のものを用いた。螢光体の直径が小さいため、感度があまり落ちないように比較的長い

註1) 検出器プローブ、地上用測定器(レートメータ・電流増幅器)は理化学研究所が、ケーブルは日本電線株式会社、また深度連動装置は塚本精機株式会社製作した。

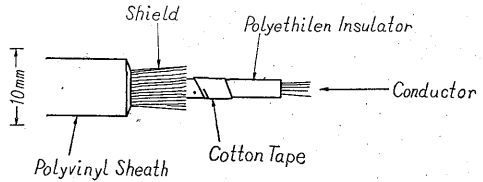


第11図 検出器プローブの構造  
Detector probe

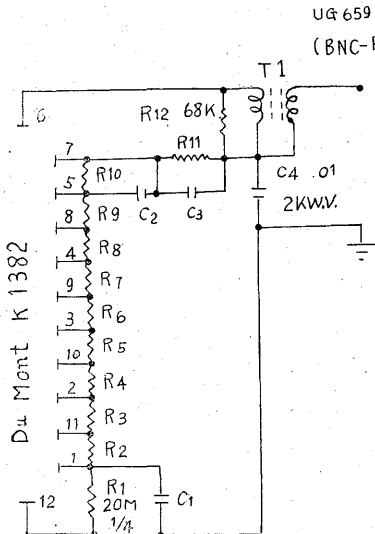
ものを用いたが、前節の考察によれば薄い層の検出に対してもさしつかえない。プローブの外径が小さいので、検出器出力のケーブルへの整合はパルス・トランスを用いた。

ケーブルは高周波ケーブルに類似の構造をもつ坑張強度の強いものを特別に製作した。長さは200mで、破断荷重は約1.5tである。プローブの構造を第11図に

回路図を第12図に、またケーブルの構造を第13図に示す。浅い試錐孔の測定を目的としているので、ウインチを用いない。



第13図 ケーブルの構造  
Structure of cable



R2~R11 10M 1/4  
C1~C3 .002

第12図 検出器回路  
Circuit diagram of detector

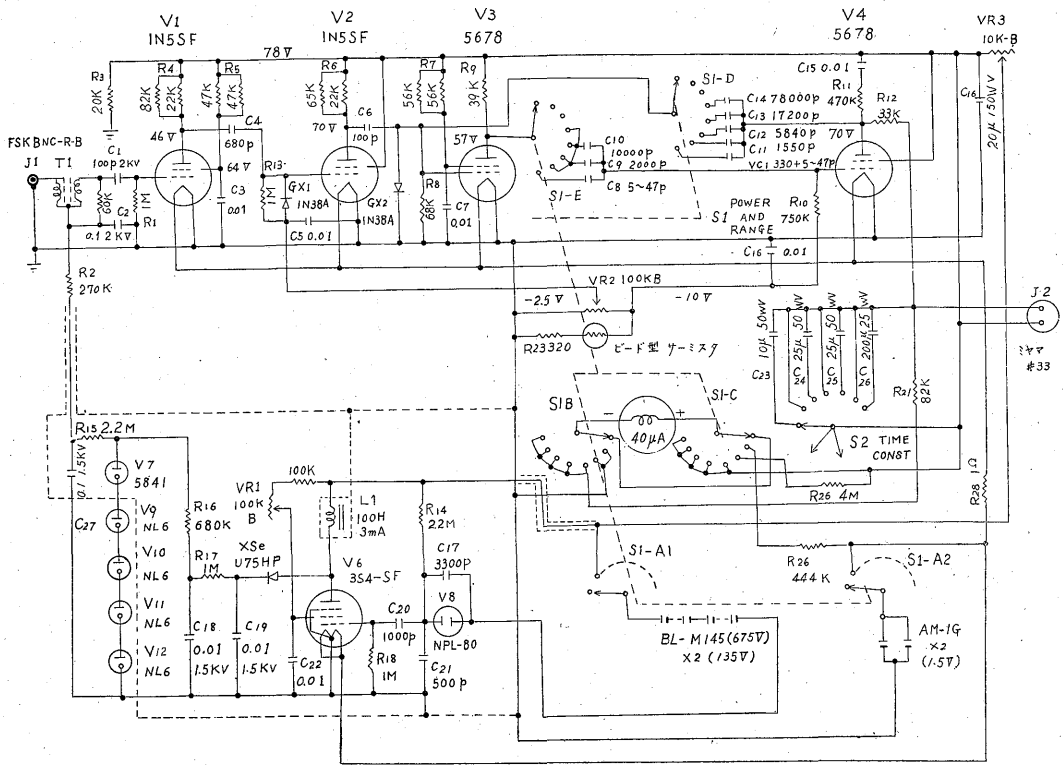
地上用測定器のうちレートメータは放射線サーベイメータと同様なものであつて、理研シンチメータを改造したものである。その回路図を第14図に示す。記録計を駆動するために、カソード・ホロアによる電流増幅器を用いる。その回路図を第15図に示した。記録計はペン描式電流計で、フルスケール1mA、内部抵抗1.4kΩである註2)。

ケーブルを掛けた滑車の回転をフレキシブル・シャフトによつて記録計に伝達し、この回転によつて記録紙が送られるので、記録紙の長さは試錐孔の深度に比例する。記録の縮尺は1/630, 1/315, 1/157, 1/78.7 および1/39.4になる。縮尺が簡単な数にならないのは、記録計がヤード・ポンド法で長さを表わすように作られているためであるが、今後は縮尺を簡単な整数比となるようにし、また直交型の記録計註3)とする予定である。深度

註2) Esterline Angus Co. Model AW-CPAX

註3) Texas Instruments Inc., Single recti/riter





第14図 レートメータ回路図  
Circuit diagram of rate meter

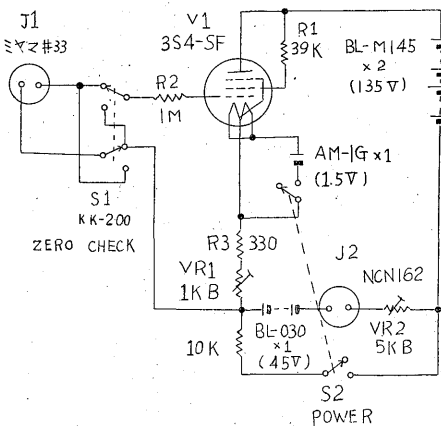
連動装置の見取図を第16図に示す。

### 2.3 小型放射能検層器の特性

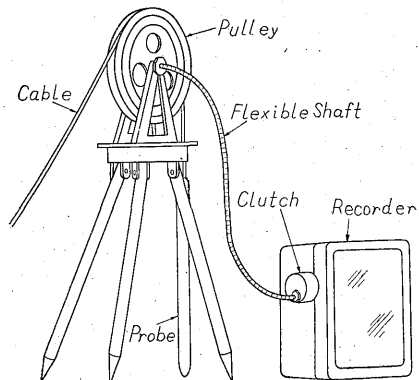
検層用プローブの指向性を第17図に示す。放射線源として Ra を用いた。蛍光体の中心より上部では 2.1 で計算した結果と定性的に一致する。定量的に一致しないのは、実際の蛍光体は無限に細いものではないため、またそのためにエネルギー感度の相違の影響などがあるため

