

可搬型Ge(Li)検出器を用いた
環境ガンマ線のin-situ測定

1976年3月

阪井 英次・寺田 博海・片桐 政樹

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

可搬型Ge(Li)検出器を用いた環境ガンマ線のin-situ測定

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

阪井英次・寺田博海・片桐政樹

(1976年2月10日受理)

環境ガンマ線のin-situ測定用の可搬型73 cm³ closed-end 同軸型Ge(Li)検出器を製作し、これを用いて環境ガンマ線のin-situ測定を行なった。線源、検出器間距離25 cmにおける検出器の1333 keVガンマ線のピーク検出効率は17.5%、エネルギー分解能は25 keVであった。環境ガンマ線の検出効率は662 keVガンマ線に対して362 cps/photon/cm² sec、エネルギー分解能は2.1 keVであった。検出効率の入射ガンマ線角度依存性を測定し、地上1 mの検出器位置における環境ガンマ線測定に対する補正係数を算出した。この検出器を使用して、土壌中のU-238、Th-232、K-40、Cs-137の濃度、それらの与える地上1 mにおける線量率を算出した。これらの結果を、採取した土壌試料の低バックグラウンドGe(Li)スペクトロメータによる測定結果、および、3"×3" NaI(Tl)検出器を使用したin-situ測定結果と比較した。

Ge(Li)検出器、NaI(Tl)検出器のin-situ測定結果の解析にはHASL方式(H.L. Beck, et al; HASL-258(1972))を使用、また、NaI(Tl)検出器に対しては原研方式(森内茂: JAERI 1209(1971年7月))を使用した。HASL方式について詳細な解説を行なった。

Ge(Li)検出器による環境ガンマ線スペクトルの時間的変動の測定、plumesからのガンマ線測定用鉛遮蔽体を持つGe(Li)検出器の特性、Ge(Li)検出器のスペクトル-線量率変換演算子関数の決定についても触れた。

In-situ measurement of the environmental gamma-rays
by portable Ge(Li) detectors

Eiji SAKAI, Hiromi TERADA, and Masaki KATAGIRI

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received February 20, 1976)

In-situ environmental gamma-ray measurements have been performed with a 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) portable spectrometer. Peak detection efficiency and energy resolution of the detector for 1333keV gamma-rays with a source-to-detector distance of 25cm were 17.5 % and 2.5keV, respectively. They were 3.62 cps/photon/cm²sec and 2.1keV for 662keV gamma-rays with a distance of 100cm. Dependence of the peak detection efficiency on the incident gamma-ray direction was measured for the different energies of gamma-rays, and corrections were made in analyzing the data obtained by in-situ measurement. The concentrations of K-40, Cs-137, U-238, Th-232 and their daughters in the soil and their contribution to the dose rate at 1 m above the ground were obtained. These results were compared with those by low-background Ge(Li) spectrometer measurement of the soil samples and also with the dose rate by in-situ 3" x 3" NaI(Tl) spectrometer measurement.

The results obtained by Ge(Li) and NaI(Tl) spectrometries were analyzed by the H.L.Beck et al's method(HASL-258(1972)). The spectrum-to-dose conversion operator function method developed by S.Moriuchi(JAERI-1209(1971)) was used in NaI(Tl) spectrometry.

Measurements were made of the sequential variation of environmental gamma-rays by a 49cm³ Ge(Li) detector, and plume gamma-ray detection performance by the detector with a lead shield to suppress gamma-rays from the soil. A spectrum-to-dose rate conversion operator function was determined by the 73cm³ Ge(Li) detector.

目 次

Table captions	(5)
Photo captions	(7)
Figure captions	(7)
1. まえがき	1
2. 環境ガンマ線の in-situ 測定における解析方法	4
3. 環境ガンマ線測定用Ge(Li)スペクトロメータ	12
3.1 73 cm ³ Ge(Li)ガンマ線スペクトロメータの製作とその検出特性	13
3.2 73 cm ³ Ge(Li)ガンマ線スペクトロメータのガンマ線 入射角度依存性	15
3.3 73 cm ³ Ge(Li)ガンマ線スペクトロメータの環境ガンマ線検出特性	16
4. 土壌試料ガンマ線測定用Ge(Li)スペクトロメータ	18
4.1 土壌試料採取方法	18
4.2 Ge(Li)ガンマ線スペクトロメータ	19
4.3 土壌試料ガンマ線検出特性	19
5. 環境ガンマ線測定結果	22
5.1 測定場所	22
5.2 In-situ 測定結果	22
5.3 土壌試料測定結果	23
6. 応 用	26
6.1 Ge(Li)検出器による環境ガンマ線の時間的変動の測定	26
6.2 Plumes からのガンマ線測定用鉛遮蔽体付きGe(Li)検出器の特性	27
6.3 Ge(Li)検出器のスペクトル線量変換演算子値関数	28
7. ま と め	30
謝 辞	30
参考文献	31
Tables	34
Photos	62
Figures	67

Contents

Table captions	(5)
Photo captions	(7)
Figure captions	(7)
1. Introduction	1
2. Data analyzing method of in-situ environmental gamma-ray measurement	4
3. Ge(Li) environmental gamma-ray spectrometer	12
3.1 73cm ³ closed-end coaxial spectrometer fabrication	13
3.2 Incident gamma-ray angular dependence of peak detection efficiency of 73cm ³ closed-end coaxial Ge(Li) spectrometer	15
3.3 Environmental gamma-ray detection characteristics of 73cm ³ closed-end coaxial Ge(Li) spectrometer	16
4. Ge(Li) gamma-ray spectrometer for sampled soil measurement	18
4.1 Soil sampling method	18
4.2 Ge(Li) detector system	19
4.3 Detection characteristics of gamma-rays from the sampled soil	19
5. Results of environmental gamma-ray measurement	22
5.1 Measurement points	22
5.2 Results of in-situ measurement	22
5.3 Results of Sampled soil measurement	23
6. Application	26
6.1 Sequential variation of environmental gamma-rays using in-situ Ge(Li) spectrometer	26
6.2 Plume gamma-ray detection using Ge(Li) spectrometer with specially- designed lead shield to suppress gamma-rays from the soil ...	27
6.3 Spectrum-to-dose rate conversion operator value function of 73cm ³ closed-end coaxial Ge(Li) spectrometer	28
7. Conclusion	30
Acknowledgment	30
References	31
Tables	34
Photos	62
Figures	67

Table captions

- Table 1.1 Examples of in-situ gamma-ray detectors
- Table 2.1 Analytical method of in-situ measurement
- Table 2.2 Gamma-ray flux Φ and its angular dependence $d\Phi/d\theta$ at h meter above the ground for three different distributions of gamma-ray emitting nuclides in the soil
- Table 2.3 Mass attenuation coefficients in soil of various moisture contents
- Table 2.4 Calculated angular flux ($d\Phi/d\theta$), normalized angular flux ($d\Phi/d\theta$)/ Φ , and cumulative normalized flux $\int_0^\theta (d\Phi/d\theta)d\theta/\Phi$ of 662keV gamma-rays at one meter above ground
- Table 2.5 Unscattered flux at one meter above ground for exponentially distributed sources in the soil
- Table 2.6 Unscattered flux per pCi/g at one meter above ground for uniformly distributed ^{226}Ra and ^{232}Th sources in the soil
- Table 2.7 Unscattered flux per mCi/km² at one meter above ground for typical fallout isotopes in the soil
- Table 2.8 Exposure rate ($\mu\text{R/h}$) per unit flux (photon/cm²sec) of gamma-rays
- Table 2.9 Exposure rate ($\mu\text{R/h}$) at one meter above ground for exponentially distributed monoenergetic sources in the soil
- Table 2.10 Unscattered gamma-ray exposure rate and total exposure rate ($\mu\text{R/h}$) per unit radioactivity (one photon/sec per gram of soil)
- Table 2.11 Total exposure rate at one meter above ground for natural emitters uniformly distributed in the soil
- Table 2.12 Total exposure rate at one meter above ground for natural emitters uniformly distributed in the soil
- Table 2.13 Φ/I - Ratio of gamma-ray flux density to exposure rate from natural emitters in the soil
- Table 2.14 Total exposure rate ($\mu\text{R/h}$) at one meter above ground for selected fallout isotopes in the soil
- Table 2.15 Φ/I - (one meter) for fallout emitters in the soil - (photons/cm²sec)/($\mu\text{R/h}$)
- Table 3.2.1 Peak detection efficiencies of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector for parallel beams of gamma-rays of different energies
- Table 3.2.2 Angular dependence of peak detection efficiency per unit flux of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer
- Table 3.2.3 Angular dependence of relative peak detection efficiency per unit flux of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrome-