であると思われる。下方ではプローブ容器が厚いので、指向性は容器の吸収によって支配されていると考えられる。

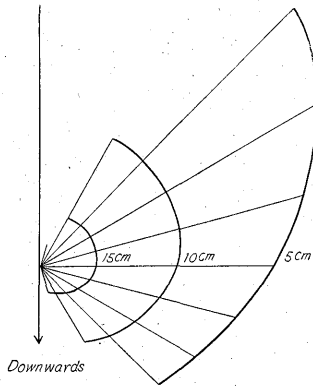
計数率指示目盛と線量率との関係を第18図に示す。4.5  $\mu$ C の Ra 放射線源をプローブに垂直に蛍光体の中心を通る直線上で移動して測定した。散乱線の影響はあまり大きくないので、補正しなかつた。



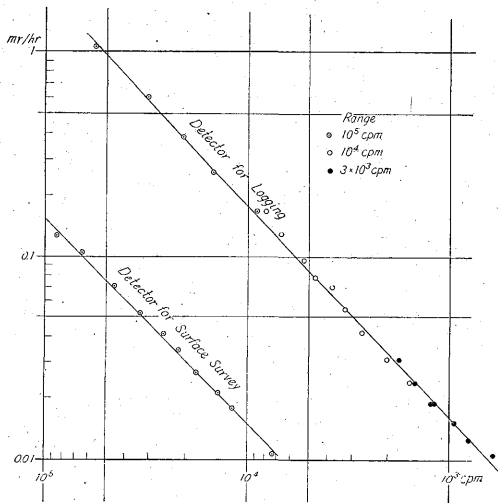
第15図 電流増幅器回路  
Circuit diagram of current amplifier



第16図 深度連動装置  
Depth metering system



第17図 検出器プローブの指向性  
Directional character of detector



第18図 計数率と線量率との関係  
Relationships between count rate and dose rate (Ra)

B電圧の変化による指示の変動は第19図に示すようになりかなり大きい。したがってしばしばB電圧のチェックをしなければならない。

電流増幅器の零点移動は電源乾電池の履歴によつて幾分異なるが、点火後20~30分間に記録計のフルスケールの1/3程度変動する。利得の変動はほとんどない。

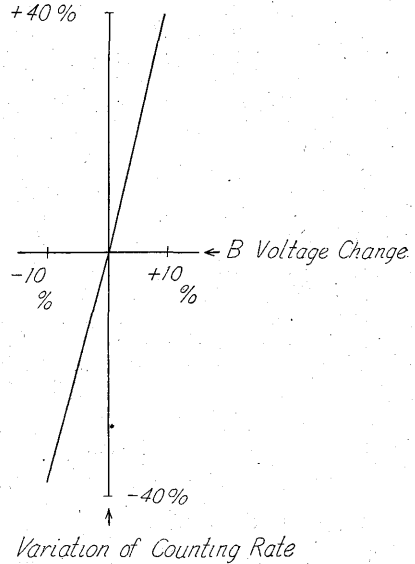
次に模型坑井による測定の結果を述べる。模型坑井は原子燃料公社によつて地質調査所の構内に設置されたもので、人形峠鉱山産の鉱石と川砂とを混ぜた鉱石層を川砂の層で挟んだものである。その構造は第20図のようになっている。測定記録からバックグラウンドを引き、模型層の品位の差異を補正し、さらに厚さ43cmの層による最大強度を1とすると、測定結果は第21図のようになる。

2.1で述べた簡単な理論で、 $\mu = 0.2 \text{ cm}^{-1}$ とし註4)

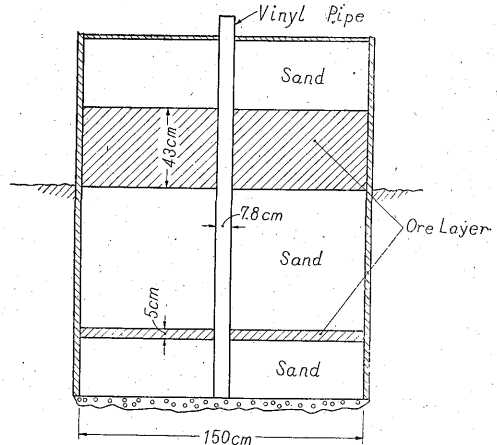
測定結果に合うような $\alpha$ の値を求めると、

$$\alpha = 1.42$$

である。これらの値を使つて計算した $\gamma$ 線強度分布も第21図に示してある。求められた $\alpha$ の値は物理的にもつともらしいと考えられるが、検出器が理想的な線状でなく太さを持ち、指向性が理論と実際と一致しないことなどの影響が含まれていて、散乱の影響だけを示して



第19図 B電圧の変化による計数率の変動  
Variation of counting rate by change of B voltage



第20図 模型井  
Model hole

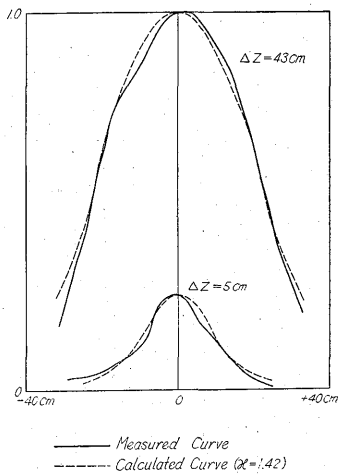
註4)  $\mu = 0.2 \text{ cm}^{-1}$  という値は大きすぎるようにも思われる。しかし、同じ模型坑井について、4種類の検出器 (G.M カウンタ2種, シンチレーション・カウンタ2種) による測定結果を同じ吸収係数で表現するためには、 $\mu = 0.2 \text{ cm}^{-1}$  と置くことが必要であつた。

いるとはいえない。

### 3. 品位・鉱量の推定

#### 3.1 品位の推定と時定数

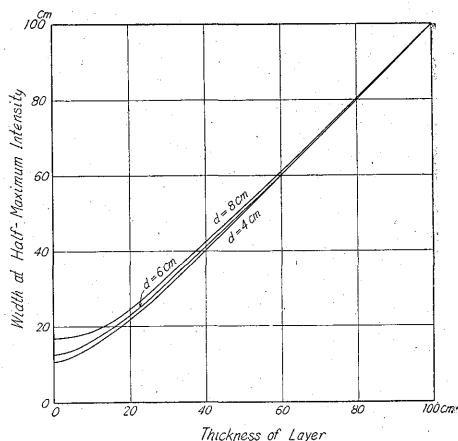
検層曲線から品位を求めるには、 $\gamma$ 線強度のピークの拡がりから層の厚さを求め、ピークの極大の $\gamma$ 線強度と層の厚さと品位との関係から、品位を求める<sup>1)</sup>。例えば、第7図ないし第10図のような図表を使つて、ピークの半値幅から、層の厚さを求め、層の厚さに従つてピークの極大強度を層の厚さが無限大の場合に換算し、厚さ無限大の層の $\gamma$ 線強度と品位との関係から、品位を推定する。このような計算に必要な関係は、模型坑井によつて実験的に求め、図表にしておくのが普通である。



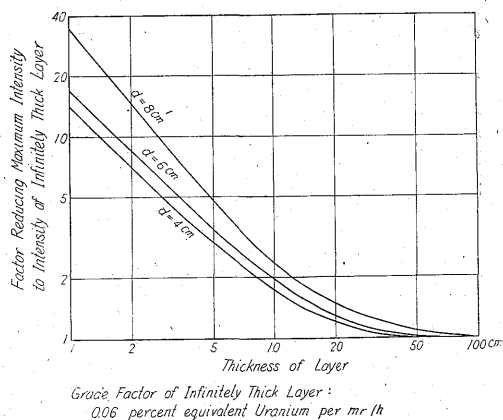
第21図 模型坑井による測定結果  
Response curve by model hole

こゝでは、実験的に図表を作るのに充分な模型層がないので、2.1に示した計算の結果と前節の実験結果とを組み合わせ、すなわち、 $l=5\text{ cm}$ 、 $\mu=0.2\text{ cm}^{-1}$  および  $\alpha=1.42$  として、試錐孔の直径が4 cm、6 cm および8 cmの場合に、坑泥水もケーシングも存在しない試錐孔の中心を検出器プローブが通る時の、品位の様な水平層に対する、半値幅と層の厚さとの関係およびピークの極大強度の厚さ無限大の層の強度に対する比と層の厚さとの関係を求めた。これらを第22図および第23図に示す。

検出器プローブが実際の試錐孔の中心を通ることはまれで、坑壁に接して上下することが多いはずであつて、実験的に図表を作る場合にはこのような条件で測定する<sup>2)</sup>。しかしわが国のウラン鉱床に対する試錐では、孔径の太い試錐孔が掘さくされないで、試錐孔中の検出器プローブの位置の影響は小さいものとして無視した。また、坑泥水やケーシングの影響も、普通は $\gamma$ 線強度をせいぜい10%程度減少させるぐらいであつて、この図表



第22図 層の厚さを求める図表  
Chart estimating thickness of horizontal layer



第23図 品位を求める図表  
Chart estimating grade

を坑泥水やケーシングが存在する場合にも適用してもさしつかえないと考えている。たいていの鉱体を無限に続くものとして解析できることは2.1節の終りに述べた。

潜在鉱床においても、とくに堆積型鉱床においては、鉱石が必ずしも放射平衡にあるとは限らないし、1つの鉱床中においても部分的に平衡の状態が異なることが知られているので、検層曲線だけから完全に定量的に品位を求めることは期待できない。したがつて、多くの条件を加えた精密な解析用図表を作る必要はないと考えられる。

鉱体の層が試錐孔に対して斜めに交わっている場合について研究された例はないようである。この問題については将来取り扱いたいと考えている。水平層中で品位が鉛直方向に対して一様でない場合は、検層曲線を適当に分割して、上記の図表を適用する。ある厚さについて平均品位を求める方法は次節で述べる。

検層曲線の解析でのもう1つの問題はレートメータの

動特性の影響である。記録計の動特性は無視されるものとし、検出器プローブは等速度  $v$  で移動するものとする。 $v \rightarrow 0$  のときの計数率変化を  $n_0$ 、記録された計数率変化、すなわち検層曲線を  $n$  およびレートメータの時定数を  $\tau$  とする。時間を  $t$  で表わせば、

$$\tau \frac{dn}{dt} + n = n_0 \quad (6)$$

で、この式の時刻  $T$  における解は

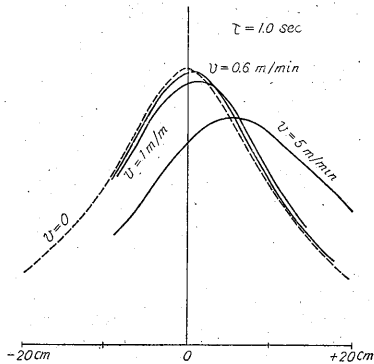
$$n(t) = \int_{-\infty}^T e^{-\frac{t-T}{\tau}} n_0(t) dt / \tau \quad (7)$$

である。深度を  $z$  とすると、 $z=Z$  において、

$$n(Z) = \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(z-Z)}{v\tau}} n_0(z) dz / v\tau \quad (8)$$

である。

2.1 で求めた強度分布のうちで、 $l=5 \text{ cm}$ 、 $dz=5 \text{ cm}$ 、 $d=4 \text{ cm}$ 、 $\mu=0.2 \text{ cm}^{-1}$  および  $\alpha=1$  の場合について、 $\tau=1 \text{ sec}$  で  $v=0.6 \text{ m/min}$ 、 $1 \text{ m/min}$  および  $5 \text{ m/min}$  の時の検層曲線を求めると、第24図のようになる。



第24図 検層速度による  $\gamma$  線強度分布の変形  
Response deformation by logging speed

これらの計算結果から、薄い層による  $\gamma$  線強度分布を正しく記録するためには、時定数を  $1 \text{ sec}$  程度にしても、 $1 \text{ m/min}$  程度の速度で検層しなければならない。実用的な解析用図表を実験的に求める場合には、幾種類かの検層速度について、所要の関係を求めるのが普通である<sup>11)</sup>。しかし、解析することが必要な部分だけを改めて充分遅い速度で検層して、 $v \rightarrow 0$  の場合の図表で解析してもよい。薄い層の検出を目的とする場合には、目的の部分だけ検層図の縮尺を大きくする必要もあるからである。

### 3.2 鉱量の推定

検層によつて層状鉱体の鉱量を求めるには、幾つかの試錐孔において層の厚さと品位との積が求められれば、水平方向の鉱体の拡がりや鉱体中の品位の変化を適当に

判断して、推算することができる。

2.1 に述べた計算の結果に基づいて、 $\gamma$  線強度分布を示す曲線と零線との間の面積  $S$  が、層の厚さと品位との積を表わす。すなわち

$$S = l dz (1 + \alpha) I_0 \sigma / \mu \quad (9)$$

であることが確かめられた。この関係は試錐孔の直径に関係しない。さらに、実際の検層曲線と零線との間に面積  $S'$ 、すなわちレートメータの動特性の影響を受けた場合についても、

$$S' = \int_{-\infty}^{+\infty} dz \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(z-Z)}{v\tau}} n_0(z) dz / v\tau$$