er

- Table 3.2.4 Least square fitted peak detection efficiency per unit flux dependence on angle of incident gamma-ray beam of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer
- Table 3.3.1 Calculated N_f/N_0 (correction factor taking account of angular dependence of detection efficiency) for 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector
- Table 3.3.2 In-situ gamma-ray detection characteristics of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) spectrometer for naturally occurring radionuclides uniformly distributed in the soil
- Table 3.3.3 In-situ gamma-ray detection characteristics of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) spectrometer for 662keV gamma-rays from Cs-137 exponentially distributed in the soil
- Table 4.2.1 Quality assurance data of 75cm³ coaxial Ge(Li) detector
- Table 4.2.2 Operating conditions of lead-shielded 75cm³ coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer
- Table 4.3.1 Peak detection efficiency calibration of Ge(Li) detector system used for gamma-ray measurement of radionuclides in sampled soil
- Table 4.3.2 Self-calibration of peak detection efficiency of lead shielded 75cm³ coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer
- Table 4.3.3 Detection limit of lead-shielded 75cm³ coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer for 7.2cm dia, 4.3cm thick, 200cm³ soil sample
- Table 5.2.1 Results of gamma-ray spectrum analysis of in-situ Ge(Li) environmental gamma-ray measurement made from 14:00 to 16:00 on October 26, 1975
- Table 5.2.2 Results of in-situ Ge(Li) gamma-ray measurement performed on the lawn between Machine Shop and Storehouse, JAERI
- Table 5.2.3 Radioactivity and exposure rate of Cs-137 gamma-rays measured on the lawn between Machine Shop and Storehouse, JAERI, on October 26, 1975 by 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector
- Table 5.2.4 Concentrations of activities in the soil obtained by in-situ analysis and sampling method
- Table 5.2.5 Total exposure rates obtained by in-situ Ge(Li) spectrometry and 3" x 3" NaI(Tl) spectrometry on the lawn between Machine Shop and Storehouse, JAERI
- Table 5.3.1 Sampled soils
- Table 5.3.2 Gamma-ray peak counting rates of sampled soils measured by lead-shielded 75cm³ coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer

Table 5.3.3 Radioactivity concentrations (pCi/g) of Tl-208, Bi-214, Cs-137, K-40 in sampled soil

Table 5.3.4 Cs-137 radioactivities in soil samples

Photo captions

- Photo 1.1 A van-type vehicle housed a complete spectrometric system for environmental radiation monitoring including Ge(Li)detector, NaI(Tl)detector, high-pressure ion chamber, FIDLER, multichannel analyser, etc. (P.L.Phelps, et al (Lawrence Livermore Laboratory) ; IEEE Trans., NS-21(1), 543 (1974))
- Photo 3.1.1 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector for in-situ environmental gamma-ray spectrometry
- Photo 3.1.2 Ge(Li) detector mounting procedure
- Photo 4.1.1 Iron pipe(outer diameter 9.0cm, inner diameter 7.5cm, length 39cm; very simple core sampler) and a stack of Tupperwares including sampled soil
- Photo 4.2.1 Lead-shielded 75cm³ coaxial Ge(Li)detector for gamma-ray spectrometry of sampled soil
- Photo 5.1.1 Location of in-situ Ge(Li) spectrometry on the lawn between Machine Shop and Storehouse of JAERI, Tokai Research Establishment

Figure captions

- Fig.2.1 Mass attenuation coefficient of gamma-rays for soil and air
- Fig.2.2 Linear attenuation coefficient of gamma-rays for soil
- Fig.2.3 Angular dependence of normalized flux $(d\phi/d\theta)/\phi$ of 662keV gamma-rays at 1 meter above ground
- Fig.2.4 Cumulative normalized flux $\int_0^\theta (d\phi/d\theta)d\theta / \int_0^{\pi/2} (d\phi/d\theta)d\theta$ of 662keV gamma-rays at one meter above ground
- Fig.2.5 Cumulative normalized flux at 1 meter above ground for 662keV gamma-rays as a function of surface distance from the detector
- Fig.2.6 Unscattered flux at one meter above ground for uniformly-distributed sources in the soil
- Fig.2.7 Unscattered flux at one meter above ground for exponentially-distributed sources in the soil
- Fig.2.8 Unscattered photon flux per mCi/km² at 1 meter above ground for fallout Cs-137 in the soil

- Fig.2.9 Energy transfer coefficient μ_e/ρ and $\mu_e E/\rho$ of gamma-rays for air
- Fig.2.10 Exposure rate at one meter above ground for uniformly distributed source in the soil
- Fig.2.11 Exposure rate at one meter above ground for exponentially-distributed sources in the soil
- Fig.2.12 Unscattered photon flux per exposure rate ($\mu\text{R/h}$) at 1 meter above ground for fallout Cs-137 in the soil
- Fig.3.1.1 Mounting detail of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector for in-situ gamma-ray measurement
- Fig.3.1.2 Capacitance and leakage current vs. bias voltage characteristics of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector
- Fig.3.1.3 Schematic diagram of in-situ Ge(Li) detector system for environmental gamma-ray spectrometry
- Fig.3.1.4 Liquid nitrogen consumption of cryostat with 73cm^3 Ge(Li) detector
- Fig.3.1.5 Performance of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector measured at source-to-detector distance 25cm
- Fig.3.2.1 Peak detection efficiency per unit flux of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer measured at source-to-detector distance 100cm
- Fig.3.2.2 Angular dependence of peak detection efficiency of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector normalized at $\theta=0^\circ$ for parallel beam of gamma-rays of 60, 80, 122, and 356keV
- Fig.3.2.3 Angular dependence of peak detection efficiency of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector normalized at $\theta=0^\circ$ for parallel beam of gamma-rays of 511keV and 662keV
- Fig.3.2.4 Angular dependence of peak detection efficiency of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector normalized at $\theta=0^\circ$ for parallel beam of gamma-rays of 834 and 1173keV
- Fig.3.2.5 Angular dependence of peak detection efficiency of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector normalized at $\theta=0^\circ$ for parallel beam of gamma-rays of 1333 and 1836keV
- Fig.3.2.6 Least square fitted peak detection efficiency of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector measured at source-to-detector distance 100cm
- Fig.3.3.1 Correction factor N_F/N_0 for angular dependence of peak detection efficiency of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector for uniformly-distributed emitters in the soil

- Fig.3.3.2 Correction factor, N_f/N_0 , for angular dependence of peak detection efficiency of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector
- Fig.3.3.3 Cs-137 662keV gamma-ray peak counting rate (cps) per unit radioactivity (mCi/km^2) as a function of α/ρ for 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector at 1 m above the ground
- Fig.3.3.4 Cs-137 662keV gamma-ray peak counting rate (cps) per unit exposure rate ($\mu\text{R}/\text{h}$) as a function of α/ρ for 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector at one meter above the ground
- Fig.4.3.1 Peak detection efficiency of 75cm^3 Ge(Li) detector as a function of source thickness of sodium phosphate
- Fig.4.3.2 Peak detection efficiency of 75cm^3 Ge(Li) detector for soil sample measurement
- Fig.4.3.3 Self-calibrated peak detection efficiency of 75cm^3 Ge(Li) detector for soil sample measurement
- Fig.4.3.4 Typical pulse height distribution for calculating detection limit of gamma-ray spectrometer
- Fig.5.1.1 In-situ Ge(Li) detector measurement point and soil-sampled points
- Fig.5.2.1 In-situ gamma-ray pulse height distribution measured on the lawn between Machine Shop and Storehouse in Japan Atomic Energy Research Institute on October 26, 1975
- Fig.5.3.1 Gamma-ray spectrum of the soil sample (No.W-8) which was sampled in the soil surface
- Fig.5.3.2 Gamma-ray pulse height distributions from soil sample (W-8) and from background
- Fig.5.3.3 Depth distribution of radioactivities in soil directly under in-situ Ge(Li) detector
- Fig.5.3.4 Depth distribution of radioactivities in soil at point E
- Fig.5.3.5 Depth distribution of radioactivities in soil at point W
- Fig.5.3.6 Depth distribution of radioactivities in soil at point S
- Fig.5.3.7 Depth distribution of radioactivities in soil at point N
- Fig.6.1.1 Change in pulse height distributions of environmental gamma-rays measured by 49cm^3 true coaxial Ge(Li) detector placed on the lawn between Machine Shop and Storehouse in JAERI
- Fig.6.1.2 Change in counting rates of various peaks of environmental gamma-rays measured by 49cm^3 Ge(Li) detector
- Fig.6.2.1 49cm^3 coaxial Ge(Li) detector with lead shield to discriminate gamma-rays from radionuclides in the soil and to distinguish gamma-rays from plumes