で、フーリエ積分にほかならないから、

$$S' = \int_{-\infty}^{+\infty} n_0(Z) dZ = S \quad (10)$$

となる。すなわち、レートメータの動特性の影響に無関係に品位と層の厚さとの積が求められる。また、これらの関係は深さの方向に品位が変化する場合も成り立つから、鉱量を求める方がむしろ容易であるということもできる。また、層の厚さを適当に決めると、平均品位を求めることができる。層の厚さは検層曲線から判定することもできるし、また比抵抗検層曲線やコアから決めてもよい。

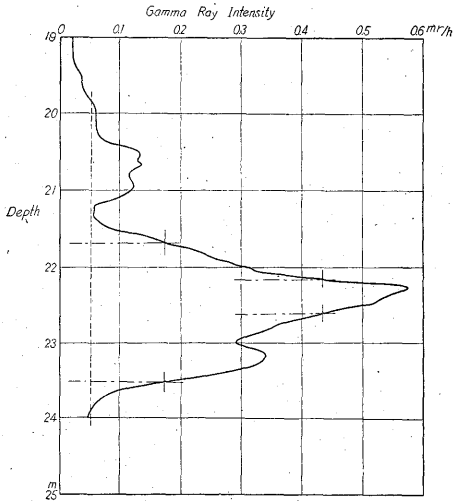
鉱量を推算する場合においては、鉱体の範囲あるいは形態、鉱体内での品位変化の状況を把握することが必要である。放射能検層曲線以外の資料をも参考にすることが望ましい。また、 $\gamma$  線強度と品位との関係が、鉱石中の放射平衡の状況の変化などのために、場所的に変化することを補正するために、コアの分析を行なうことも必要であろう。さらに、鉱量の推算を目的として試錐を行なう場合においては、試錐孔の密度をどの程度にするかということも問題になる<sup>12)</sup>。

### 3.3 人形峠鉱山夜次地区 1619号試錐孔の放射能検層による品位推定

昭和32年10月に、検層技術の研究を目的として、人形峠鉱山において放射能検層を行なつた。そのさい測定した試錐孔のうち、鉱体に到達した夜次地区 1619号試錐孔について、放射能検層曲線によつて鉱石の品位を推定してみよう。

当時は小型放射能検層器が完成していなかつたので、Victoreen Model 590 A-638-639検層器<sup>註5)</sup>を一部改造して使用した。検層曲線の解析に必要な図表や関係は3.1で述べたようにして作製した。この型の検出器プローブは現在大型物理検層器用として使用しているので、別の報告で詳しく述べることにする。

註5) The Victoreen Instrument Co. 製



第 25 図 人形峠鉱山夜次地区 1619 号試錐孔検層図の放射能異常部  
Anomaly of gamma ray intensity in the log measured in No. 1619 drill hole at Yotsugi district, Ningyō-tōge mine

夜次地区 1619 号試錐孔の鉱体付近の検層図を第 25 図に示す。時定数は 1.5 sec で、2.0 m/min 以下の幾つかの検層速度で測定を繰り返し、レートメータの動特性の影響はほとんど認められないことを確かめた。この検層図で認められる放射能異常のうち、深度 21.5 m から 24 m に至る、最大強度 0.575 mr/h に達する異常を取り扱う。

人形峠鉱山の鉱床は、花崗岩を基盤とする第三紀末または第四紀始めの堆積層中の礫岩に胚胎し、連続性のある水平層として解析してさしつかえないと考えられる。検層曲線より明らかなように、鉛直方向に対する品位分布は一様でないので、おもに 3.2 に述べた面積法で平均品位を求める。

この試錐孔には 63 mm のケーシングが挿入され、坑泥水も存在したが、3.1 に述べたようにそれらの影響は省略する。

問題にしているγ線強度のピークは、厚さが無限大でγ線強度が 0.05 mr/h の層に重なっていると考える。強度 0.05 mr/h の層中の品位は、強度と品位の換算係数が 0.06 (mr/h) / % であるから、0.003 % eU である。ピークの曲線は 0.30 mr/h でさらに 2 つの段階に分かれるように見える。そこで、厚い層の半値幅が層の厚さを示すことを考慮して、

$$(0.30 - 0.05) / 2 + 0.05 = 1.75 \text{ mr/h}$$

の強度におけるピークの幅 1.80 m を鉱体の幅とする。こうして、検層曲線の 5 cm ごとの値から梯形法で数值的に面積を求めると、5.9 (mr/h)・m となり、幅 1.80 m で割って品位に換算すると、深度 21.7 m から 23.5 m

の間で、

$$5.9 / 1.8 \text{ mr/h} \times 0.06 \text{ (mr/h) / \% eU} + 0.003 \% \text{ eU} = 0.023 \% \text{ eU}$$

となる。

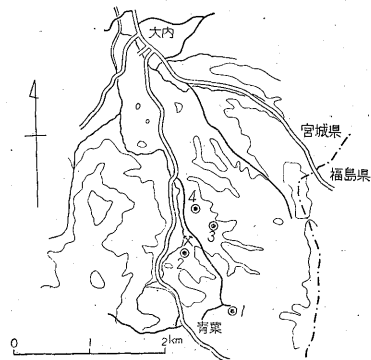
同様に、深度 22 m から 23 m に至る 0.3 mr/h 以上のピークの部分について計算する。半値幅を層の厚さとする、厚さは深度 22.17 m から 22.59 m に至る間で 42 cm となる。平均品位は 0.041 % eU である。このピークの極大の付近はさらに細くなつていて、深度 22.25 m 付近では実際の品位は 0.04 % 以上であることが推定される。

この検層曲線にみられるピークは非対称であるが、品位が鉛直方向に一様であるとして、3.1 に述べたような方法で計算しても、平均品位と同じ値、すなわち 0.04 % eU が得られる。これは当然な結果であるが、検出器の有効部分が短かく層の厚さが 40 cm 位あれば、厚さ無限大の層の場合とほとんど同等になるので、ピークの極大値だけから計算される値、すなわち

$$0.575 \text{ mr/h} \times 0.06 \% \text{ eU (mr/h)} = 0.0345 \% \text{ eU}$$

を使つても大した違いはない。0.3 mr/h 以下の部分のピークの拡がりを無視したために、品位の値は多少低くなつている。

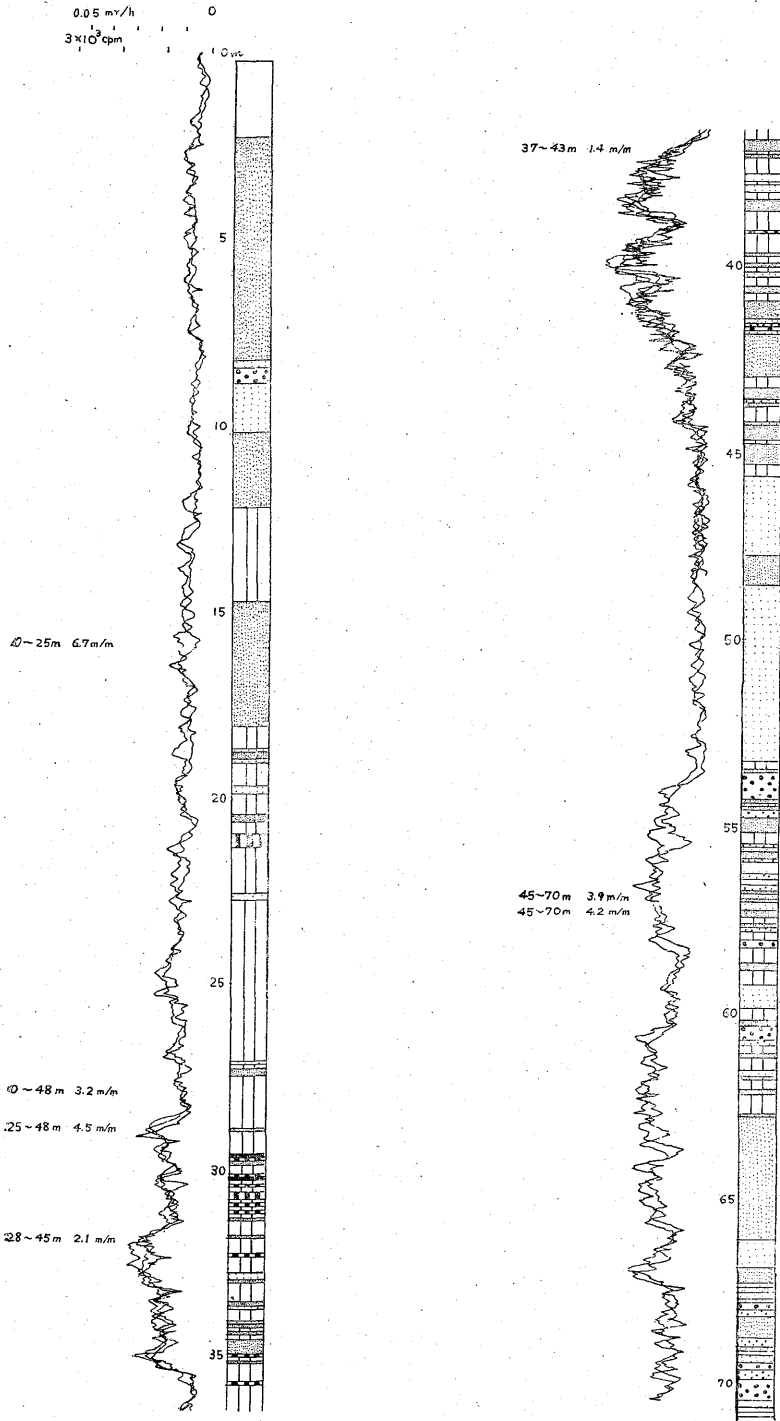
昭和 33 年に夜次地区に探鉱坑道が開設され、1619 号試錐孔から最短距離約 3 m および 5 m の所を掘進した。最短距離 3 m の坑道で、試錐孔に近い部分における鉱石試料 6 個についての分析値は最大 0.05 % U、最小 0.03 % U および平均 0.038 % U であり、最短距離 5 m の坑道で、試錐孔に近い部分における鉱石試料 4 個についての分析値は最大 0.07 % U、最小 0.02 % U および平均 0.055 % U であったということである。したがって、放射能検層による品位の推定は実際に坑道を掘つて調査した結果とよく一致したといふことができる。



- 1 青葉
- 2 佐野
- 3 高田 1 号
- 4 高田 2 号
- × 大内炭鉱

第 26 図 大内地区試錐孔位置図  
Location of drill holes at Ouchi district

NATURAL GAMMA  
30mm probe T. C. 1sec



第27图 放射能検層図(青葉)  
Radioactive log (Aoba)

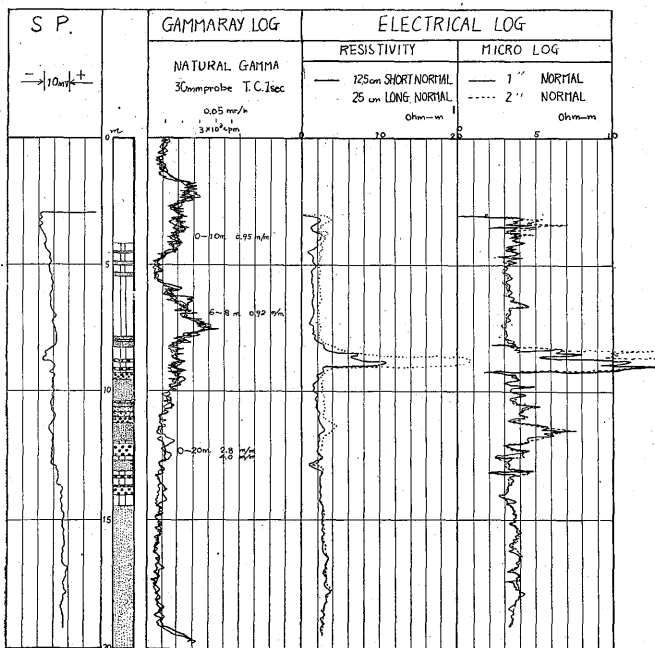
第1表 試錐孔および検層作業の概要  
Summary of the drill holes and loggings