Fig.6.2.2 Pulse height distributions of in-situ environmental gamma-rays obtained by 49cm³ coaxial Ge(Li) detector without and with a lead shield to suppress gamma-rays from the soil

Fig.6.3.1 Spectrum-to-dose rate conversion operator value function G(E) for 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector

1. まえがき

最近、エネルギー分解能のよい大体積 Ge (Li) 検出器が入手できるようになって、アメリカの Health and Safety Laboratory (HASL) および Lawrence Livermore Laboratory (LLL) では Photo 11* に示すように Ge (Li) 検出器を自動車に積んで野外に持ち出し、環境ガンマ線スペクトルを測定し始めた。^{1)~12)} 数時間の測定で、例えば Fig 5.21 (後述) に示すような環境ガンマ線のパルス波高分布が得られ、このピーク面積から、土壌中の自然放射能 K-40, U-238 崩壊系列中の核種 (Ra-226, Bi-214), Th-232 崩壊系列中の核種 (Ac-228, Tl-208, Pb-212 など) およびフォールアウト核種 (Cs-137) の濃度や、それらの核種の線量率への寄与分を導き出す方法が開発された。現在の所、フォールアウト核種に関しては、その土壌中の深さ方向の分布が計算の過程で必要であるので、土壌試料のサンプリング測定も必要であるという欠点を持つけれども、通常に採取する土壌試料は数 100 g であり、その測定時間は 1 試料だけで 50,000 sec 程度を要するのに比べて、この in-situ spectrometry (field spectrometry とも云う) は土全体を見るので 5,000 sec 程度の測定時間で済むという利点を持ち、また、土壌採取、処理の手数をはぶき、さらに、測定地点における平均的な測定値が得られるという特徴を持っている。また、Fig.5.21 に示されるように Ge (Li) 検出器が優れたエネルギー分解能を持っているので、自然放射能の $\frac{1}{100}$ 程度の人工放射能を選別することができ、原子力施設からの放射能による環境汚染が問題となっている現在、非常に有用な測定方法として期待されている。

Photo 1.1 に見られるように in-situ ガンマ線スペクトロメータの心臓である Ge (Li) 検出器は、持ち運びに便利のように、小型のクライオスタット (液体窒素容量 5 ~ 10 l) に下向きに取り付けられ、その中心が地面から 1 m の高さになるように 3 脚で支持されている。測定時間を短縮するには、できるだけ大きな検出効率を持つ検出器が望ましい。エネルギー分解能はできるだけ良いものが望まれる。また、第 2 章、第 3 章に説明されるように、検出器の検出効率のガンマ線入射角度依存性 ($R(\theta)$) がデータ解析時の計算に入ってくるので、検出器の直径、長さ、その支持構造、エンド・キャップなどにも考慮を払って角度依存性を持たないようにすることが望まれる。in-situ 測定で現在使用されている Ge (Li) 検出器の例を Table 11** に示す。

Ge (Li) 検出器の出力は約 30 m のケーブル⁺で自動車に搭載された 4096 チャンネル・アナライザに導かれ、磁気テープなどに分析記録される。簡単なピーク面積計算などは現場で行なえるが、複雑な処理は、持ち帰った磁気テープを大型計算機にかけて行なう。100V AC 電源としては、1200 W のガソリン発電機あるいは 120 AH の蓄電池と DC-AC インバータの組み合わせを自動車に搭載している。

* Lawrence Livermore Laboratory の Paul L. Phelps から送られて来た写真。

Paul L. Phelps 氏に深く感謝します。

** HASL - 300 "HASL Procedures Manual" (August 1975) によれば、上向きのディップ・スタックにとりつけた 120 cm³ Ge (Li) 検出器を使用しているとの記述があるが、特性については何も書かれていない。

+ 測定に際して、自動車によるガンマ線遮蔽をさけるために、20 m 以上検出器を自動車から離す。

Ge (Li) 検出器の出力パルス波高分布中のガンマ線ピークの計数率から、土壌中の放射性核種の濃度および、それら核種からの検出器位置における線量率を計算する方法は、Beck, Condon, and Lowder が NaI (Tl) 検出器について開発した方法¹³⁾⁵⁾を用いる。すなわち、

N_f/S : 土の単位放射能 (Ci/g あるいは Ci/km²) あたりのピーク計数率 (cps)

N_o/ϕ : 点線源を検出器直下 ($\theta = 0^\circ$) に 1 m 以上離しておき測定したときの単位ガンマ線束 (photons/cm² sec) あたりのピーク計数率 (cps) (実測する)

N_f/N_o : 検出器のピーク検出効率の角度依存性を $R(\theta)$ (実測する) とするとき、

$$N_f/N_o = \frac{1}{\phi} \int_0^{\pi/2} R(\theta) \frac{d\phi}{d\theta} d\theta \quad (11)$$

である。 $d\phi/d\theta$ は、土壌中のガンマ線源の分布状態により異なった計算式で与えられる。

としたとき、

$$\frac{N_f}{N_s} = \frac{N_o}{\phi} \cdot \frac{N_f}{N_o} \cdot \frac{\phi}{S} \quad (12)$$

が成立する。 $\frac{N_o}{\phi}$, $\frac{N_f}{N_o}$ は実測にもとづいた計算、 $\frac{\phi}{S}$ は理論計算により得られるので、 N_f/S が計算できる。したがって、実際の in-situ 測定にピーク計数率が測定されると、それを N_f/S で割って、土壌中の放射能濃度が求められる。

地上高 1 m における線量率 ($\mu R/h$) についても、同様に、

$$\frac{N_f}{I} = \frac{N_o}{\phi} \cdot \frac{N_f}{N_o} \cdot \frac{\phi}{I} \quad (13)$$

から、単位線量率 ($\mu R/h$) あたりのピーク計数率 (cps) が求められる。このとき、直接ガンマ線のみでなく散乱ガンマ線の寄与を考慮する必要があり、散乱ガンマ線の寄与については、Beck and De Planque^{14) 15)} が計算している。

この解析を行なう上で便利で有用な諸表が Beck, De Campo and Gogolak : HASL - 258⁵⁾ に記載されている。この解析方法の精度については、Beck ら⁵⁾ Anspaugh ら⁹⁾ が検討し、15% 以内と報告している。しかし、精度の高い解析結果が得られるといっても、計算式的前提となっている土壌中の核種濃度の分布が実際の分布と異なっていた場合は高い精度が望めないことは勿論で、農業機械で掘りかえされた場所や交通のはげしい場所で行なうことはあまり適当でない。

この in-situ 測定の応用例としては、自然放射能 K-40, U-238, Th-232 の場所による差の測定¹⁰⁾、U-238, Th-232 崩壊系列中の核種の放射平衡からのずれの測定⁵⁾、Nevada 原爆試験場の残留放射能の測定⁸⁾、原爆実験フォールアウト測定 (Cs-137, Zr-95, Nb-95, Ce-144, Sb-125 など)、フォールアウト核種の濃度の場所による差 (Cs-137 が雨水で流れるかどうか)¹⁰⁾、土中の Pu-239 の測定 (Am-241 の 60 keV ガンマ線を測定することにより Am-241 と共存する Pu-239 の量を求める)⁵⁾、土中の Sr-90 の測定 (経験的に Sr-90 と Cs-137 の比が 15 であることが判っているので、Cs-137 の量から Sr-90 を求める)⁵⁾、ウランを含むコンクリート構造物中の線量率の測定⁵⁾、などが試みられている。

原子力施設近傍の環境モニタリングへの応用としては、原子炉各部におけるガンマ線スペクトルの測定⁷⁾、スタックからの Ar-41, Kr, Xe などの放射性排ガスの測定 (精密に線量率を求めるには

Plume の geometry に関する知識が必要)^{3) 5)}, BWR タービン中の一次蒸気からの N-16 による線量率の測定⁴⁾, 原子炉排水のモニタ¹⁰⁾, 原子力施設設置前のベースライン測定¹¹⁾, などが試みられた。

我が国においては, Ge(Li) 検出器を使用した in-situ 測定は, 理化学研究所⁶⁾ および筆者ら^{17)~23)} が手を着けているだけである。⁺ 今後, 我が国においても, 盛んになると予想される。我が国で行なわれている NaI(Tl) 検出器を使用した in-situ 測定は Beck ら⁵⁾ の解析方式を使用しておらず, 例えば原研, 森内茂氏らのスペクトル線量変換演算子による線量評価^{25) 26)} が使用されている。Beck らの HASL⁵⁾ 方式と原研森内氏の解析方法^{25) 26)} の比較^{19) 20)} や, 森内氏の方法を Ge(Li) spectrometry に適用²³⁾ すると, なども興味ある問題である。また, 米国では土中あるいは土表面の Pu や Am-241 の in-situ 測定技術の開発に研究者の興味が向けられているようである。