2. 放射能検層

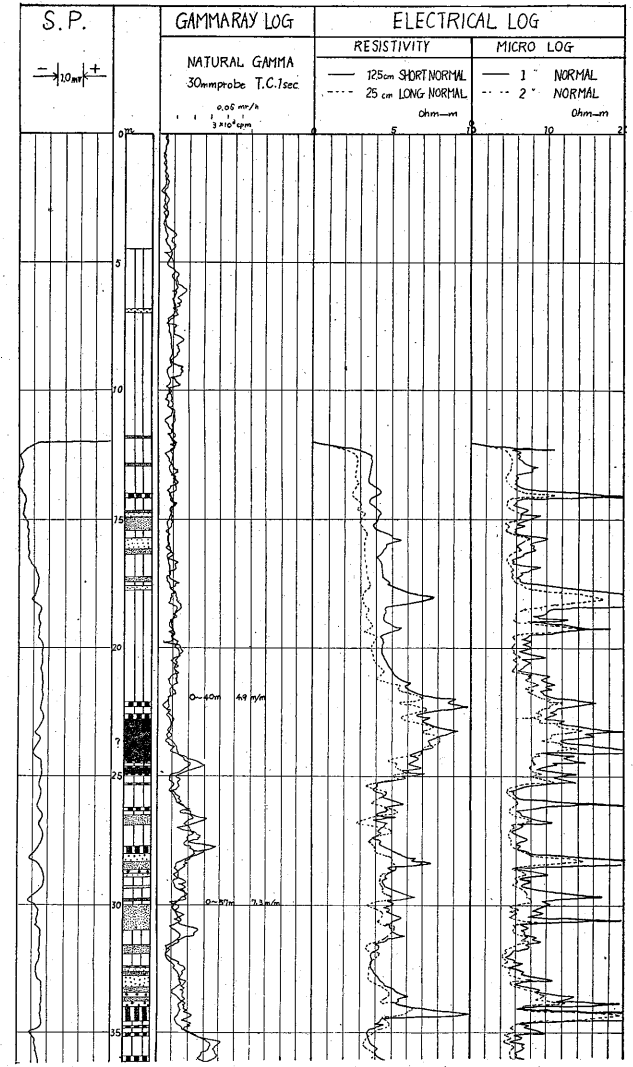
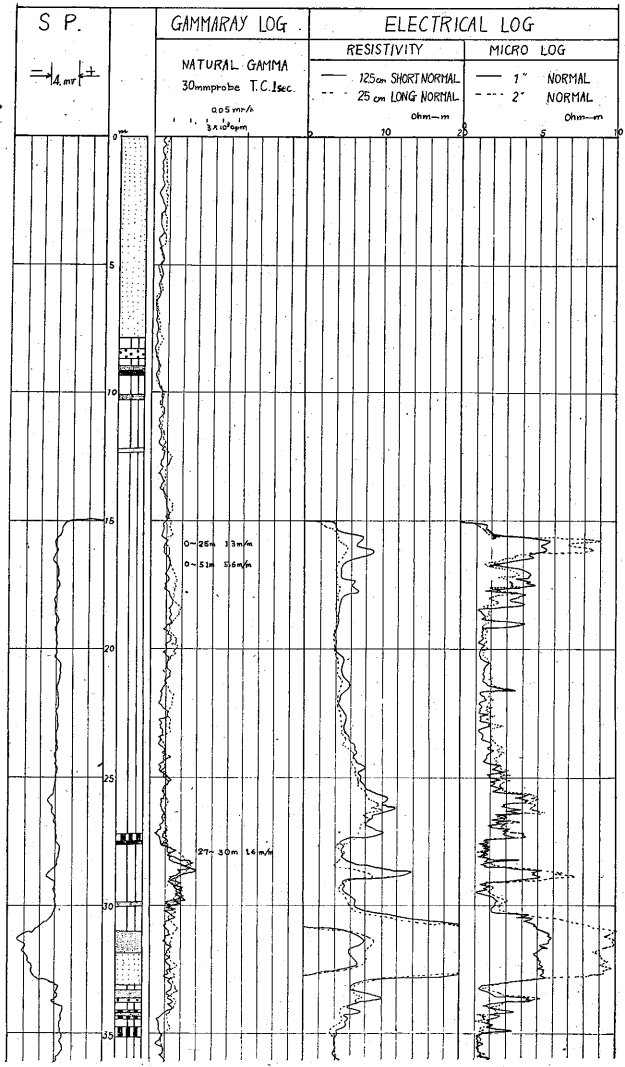
1. 試錐孔					2. 放射能検層				
試錐孔名	青葉	佐野	高田1号	高田2号	試錐孔名	青葉	佐野	高田1号	高田2号
位置	宮城県伊具郡丸森町大内 字青葉 字佐野 字高田				検層器	小型放射能検層器			
掘さく目的	ウラン				測定深度	0~70.85m	0~19.79m	0~72.20m	0~56.66m
掘さく深度	70.85m	20.40m	72.20m	57.40m	深度基準	鉄管頭 地並より地並より地並より地並より 25cm上15cm下20cm上25cm上			
孔径	75mm				測定レンジ	full scale 3×10 <sup>8</sup> cpm			
挿入管	9.3cm 1.2m	9.3cm 3m	9.3cm 15m	9.3cm 12m	感度	7.5×10 <sup>4</sup> cpm/(mr/h)			
掘さく者	河内英幸, 加藤完		野口勝, 後藤進		時定数	1 sec			
泥水比重	1.1	1.0	1.2	1.2	検層速度	1.4~4.2	0.95~4.0	1.3~5.6	4.9~6.0
泥水比抵抗		33.4 $\Omega$ -m /1.21°C	14.5 $\Omega$ -m /12.2°C	20.9 $\Omega$ -m /12.2°C	記録縮尺	1/70			

3. 電気検層

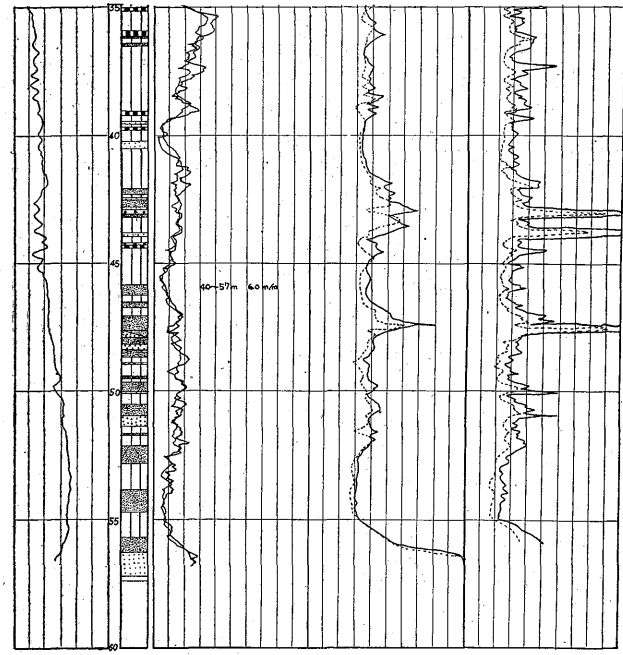
試錐孔名	青葉	佐野	高田1号	高田2号	電極	45 $\phi$ , 3P
検層器	EL-10(ウインチを除く)				電極間隔	25 cm, 12.5 cm; 2'', 1'
測定深度	3.00~ 19.50m	15.00~ 61.40m	12.00~ 56.50m		検層速度	5m/min
測定曲線	$\rho$ , S.P., Micro Resistivity				記録縮尺	1/100



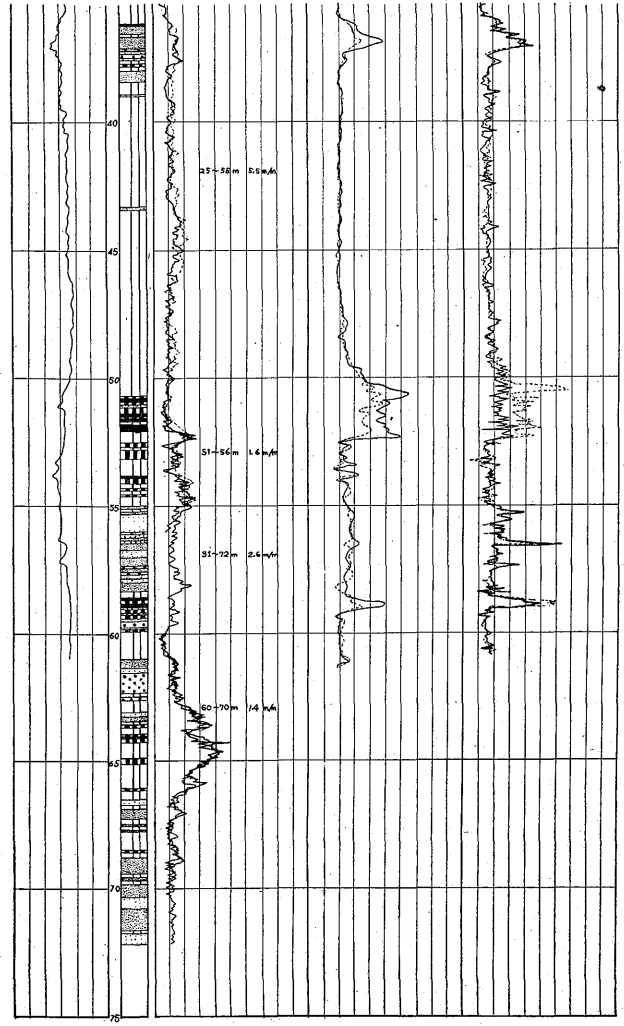
第28図 電気検層図(佐野)  
Electric logs (Sano)