筆者らは, 本報告で筆者らの行なった Ge(Li) in-situ spectrometry の大要を報告するが, この内容は将来 Ge(Li) in-situ spectrometry を試みられる方々に参考になるようにできるだけ詳細に記述した。

第2章に H・L・Beck らの開発した環境ガンマ線の in-situ 測定結果の解析方式⁵⁾ を詳細に説明し, 解析に必要な表や図面を附した。第3章は, 筆者らの試作した 73cm³ closed-end 同軸型 Ge(Li) 検出器の製作方法, その一般的特性, 入射ガンマ線角度依存性, 環境ガンマ線検出特性の測定結果を述べた。第4章は, 土壌試料の採取方法, 低バックグラウンド Ge(Li) ガンマ線スペクトロメータおよびそのガンマ線検出特性を記述した。第5章は, 環境ガンマ線 in-situ 測定を行なった場所(日本原子力研究所東海研究所構内), Ge(Li) 検出器および NaI(Tl) 検出器による in-situ 測定結果, 採取した土壌試料中のガンマ線測定結果を述べた。第6章で Ge(Li) 検出器を用いた in-situ 測定の応用, 特に, 環境ガンマ線スペクトルの時間的変動の測定, Plumes からのガンマ線測定用に製作した鉛遮蔽体を持つ Ge(Li) 検出器の特性, 73cm³ Ge(Li) 検出器のスペクトル線量変換演算子関数の決定について記述した。

+ 金沢大学低レベル放射能実験施設が計画²⁴⁾中。Princeton γ -tech 社製の検出効率 22%, エネルギー分解能 2.0 keV の Ge(Li) 検出器と NAIG 社製のパルス波高分析装置(出力は CRT とカセットテープ)をニッサン・キャラバンを改造した自動車に搭載する。冷房などの電源はホンダの 1.3 KW 発電機, パルス波高分析装置の電源は電池および DC・AC コンバータである。全費用は~1,700 万円ということである。

2. 環境ガンマ線の in-situ 測定における解析方法

Ge (Li) 検出器および NaI (Tl) 検出器を野外に持ち出し測定した環境ガンマ線のパルス波高分布のピーク計数率から、土壌中の放射性核種の濃度 (pCi/g、あるいは、mCi/km²) および、それらの核種のもたらす検出器位置における線量率を計算する方法は、Beck, Condon and Lowder¹³⁾により開発された。すなわち、土壌中の単位放射能 (pCi/g あるいは mCi/km²) あたりの検出器のピーク計数率 (cps) N_f/S および単位放射能あたりの線量率 ($\mu R/h$)、 N_f/I をあらかじめ実験と理論により計算しておいて、in-situ 測定によって得られた各ガンマ線ピークの計数率を N_f/S あるいは N_f/I で割って、in-situ 測定点における土壌中の放射能濃度あるいは線量率を得る方法である。Table 2.1 に示した通り、 N_f/S あるいは N_f/I は

$$\frac{N_f}{S} = \frac{N_0}{\Phi} \cdot \frac{N_f}{N_0} \cdot \frac{\Phi}{S} \quad \dots\dots\dots (21)$$

あるいは

$$\frac{N_f}{I} = \frac{N_0}{\Phi} \cdot \frac{N_f}{N_0} \cdot \frac{\Phi}{I} \quad \dots\dots\dots (22)$$

を用いて計算する。こゝで、

N_f/S : 土壌中の単位放射能 (pCi/g あるいは mCi/km²) あたりのピーク計数率 (cps)

N_0/Φ : 点線源を検出器直下 ($\theta = 0^\circ$) に 1 m 以上離して置いたときの単位ガンマ線束 (photon/cm² sec) あたりのピーク計数率 (cps) (実測する)

N_f/N_0 : 検出器のピーク検出効率の角度依存性 $R(\theta)$ (実測する) と、土壌中のガンマ線源の分布状態により異なる検出器位置におけるガンマ線束 (photons/cm² sec) の入射ガンマ線角度 θ 依存性、 $d\Phi/d\theta$ (理論計算値) を考慮した補正係数。

$$\frac{N_f}{N_0} = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\pi/2} R(\theta) \frac{d\Phi}{d\theta} d\theta \quad \dots\dots\dots (23)$$

で与えられる。土壌中のガンマ線源の分布状態に対応した および $d\Phi/d\theta$ の計算式については後述する ((25) ~ (213) 式参照)。

Φ/S : 土壌中の単位放射能 (pCi/g あるいは mCi/km²) あたりの、検出器に入る直接ガンマ線束 (photons/cm² sec) であり、後述の (25), (28), (211) 式により計算される。

Φ/I : 土壌中の核種の放出するあるエネルギーのガンマ線が検出器位置において与える直接ガンマ線束 (photons/cm² sec) を、その核種の放出する全ガンマ線 (各種エネルギーのガンマ線を含む) が検出器位置 (通常地上 1 m 高) において与える線量率 ($\mu R/h$) で割った値。ある核種が放出するガンマ線は、直接検出器位置に到達して線量率を与えるとともに、土壌中や大気中で散乱したガンマ線 (エネルギーは直接ガンマ線のエネルギーよりも低くなっている) も検出器位置に到達して線量率を与えるので、散乱ガンマ線の影響を計算しなければならない。Beck and DePlanque¹⁵⁾ は、ガンマ線の transport 方程式を多項式

* Cs-137 などのフォールアウト核種に対して用いる。(213) 式参照。

+ 土壌や大気で散乱されないで、線源位置から検出器へ直接入ってくるガンマ線の意味で、このガンマ線のうち検出器で全吸収されたものがパルス波高分布中でピークを形づくる。

を用いて解き、線量率に対する散乱ガンマ線の影響を計算している。本報告においては、Beckら⁵⁾が、Al₂O₃ (重量比 13.5%), Fe₂O₃ (4.5%), SiO₂ (67.5%), CO₂ (4.5%), H₂O (10%)の土壌(密度 1.6g/cm³)に対して計算した Φ/I の値 (HASL-258⁵⁾の Tables 7, 9, 11, 12 に示されている値)を使用した。

および $d\Phi/d\theta$ は、次のように計算される。Table 2.2 に示したように、地表面上 h (cm) の高さに検出器をおいたとき、地下 Z (cm) の深さの

$$S = S_0 \exp(-\alpha Z) \dots\dots\dots (24)$$

で与えられる単位体積の土壌の単位時間あたりのガンマ線放出率 (photons/cm² sec) が検出器位置にもたらず直接ガンマ線束 (photons/cm² sec) およびその角度依存性 $d\Phi/d\theta$ は次のように計算できる。ここで S_0 は地表面 ($Z = 0$) における土壌が単位体積、単位時間あたりに放出するガンマ線放出率 (photons/cm² sec), α は、土壌中のガンマ線放出核種の深さ方向の分布状態を示す減衰定数 (cm⁻¹), θ は検出器からの垂直線に対して検出器と問題としている土壌を結ぶ直線の作る角度である。空気中のガンマ線の減衰定数 μ_a (cm⁻¹), 土壌の密度 ρ (g/cm³) とし、 r を検出器の中心と問題の土壌の間の距離をすると、および $d\Phi/d\theta$ は、

$$\Phi = \iint \frac{S_0}{4\pi r^2} \exp[-(\alpha/\rho)(\rho Z)] \exp(-\mu_s Z/\cos\theta) \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \times 2\pi r \sin\theta \, r \, dr \, d\theta$$

$$\Phi = \frac{S_0}{2} \int_0^{\pi/2} \int_{h/\cos\theta}^{\infty} \exp[-\{(\alpha/\rho)\rho + (\mu_s/\cos\theta)\}Z] \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \sin\theta \, d r \, d\theta$$

$$\cos\theta = \omega, \quad r = \frac{Z+h}{\omega}, \quad dr = \frac{dZ}{\omega} \text{ とおくと,}$$

$$\Phi = \frac{S_0}{2} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} \exp[-\{(\alpha/\rho)\rho + (\mu_s/\omega)\}Z] dZ \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \frac{\sin\theta}{\cos\theta} d\theta$$

$$\Phi = \frac{S_0}{2} \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} \frac{\sin\theta}{(\alpha/\rho)\cos\theta + (\mu_s/\rho)} \exp(-\mu_a h/\cos\theta) d\theta \dots\dots\dots (25)$$

$$\frac{d\Phi}{d\theta} = \frac{S_0}{2\rho} \frac{\sin\theta}{(\alpha/\rho)\cos\theta + (\mu_s/\rho)} \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \dots\dots\dots (26)$$

となる。(25), (26) 式は、フォールアウト核種のように深さ方向 Z に対して、 $\exp(-\alpha Z)$ で分布する核種に対して使用されるもので、 α の値は、実際に土壌試料を採取して、核種の深さ方向の分布を測定して求めなければならない(第4章参照)。

深さ Z 方向に対する核種の分布が、K-40, U-238 とその娘核種, Th-232 とその娘核種のように一様である場合は、

$$\alpha = 0 \dots\dots\dots (27)$$

とおけるから、(25), (26) 式はそれぞれ

$$\Phi = (S_0/\rho) / [2\mu_s/\rho] \int_0^{\pi/2} \exp(-\mu_{ah}/\cos\theta) \sin\theta d\theta \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$\frac{d\Phi}{d\theta} = \frac{(S_0/\rho)\sin\theta}{2(\mu_s/\rho)} \exp(-\mu_{ah}/\cos\theta) \quad \dots\dots\dots (29)$$

となる。

また、降下した直後のフォールアウト核種のように、地表面のみに核種が存在するときは、

$$\alpha \rightarrow \text{無限大} \quad \dots\dots\dots (210)$$

であるので、(25)、(26) 式はそれぞれ

$$\Phi = (S_0/\rho) / [2\mu_s/\rho] \int_0^{\pi/2} \exp(-\mu_{ah}/\cos\theta) d\theta = (S_A/2) E_1(\mu_{ah}) \quad \dots\dots (211)$$

$$\frac{d\Phi}{d\theta} = (S_A/2) \tan\theta \exp(-\mu_{ah}/\cos\theta) \quad \dots\dots\dots (212)$$

となる。ここで S_A は 1 cm^2 の断面積を持ち深さ方向に無限長の土壤の円柱が含む核種の放出するガンマ線の総和 (photons/cm² sec) 換言すれば、地表 1 cm^2 あたりに降下したフォールアウト核種の総和を意味しており、

$$S_A = \int_0^\infty S_0(-\alpha Z) dZ = S_0/\alpha \quad \dots\dots\dots (213)$$

である。また、 E_1 は exponential integral と呼ばれる関数である。

具体的に(21)式～(213)式を用いて、in-situ測定結果の解析を行なうときに、必要な数値や図表を次に示しておく。

先づ、 Φ 、 $d\Phi/d\theta$ を計算するのに必要な、土壤および空気のガンマ線減衰定数 μ や密度 ρ について説明する。Table 23は、文献⁵⁾²⁹⁾からこれらの値を書き写したものである。最初の3つの欄は、Beck⁵⁾が計算した土壤に対する μ/ρ の値を示した、例えばH₂Oを重量比で10%含む土壤は、

Al ₂ O ₃	13.5 重量%	} \quad \dots\dots\dots (214)
Fe ₂ O ₃	45 "	
SiO ₂	67.5 "	
CO ₂	45 "	
H ₂ O	10 "	
ρ	1.6g/cm ³	

で計算したものである。後述するように、Beck⁵⁾らの HASL-258(1972)に示されている放射性核種濃度や線量率を計算した諸表は(214)に示した組成を持つ土壤に対して計算されたものである。

Fig. 21①に μ/ρ をガンマ線エネルギーの関数としてプロットした。

Anspaugh⁹⁾らは、 ρ として

$$\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3 \quad \dots\dots\dots (215)$$

μ/ρ としては、100 keV 以下のガンマ線に対しては、ALの値、100 keV 以上のガンマ線に対しては水の値を使用している。Al および水の μ/ρ ²⁹⁾をTable 23に、Anspaughらの μ/ρ をFig. 21②に示した。Fig. 21から判るようにAnspaugh⁹⁾の使用している μ/ρ はH. L. Beck⁵⁾ら

の使用する値①よりは若干大きい。しかし、H.L.Beckらは $\rho = 16 \text{ g/cm}^3$ 、Anspaughらは $\rho = 15 \text{ g/cm}^3$ を使用しているので、 $(\mu/\rho) \times \rho$ で μ に直して見ると、Table. 23 および Fig. 2.2に見られるように両者はほとんど等しくなる。Anspaughらの密度は彼らのLawrence Livermore Laboratory 附近で採取した土壌試料の測定値にもとづいている。しかし、 ρ および μ/ρ は場所により異なっているのは事実であり、 μ/ρ の値は10%以上は違わないが、 ρ の値は2倍位まで異なる可能性があり、これが誤差をもたらすので、実際に土壌を採取して測定する必要があると、彼らは述べている。

空気の減衰定数 μ/ρ はBeck⁵⁾らの表から写した。これは、

窒素 N	75.5	重量%	} (2.16)
酸素 O	232	"		
アルゴン Ar	1.3	"		
密度 (76 cmHg)	0.001205	g/cm^3		

に対して、C.M. Davisson が計算した total attenuation coefficient without coherent の値²⁹⁾と同じものである。たゞし、文献29)の表では、ガンマ線エネルギー30 keVに対する μ/ρ は $0.347 \text{ cm}^2/\text{g}$ となっているが、Beck⁵⁾らの表では $0.315 \text{ cm}^2/\text{g}$ となっている。ガンマ線エネルギーに対してプロットして見るとFig. 2.1のようになり、 $0.347 \text{ cm}^2/\text{g}$ では大きすぎ、 $0.315 \text{ cm}^2/\text{g}$ ではスムーズに線が引けるので、 $0.315 \text{ cm}^2/\text{g}$ が正しいであろう。

土壌中のガンマ線放出核種の深さ方向の分布状態を表わす減衰定数 α (cm^{-1})については、 $\alpha = 0$ (土壌中に一様に分布)から $\alpha = \infty$ (地表面のみに分布)を取り得る。土壌試料を採取して、 α を測定することが必要である(第4章参照)。

次に、検出器位置におけるガンマ線束のガンマ線入射角度依存性について、具体的な計算例を示しておく。これは、in-situ 測定用の検出器の持つべき角度依存性を検討したり、限られた面積の場所で測定を行なう場合の誤差を考えたりするときに、必要となるからである。検出器に入射するガンマ線束の角度依存性 $(d\Phi/d\theta)$ は、検出器の中心を通る垂直線からはかったガンマ線の入射角度 θ に対して、 $\alpha \neq 0$ 、 $\alpha = 0$ 、および $\alpha \rightarrow \infty$ に対応して、それぞれ(2.6)、(2.9)および(2.12)式で表わされる。662 keVガンマ線に対して $\frac{1}{\Phi} \left(\frac{d\Phi}{d\theta} \right)$ を計算して、Table. 24*が得られ、これを θ に対してプロットすると、Fig. 2.3が得られる。Fig. 2.3から判るように、 $\theta = 0$ では $d\Phi/d\theta = 0$ である。すなわち、検出器直下の土壌中の放射性核種の放出するガンマ線がもっとも強く検出器によって検出されるように思われやすいが、そうではない。すべての α/ρ の値に対して、 $70^\circ \sim 90^\circ$ 附近から来るガンマ線束が一番強いことが判る。特に $\alpha/\rho \rightarrow \infty$ すなわち、フォールアウト直後の地表面のみに存在するガンマ線源に対しては、 90° 附近から来るガンマ線の影響が大きいことが判る。 $\alpha/\rho \rightarrow \infty$ に対する $(d\Phi/d\theta)/\Phi$ は 89.5° 附近で最大値0.168となり、それより θ が大きくなると急激に減少して、 90° で0となる。

地上1mの高さにおける662 keVガンマ線束に関して、 $\theta = (0^\circ \sim \theta^\circ)$ から来るガンマ線の全ガン

* θ (radian)と θ (degree)では、 $\theta = \frac{\pi}{180} \theta$ の関係があるので、 $\frac{d\Phi}{d\theta} = \frac{\pi}{180} \frac{d\Phi}{d\theta}$ となる。

Table. 23は $\frac{d\Phi}{d\theta}$ を計算したものである。

マ線束 ($\theta = 0 \sim 90^\circ$) に対する割合を計算して、プロットすると Fig. 2.4 が得られる。0°と25°の間の角度 θ から来るガンマ線束は、全角度 ($\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$) から来る全ガンマ線束の10%以下でしかないことが判る。また、0°と60°の間の角度から来るガンマ線束は、全ガンマ線束の50%以下でしかない。