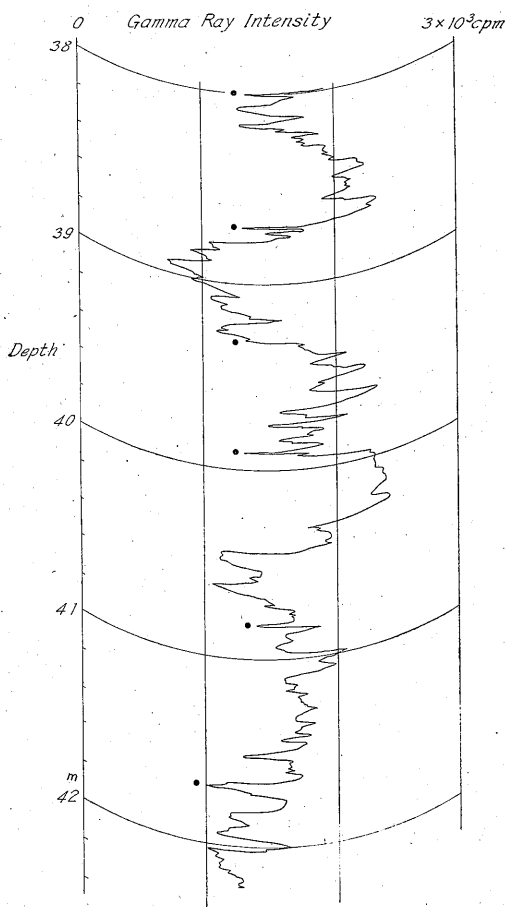




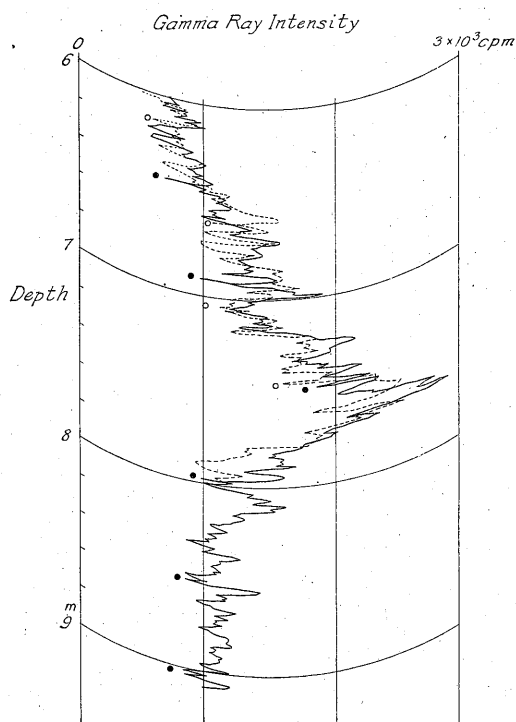
第30図 電気換層図 (高田2号井)  
Electric logs (Takada No. 2 Well)



第29図 電気換層図 (高田1号井)  
Electric logs (Takada No. 1 Well)



第31図 青葉試錐孔の放射能異常部  
Enlarged log in "Aoba" drill hole



第32図 佐野試錐孔の放射能異常部  
Enlarged log in "Sano" drill hole

#### 4. 宮城県大内地区における物理検層調査

##### 4.1 試錐孔および検層作業

昭和33年9~10月に大内炭鉱周辺において構造試錐孔が実施され、4試錐孔延長約221mが掘さくされたので、物理検層を実施した。試錐孔および検層作業の概況を第1表に示す。また調査地域の位置を第26図に示す。

試錐孔は径75mmのビットで掘さくされ、ケーシングを挿入していない。ただし、上部では地層の状況に応じて1.2~15mのドライバー(径93mm)が挿入されている。掘さく直後検層を行なっているため、泥水がほぼ坑口まで試錐孔中に充されていた。

放射能検層作業は、検層速度2~6m/min、縮尺約1/10で、2回以上全深度の測定を行ない、γ線強度の高い部分は縮尺約1/17.5でおそい検層速度で測定を行なつた。深度はドライバーの上端を基準とし、ケーブルに1mごとに付けたマークで測定した。

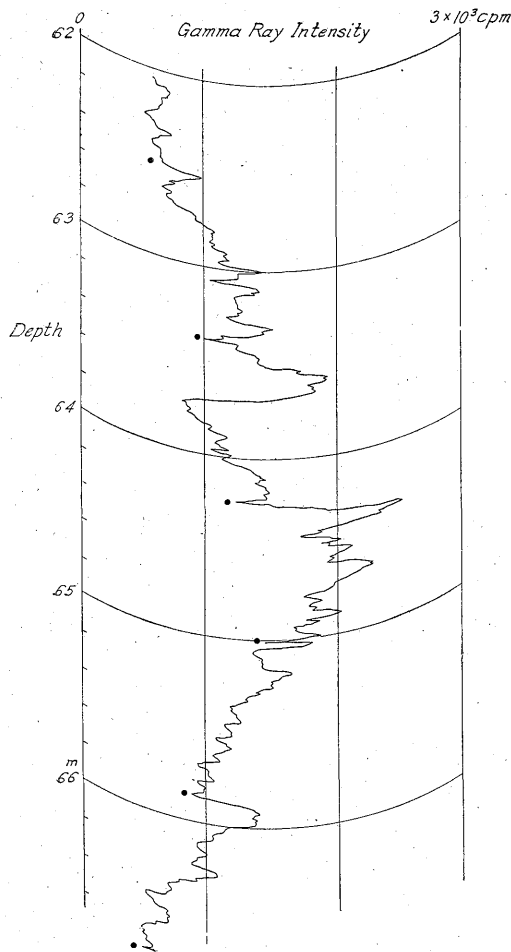
電気検層には、大型物理検層器"EL-10"用の測定器を用いた。ただしケーブルは長さ150mのゴム被覆3芯線を用い、ウインチを使用しなかつた。検層速度5m/min、縮尺1/100で全深度の測定を行なつた。青葉試錐孔は他の試錐孔群から距離が離れているので、調査期間と輸送距離との関係で測定できなかつた。また高田1号試錐孔は試錐完了後数日を経ってから測定を行なつたので、坑底まで測定することができなかつた。