同様に、検出器直下から半径 R (m) 以内の地表の面積内から来るガンマ線束の、無限長半径の面積から来るガンマ線束に対する割合を半径 R (m) の関数としてプロットすると Fig. 2.5 が得られる。Fig. 2.4 は角度 θ に対してプロットされているのに対して、Fig. 2.5 は、

$$R = h \tan \theta$$

$$h = 1 \text{ m}$$

でプロットされたものである。

Fig. 2.5 から判るように、 $\alpha/\rho = 0$ (一様分布) に対しては、半径 10m の面積から来るガンマ線束は、全ガンマ線束の92%であるが、フォールアウト直後の地表面のみにガンマ線源が存在する場合 ($\alpha/\rho \rightarrow \infty$) は54%でしかない。半径 30m とすれば、 $\alpha/\rho = 0$ に対して98%、 $\alpha/\rho \rightarrow \infty$ に対して77%となる。

H.L. Beck⁵⁾ は、(2.14) 式に示した組成と密度を持つ土壌に対する μ_s/ρ (Table. 2.3 の第2欄、Fig. 2.1 ①に示されている値) を使用して、 $\alpha/\rho = 0$ (一様分布)、0.0625, 0.206, 0.312, 0.625, ∞ (表面分布) (cm^2/g) に対して、土壌中の放射能濃度および地上1mの高さにある検出器位置における線量率を計算するのに便利な諸表を、HASL-258 (1972)⁵⁾ に示した。以下に、それらの表を転載した。

Table. 2.5 は、深さ Z m (あるいは、 Z に ρ を掛けて $\rho Z \text{ g/cm}^2$ の深さ) にある放射性核種が、単位重量の土壌あたり毎秒 S 個のガンマ線光子を出したとき、地上1mの検出器位置で観測されるはずの一度も散乱されないガンマ線の線束 (photons/cm² sec) の計算値を示している。ここで、 S は、

$$\left. \begin{aligned} S &= \alpha/\rho \ S_A e^{-(\alpha/\rho)(\rho Z)} \\ S_A &= 1.0 \text{ photon/cm}^2 \text{ sec} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.17)$$

で、 S_A は 1 cm^2 の断面積を持つ無限長の円柱の土壌の放出する全ガンマ線光子数 ((2.13) 式参照) を意味し、単位 S_A あたりのガンマ線束 ϕ を、表が示している。 $\alpha/\rho = 0$ に対しては、 $S_0/\rho = 1.0$ (photon/g) に対する の値を示している ((2.8) 式参照)。

Table. 2.5 に示した値を、地中に一様に分布するガンマ線源 ($\alpha/\rho = 0$) に対してプロットすると、Fig. 2.6 が得られる。また、深さ方向 Z (cm) に対して、 $\exp(-\alpha Z)$ で分布するガンマ線源についてプロットすると Fig. 2.7 が得られる。

Table. 2.5 からガンマ線の in-situ 測定で予想される放射性核種の濃度 (pCi/g) に対する検出器位置 (地上1m) における一度も散乱を受けなかったガンマ線束 (photons/cm² sec) が計算できる。無限に広い地中に一様に、土壌1gあたり1pCi存在する核種があり、その核種がエネルギー E_r (keV) のガンマ線を1 dpsあたりA本放出する場合、地上1mにおいた検出器位置における非散乱ガンマ線束は(2.8)式の

$$\phi = \frac{(S_0/\rho)}{2(\mu_s/\rho)} \int_0^{\pi/2} \exp(-\mu_{ah}/\cos \theta) \sin \theta \ d\theta$$

中の S_0 として、

+ HASL-258のTable 1を転載したもの。ただし、 $\alpha/\rho = 0$, Source energy 200 keVの値3.9056は3.7056の方が正しいと思われるので訂正した。

$$S_0/\rho = A \times 3.7 \times 10^{-2} \text{ (photons/sec) / (pCi/g)}$$

を使用して計算をすればよい。Aは、核種1崩壊あたりのガンマ線放出率⁺であり、核種によって決った定数であり、 $S_0/\rho = 1 \text{ (photons/sec) / g}$ に対するガンマ線束 Φ の値は、Table. 25, Fig. 26に示されている。Table. 26^{*}は土壌中に1 pCi/gで一様に分布しているU-238の娘核種(Ra-226, Pb-214, Bi-214), Th-232の娘核種(Ac-228, Pb-212, Ra-224, Tl-208, Bi-212), K-40の地上1 mの検出器位置に与える非散乱ガンマ線束(photons/cm² sec)を計算したものである。計算に使用したAの値は左から3番目の欄に示されている。

土壌中の深さ方向Z cmに関して、 $\exp(-\alpha Z)$ で分布する核種、具体的には1 mCi/km²あたりのフォールアウト核種に対する地上1 mの検出器位置における非散乱ガンマ線束の計算値をTable 27^{**}に示す。この計算に用いた1崩壊あたりのガンマ線放出率が左から3番目の欄に示されている。 $\alpha/\rho = \infty$ は地表面のみに核種が存在する場合、すなわち、フォールアウト核種が地表面に降りた直後に対応している。時間が経つにつれて、雨水などで、これらの核種が地中に入って行き、 α/ρ が小さくなっていく。実際のin-situ測定結果の解析においては、その核種の α/ρ を採取した土試料について測定し、その α/ρ に対して、Table. 29を使用することになる。Cs-137の662 keVガンマ線束が、 α/ρ に対してどのように変化するかをFig. 28に示す。

次に線量率($\mu\text{R/h}$)を計算する。まづ、エネルギー E_r (MeV)の単位ガンマ線束(1 photon/cm² sec)が与える線量率を計算する必要がある。1 Rは0°C, 760 mmHgの空気1 cm³(0.001293 g)中で1 e.s.u.のイオンを作るX線あるいはガンマ線の量として定義されるので、1 gの空気中に出てくるイオン対の数は、

$$\text{イオン対の数} = \frac{1 \text{ e.s.u.}}{480 \times 10^{-10} \text{ e.s.u.}} \times \frac{1}{1293 \times 10^{-3}} = 161 \times 10^{12} \text{ イオン対/g}$$

したがって、1 gの空気中に吸収されるエネルギーは、

$$161 \times 10^{12} \left(\frac{\text{イオン対}}{\text{g}} \right) \times 325 \text{ eV} = 5.24 \times 10^7 \text{ MeV/g}$$

となる。したがって、

$$1 \mu\text{R} = 5.24 \text{ MeV/g}$$

$$1 \mu\text{R/h} = \frac{5.24 \text{ MeV/g}}{3600 \text{ sec}} = 0.01456 \text{ MeV/g} \cdot \text{sec}$$

となる。

エネルギー E_r (MeV)のガンマ線が1 gの空気中で失なうエネルギーは、エネルギー・トランスファー係数(Energy transfer coefficient) μ_e/ρ ²⁹⁾に E_r をかけた値 $\mu_e E_r/\rho$ (MeVcm²/g)となる。これを0.01456 MeV/gsecで割った値($\mu_e E_r/(0.01456 \rho)$)が単位ガンマ線あたりの線量率($\mu\text{R/h}/\text{photon/cm}^2 \text{ sec}$)となる。

+ このAの値が異なれば、pCi/gあたりのガンマ線束 Φ が異なることに注意。したがって、Aの精度が問題となる。Aは、年々新しいデータが報告されるので、³⁰⁾将来、Table 28の値が変更される可能性は大きい。

* HASL-258のTable 4を転載したもの。ただしAc-228の1588 keVに対する線束は1.23(-2)ではなくて1.63(-2)が正しいと思われるので訂正した。

** HASL-258のTable 3.を転載したもの。

Table 2.8 に $\mu e/\rho$, $\mu eE/\rho$, $\mu eE/0.01456\rho$ の計算値を示す。Fig. 2.9 にこれらの計算値をガンマ線エネルギーに対してプロットした図を示す。

次に土壌中の単位放射能あたりの検出器位置（地上1m高）における線量率を計算しなければならないが、この計算は簡単にはできない。Table 2.5 に土壌1g中に1ガンマ線を放出する核種が一樣に存在するとき（ $\mu/\rho=0$ ）、地上1mの検出器位置における非散乱ガンマ線束が計算されているので、このガンマ線束にTable 2.10に示した単位ガンマ線束の与える線量率を掛けると、土壌1gあたり1ガンマ線放出核種に対する線量率が求められそうであるが、そうではない。Table 2.5は、一度も散乱されなかったガンマ線の線束のみを示しており、実際は、土壌や空気中で散乱されてエネルギーを失った散乱ガンマ線が検出器位置にやってきて与える線量率を考慮する必要がある。この散乱ガンマ線のガンマ線束（ガンマ線エネルギースペクトルも考慮したもの）を計算し、それに線量率に換算する係数をかけて線量率を求めなければならない。

この散乱ガンマ線による線量率の評価方法としては、いわゆる線量のビルドアップ率を使用する方法¹³⁾と、ボルツマンの輸送方程式をルジャンドル多項式を用いて解く方法¹⁴⁾¹⁵⁾があり、後者の方が精度が高い結果を与える。H.L.Beckらがボルツマン輸送方程式を解いた結果¹⁵⁾⁵⁾をTable 2.9*に示した。例えば、地中に一樣に分布するガンマ線源（土壌1g中から1ガンマ線/sec）の場合（ $\mu/\rho=0$ ）、地上1m高における非散乱ガンマ線および散乱ガンマ線による全線量率（ $\mu R/h$ ）は、左から2番目の欄に示された値となる。参考のために非散乱ガンマ線束（Table 2.5）に線量率への換算係数（Table 2.10, Fig 2.9）を掛けて計算した非散乱ガンマ線線量率をTable 2.10の左から4番目の欄に示した。非散乱ガンマ線による線量率の全ガンマ線線量率に対する比を最右欄に示した。この比は50keVガンマ線で0.2であり、2.5MeVガンマ線に対して0.6となる。すなわち、50keVガンマ線のあたえる全線量率のうち、20%が非散乱ガンマ線によるものであり、80%が散乱ガンマ線によるものである。2.5MeVガンマ線のあたえる全線量率のうち60%が非散乱ガンマ線により、40%が散乱線によるものである。Table 2.11の結果をFig. 2.10, Fig. 2.11にプロットした。

Table 2.12あるいはFig. 2.10, Fig. 2.11を使用して土壌1g中毎秒1ガンマ線を放出する核種が存在するときの検出器位置（地上1m）における全線量率が算出できるから、土壌1g中1pCiの核種が存在するときの検出器位置（地上1m高）における全線量率は、その核種の1崩壊あたりのガンマ線放出率をAとしたとき、

$$A \times 3.7 \times 10^{-2}$$

本のガンマ線が土壌1g中から出ることになるので、Table 2.12あるいはFig. 2.10, Fig. 2.11で得られた値に $A \times 3.7 \times 10^{-2}$ を掛けることにより導かれる。

この計算を一樣分布する自然放射能核種について行なうと、Table 2.11が得られる。

U-238崩壊系列、Th-232崩壊系列については、系列内の各核種が放射平衡にあるとすると、各核種の毎秒の崩壊数すなわちpCi/gは等しいはずであるので、各崩壊系列内の核種1pCi/gあたりの線量率は、各核種1pCi/gあたりの線量率の和となり、H.L.Beckらの計算によれば、Table 2.12に示した通り、U-238崩壊系列に対しては1pCi/gあたり $1.82 \mu R/h$ （=Bi-214 1.60 $\mu R/h$ + Pb-214 0.20 $\mu R/h$ + その他 0.02 $\mu R/h$ ）、Th-232崩壊系列に対しては1pCi/gあたり2.82

* HASL-235のTable 7を転載したもの。

$\mu\text{R}/\text{h}$ (= Tl-208 1.36 $\mu\text{R}/\text{h}$ + Ac-228 1.18 $\mu\text{R}/\text{h}$ + Pb-212 0.09 $\mu\text{R}/\text{h}$ + その他 0.09 $\mu\text{R}/\text{h}$) となる。⁺

Table 2.12, Table 2.13 は土壤中 1 pCi/g あたりの線量率を示したが, 検出器位置における非散乱ガンマ線束 (Table 2.6) を全線量率 I (Table 2.11) で割り算をすると, Φ/I が得られる。この値を Table 2.13^{*} に示す。したがって, どれか 1 本のガンマ線, 例えば Tl-208 の 2615 keV ガンマ線の検出器位置 (地上 1 m) における非散乱ガンマ線束 (photons/cm² sec) が測定できると, それを 5.92×10^{-2} で割れば Th-232 崩壊系列中の全核種の出すガンマ線による線量率 ($\mu\text{R}/\text{h}$) が出てくることになる。^{**}

土壤中の深さ方向 Z cm に $\exp(-\alpha Z)$ で分布するフォールアウト核種について, 検出器位置 (地上 1 m 高) における線量率の計算結果を Table 2.14^{***}, Table 2.15^{##} に示す。Table 2.15 を用いて, 測定した非散乱ガンマ線の線束から線量率を出すとき, 1 本のガンマ線の非散乱線束を Table 2.15 の (Φ/I) で割れば, そのガンマ線を出す核種による全線量率が得られることに注意すべきである。すなわち, 2 本以上のガンマ線を放出する核種の与える線量率が 1 本のガンマ線の非散乱線束を (Φ/I) で割ることにより得られるので, 1 つの核種が出す 2 本以上のガンマ線のおおのこのガンマ線の線量率を求めて合計する必要はない。

Fig. 2.12 は土壤中に $\exp(-\alpha Z)$ で分布するフォールアウト核種のうち Cs-137 の出す 662 keV ガンマ線に対する (Φ/I) を (α/ρ) に対してプロットしたものである。

+ Table 2.11 の subtotal の欄に示した筆者らの計算値は, 一番右欄に示した H. L. Beck らの計算値 (Table 2.12 に示した値) と若干異なっている。特に, U-238 系列, Th-232 系列の線量率において, 筆者らの計算値は H. L. Beck らの計算値よりも小さい。我々の計算には含まれないガンマ線が H. L. Beck らの計算値に入っていると思われる。

* HASL-258⁵⁾ の Table 12 を転載したもの。ただし, Ru-224, Tl-228 は Ra-224, Tl-208 のミスプリントと思われるので訂正した。なお, HASL-300¹²⁾ 中の Field gamma spectrometry の章 (1975 年 8 月) の Table 3 に同じ表が掲載されているが, その表の Pb-212 の 239 keV, Ra-224 の 241 keV に対する値は 0.0297 となっているが, これは Table 2.13 にあるように 0.0257 が正しい。

** Tl-208 の 2615 keV ガンマ線のみによる線量率が求まるのではないことに注意すべきである。

*** HASL-258 の Table 9 を転載したもの。

HASL-258 の Table 11 を転載したもの。

3. 環境ガンマ線測定用 Ge (Li) スペクトロメータ

環境ガンマ線の in-situ 測定に使用する Ge (Li) スペクトロメータとしては、次のような条件を満たすことが望ましい。

- (1) できるだけ短時間で充分な計数を得るために、できるだけ大きなガンマ線ピーク検出効率を持つこと。
- (2) この検出効率のガンマ線入射角度依存性はできるだけ平坦であることが望ましい。これは (1.1) 式中の $R(\theta)$ が 1 で一定となるため、 $N_f/N_o = 1$ となり、(1.2) 式が簡単になる。
- (3) エネルギー分解能が良いこと。ピーク/コンプトン比が良いこと。これは、自然放射能によるガンマ線と人工放射能によるガンマ線を分離する能力が高いことが望まれるためである。
- (4) 検出器自体および検出器の構造材、支持材の中に存在する放射能が出来るだけ低いこと。
- (5) 持ち運ぶものであるから、できるだけ軽く、頑丈で運びやすいものであること。
- (6) 液体窒素の消費量ができるだけ少ないこと。
- (7) 野外で測定するので、日射や雨風、湿度の影響をなるべく受け難いこと。
- (8) 必要な電源を持つこと。また、必要な電力はできるだけ少ないこと。
- (9) 全測定データの記録ができるだけ簡単にできること。また、ある程度のデータ処理ができること。
- (10) 移動が容易であること。

などの条件を満たすことが望ましい。これらの諸条件の重要性の順序は、その実験内容や経済的条件によって決まることになる。

(1) に対してはできるだけ大体積の i 層を持つ検出器、(2) に対しては、直径と長さがほぼ同じ程度で、かつ検出器の n⁺ 層やエンドキャップの厚さができるだけ薄くて一様であるような検出器、(3) に対してはできるだけ小さな静電容量を持ち、かつ電荷収集特性のよい検出器、(4) に対しては検出器周辺の材料、アルミニウム、銅、前置増幅器、モレキュラーシーブなどが U-238, Th-232, K-40, Co-60 などの放射能をできるだけ含まないようなものを選ぶこと、(5) に対しては材料はアルミニウムなどの軽いものを選び、クライオスタットは小さなもの (例えば 5 l) にすること、持ち運びが容易なように設計すること、かつ振動や衝撃に対して充分耐えるように設計すること、(6) に対してはクライオスタットをできるだけ液体窒素の消費量を減らすように設計すること、(7) に対しては、高電圧部分に湿気が集まらないようにする。日射で液体窒素の消費量が増したり、増幅器のゲインが変動したりしないようにする。風で倒れたり、雨で異常が生じないようにするなどが考えられよう。(8) に対しては、ガソリン発電機や電池と DC・AC コンバータを備える、できるだけ消費電力の小さい装置を選ぶ、(9) に対しては、カセットテープにデータを記録する、簡単な計算処理のできるパルス波高分析装置を選ぶ、(10) に対しては専用の自動車を持つことなどの対策が考えられる。