##### 4.2 検層結果

検層結果は地質柱状図とともに1/100の検層図としてまとめた註6)。これらを第27図ないし第30図として示す。地質柱状図は河野迪也によるものである。高田2号試錐孔で深度22.8~22.4mの間は、比抵抗検層曲線から判断しても、亜炭とその他の層との互層であるが、岩芯試料がないので疑問符のまま残されている。

検層図に見られるように、各試錐孔とも微弱なγ線強度の増加が認められた。これらの増加のうちおもなものは各坑井につき1カ所、極大値0.04mr/h、厚さは細かい変化を無視すると数mに及んでいる。その平均品位を面積法で求めるとは約0.002%eUである。すなわち花崗岩質岩の放射能強度と同程度であつて、実際に基盤

註6) 印刷のさいの縮尺は約1/300である。



第33図 高田1号試錐孔の放射能異常部  
Enlarged log in "Takada No. 1" drill hole

花崗岩の風化帯に達していると考えられる佐野および高田2号試錐孔の坑底のγ線強度とあまり変わらない。もし放射性物質が極端に放射平衡から外れていて、ウランの崩壊生成物が非常に少ないと、ウランの品位はもつと大きくなる。

しかし、これらのγ線強度の増加は、従来の地質学的調査の結果などから考えて、単に花崗岩質岩の直接分解物によるものでなく、地下水中に溶解されたウランが沈殿・吸着などによってある地層中に濃縮された結果によるものであつて、γ線強度の増加を示す地層中には、例えばトリウム系元素は含まれていないと考えることができる。このような理由から、大内地区における試錐孔中のγ線強度の増加は、その場所に経済的に価値のある鉍床は存在しなくても、放射能強度異常として取り上げて

もよいと考えられる註7)。

地質柱状図と放射能強度異常部を対応すると、青葉試錐孔以外では、異常部は泥岩中に存在するようでありまたマイクロ比抵抗検層曲線の低抵抗部に対比される。普通石炭は高抵抗層として対比されるが、大内炭鉍では亜炭は必ずしも高抵抗を示さず、砂岩層に比較して低抵抗である。なお、異常を示す泥岩層中には炭質物が多く含まれているということである。

青葉試錐孔では放射能異常部の少なくとも一部分は微細粒砂岩中に存在し、花崗岩質岩の直接分解物によるγ線強度の増加ではないかと疑われる。花崗岩質岩の直接分解物で放射能強度の強い部分は、高抵抗を示すことが予想されるので、青葉試錐孔に対する電気検層が実施されなかつたのは遺憾であつた。

放射能異常を示す部分を拡大して測定した記録の一部を第31図ないし第33図に示す。計数率2,000cpmで時定数1secのレートメータの危険率5%の誤差は約±480cpmであるから、細かいピークを解析することは意味がない。しかし高田1号井試錐孔(第33図)の深度64.4mのピークが一応意味のあるものとみなし、水平層として解析すると、厚さ1cmとして品位0.035%となる。たゞしこのように薄い層が無限に長く続くと考えることは、かなり不自然であつて、もつと品位の高い小さな物質が坑壁付近に存在すると考える方がよい。逆にいえば、品位が高くても微小なものは、検層曲線の統計

第2表 放射能強度異常を示す地層  
Summary of the radioactive layers

試錐孔名	青葉	佐野	高田1号	高田2号
γ線強度の極大	0.04 mr/h	0.04 mr/h	0.04 mr/h	0.04 mr/h
極大点を中心とする厚さ1mの地層中のウランの平均品位	0.002% eU	0.002% eU	0.002% eU	0.002% eU
極大点の深度	40.0m	7.6m	64.7m	35.4m
極大点の海面上高度	87.0m	64.4m	22.7m	42.6m
亜炭本層の深度	29.6~ 31.2m	地並上 0.6~1.4 m	50.6~ 52.0m	22.6~ 25.0m
亜炭本層の中心から極大点までの深度差	9.6m	7.2m	13.3m	11.6m
基盤花崗岩の深度		20.30m		57.20m
異常を示す層の地質	黒色ないし灰黒色泥岩と微細粒砂岩互層	灰色泥岩層	褐炭質泥岩と灰黒色泥岩の互層	褐炭質泥岩と青灰色泥岩の互層

註7) したがつて、こゝでは放射能強度異常を空中探査や放射能探査よりせまい意味に考へている。

的な変動と区別して検出することは困難である。しかし経済的に価値のある鉱床ならば、容易に検出され、解析できる。大内地区においても、異常を示す地層中で品位の分布は不均一であると考えられる。

放射能異常についての要約を第2表に示した。各試錐孔で最も顕著な異常を示す部分の、海面上の高さを比較すると、高田1号および2号試錐孔のように近距離の試錐孔でも同じ高さにはない。しかし、異常を示す層は亜炭の本層下約10mの所にあつて、青葉試錐孔を除いて基盤の起伏に伴つて上下しており、これらの試錐孔で認められた亜炭本層および放射能強度異常を示す層を連続のあるものとして対比することもできる。

### 5. 結 語

わが国のウラン鉱床の調査に適當していると考えられる小型の放射能検層器を試作した。この検層器の製作にあつて、検出器の有効部分の長さ、水平層の厚さとの関係を検討した。

上記の検討において行なつた計算と模型坑井による実験の結果を使つて、水平層状の鉱体の品位・鉱量を推定する方法を示し、人形峠鉱山で品位が知られている鉱体に適用してこの解析法の実用性を確かめた。

小型放射能検層器によつて、宮城県大内地区において放射能検層を実施し、微弱な放射能異常を認め、その品位を推定した。電気検層を実施し、放射能異常の解釈上有効であることを示した。

(昭和32年10月、33年10月～11月調査)

### 文 献

- 1) Broding, R. A. & B. F. Rummerfeld: Simultaneous Gamma Ray and Resistance Logging as Applied to Uranium Exploration, Geophysics, Vol. XX, No. 4, 1955
- 2) Comstock, S. S.: Scintillation Drill Hole Logging, Geneva Conference Paper, 1957
- 3) 菅野卓治: 地下水ならびに2, 3の亜炭中のウラン, 第1回原子力シンポジウム報文集, 1957
- 4) 中村顯三・塚本由三・高橋淳: ウラン鉱床における放射能検層による鉱量概算法, 第3回原子力シンポジウム報文集, 1959
- 5) 佐野浚一: 野外における自然ガンマ線強度分布の解析法, 第3回原子力シンポジウム報文集, 1959
- 6) 須貝貫二・星野一男: 宮城県伊具郡大内炭鉱のウラン鉱床, 鉱山地質, Vol. 8, No. 29, 1958