標準的なスペクトロメータとしては、5 l 程度の液体窒素容器を持つクライオスタットに 10 ~ 20 % 程度の 1.33 MeV ガンマ線ピーク検出効率と 2 keV 程度の分解能を持つ同軸型 Ge (Li) 検出器と前置増幅器をとりつけた重量 10 ~ 15 Kg 位の可搬型スペクトロメータに ~ 30 m のケーブルをつけ、自動車に搭載した増幅器に接続する方式となろう。自動車には、AC 発電機、蓄電池と DC・AC コンバータ、パルス波高分析装置、暖冷房装置、液体窒素容器を備えることになろう。

筆者らは、Ge (Li) 検出器を自作することができるので、7.5 l 液体窒素デューワーに 73 cm³ closed-

end 同軸型 Ge (Li) 検出器を取り付けた可搬型環境ガンマ線スペクトロメータを試作し、ありあわせの増幅系、マルチ・チャネル・パルス波高分析装置と組み合わせてその環境ガンマ線検出特性を調べた。したがって、暖冷房付きの自動車などなく、必要なときは、個人の乗用車で運搬した。

3.1 73cm³ Ge (Li) ガンマ線スペクトロメータの製作とその検出特性

直径 48 mm、長さ 44.5 mm の Hoboken 社製 p 型単結晶を用いて、クローズド・エンド同軸型 Ge (Li) 検出器を製作した。円柱型単結晶の中心軸に直交する一平面を除いた他のすべての面に Li を熱拡散させ (400°C, 10 分間) n⁺層 (0.5 mm 厚) を作った。n ペンタン中でドリフト電圧 250V を加え、ドリフト電流 2 A で、約 90 日間のドリフトを行なった。銅ステイン法により求めた p 層芯の直径は 12.2 mm であった。したがって、i 層厚は、

$$(48 - 0.5 \times 2 - 12.2) / 2 = 17.4 \text{ mm}$$

となる。円柱の軸方向も、17.4 mm だけ一様に i 層が作られているとして、i 層の体積を計算すると、73.2 cm³ となる。

この検出器を Photo 3.1.1 および Fig 3.1.1 に示す。小型の液体窒素デュワ (容量 7.5ℓ, Cryogenic Associates 社 SD-170 J) の下に検出器の軸を垂直方向にして、そのクローズド・エンド側が下方を向くように取り付けた。取り付けた時の写真を Photo 3.1.2 に示す。検出器は 1.5 mm 厚のアルミニウム製の 2 つ割りのホルダにインジウム箔を介してとりつけた。Photo 2.1.2 の上・中の写真は検出器をホルダに乗せた所、下はホルダで包んだ所を示す。ホルダの先端は直径 40 mm の窓を明けた。このホルダは 3 mm 厚のボロン・ナイトライド (電気絶縁物・熱良導体) を介して、冷却棒に、テフロン・ワッシャで絶縁したボルトを用いて締めつけた。このボルトに細いマンガニン線を半田付けし、他端はバイアス電圧用ハーメチック・シール端子に半田付けし、n⁺層への電圧供給用に使用した。Ge (Li) 検出器の p 層への接触は、テフロン箱の中のスプリングで針を検出器の p に押しつけて行なった。針と 7 ピン・ハーメチック・シールの 1 本の端子が細いマンガニン線で結ばれており、p 層から出た信号を前置増幅器 (Ortec 社製 120-4F) の入力に結合するようにした。1.5 mm 厚の Al エンド・キャップをかぶせて、真空バルブから、真空排気装置 (油回転ポンプ + 液体窒素トラップ) で排気し、真空バルブを閉じ、デュワに少量の液体窒素を入れて検出器を 0°C 程度に冷却し、クリーン・アップ処理 (700 V, 20 mA, 12 時間) を行なった。

検出器を 77°K に冷却してから、漏洩電流、静電容量のバイアス電圧依存性を測定した。その結果を Fig. 3.1.2 に示す。バイアス電圧 2500 V 印加時、漏洩電流は 0.1 nA 以下であり、静電容量は 15 pF (配線などによる浮遊容量 5 pF を差し引いた値) であった。

この検出器には、Photo 3.1.1 に見られる通り、3 脚^{*}をとりつけ、検出器の中心を、地上 1 m に置くことができるようにした。この検出器に前置増幅器 Ortec 社製 120-4F および高圧フィルタ Ortec 社製 119 B を取りつけた (Fig. 3.1.3 参照)。

小型ピン電源 Ortec 401M/402M にバイアス電源 Ortec 459, リサーチ増幅器 Ortec 450 (負入力, コース・ゲイン 20, ファイン・ゲイン 11.9, 時定数 2 μsec, ベースライン・レストアラ 高計数率, 出力ユニポーラ, 正 10 V) を収納した。前置増幅器の出力とリサーチ増幅器の入力

* 写真用の単脚 (SLIK 6009 HANDY POD, スリク・トリポッド株式会社製) を 3 本購入して使用した。

の間、高圧フィルタとバイアス電源の間は、30 m 長の同軸ケーブル (RG-62/u) で接続した。前置増幅器の電源として、Ortec 114 を使用した。小型ピン電源の交流 100 V 入力は 100 m 長のコードをリールに巻き込んだものを利用した。これらの電子回路を働かせたとき、交流 100 V の電流は、0.2 A (高圧電源 0.03 A, 前置増幅器 0.01 A, リサーチ増幅器 0.15 A) であった。リサーチ増幅器の出力信号をモニタする必要があるときは、シンクロスコープを使用するので、その交流電源も同じ 100 m 長のコードを使用した。交流電源が手近に得られない場合には、発電機を使用した。

4096 チャンネル・アナライザとしては、研究 2 棟 109 号室にある Nuclear Data 社製 ND-50/50 型あるいは Canberra Industries 社製 8100 型を使用した。リサーチ増幅器の出力を ND-50/50 型 4096 チャンネル・アナライザの入力へ接続する信号ケーブルが設置できるときには ND-50/50 型を使用し、その他の場合には Canberra Industries 8100 型を使用した。マルチ・チャンネル・アナライザを野外で使用するとき、その交流電源容量に留意して、適切な電源コードを使用しなければならない。C.I. 8100 型は本体だけで交流 100 V × 4 A を要するので、電流容量の小さなコードを数百 m 使用すると、交流電圧が落ちて、昇圧トランスを必要とした経験がある。C.I. 8100 型のデータ打ち出し用として、テレタイプ、紙テープパンチなどを持ち出すときは、その交流電源がさらに大きな容量のものが必要となる。テレタイプは起動時に 7~8 A を流すので、小容量の発電機は起動時に出力電圧が大きく変化する。1 回だけガンマ線スペクトルを取る場合は、C.I. 8100 本体のみを持って行って測定し、コアメモリに記憶されたデータを研究室において打ち出した。*

Fig. 3.1.3 に書き込んだように、前置増幅器、高圧フィルタ、Ge (Li) 検出器、クライオスタット、液体窒素 7.5 ℓ、3 脚を含む Ge (Li) 検出器の重量は 16.5 Kg、ミニピン電源、高圧電源、増幅器、パルサを含めた重量は 15 Kg であった。

クライオスタットの液体窒素消費量を調べて見ると、Fig. 3.1.4 に示したようになった。上は、Ge (Li) 検出器の総重量 (3 脚、前置増幅器、高圧フィルタを含む) の空調された研究室における時間的变化を示しており、この曲線の傾斜から、液体窒素消費率は 0.63 Kg/day であり、液体窒素の比重 0.8 で割ると、0.78 ℓ/day となる。したがって 6 日に 1 度液体窒素を補充した。下は、液体窒素のレベルの変動を示している。0.78 ℓ/day は、通常のデ IPP・スチック型クライオスタットの消費率 1 ℓ/day に比べて小さい。野外の日射下に持ち出したとき、消費率は若干増すものと思われる。

この検出器・線源間距離 25 cm におけるガンマ線検出特性を Fig. 3.1.5 に示す。上は、半値幅エネルギー分解能のガンマ線エネルギー依存性を示し、1333 KeV ガンマ線に対して 2.5 KeV、パルサ分解能は 1.5 KeV であった。下はピークの絶対検出効率のガンマ線エネルギー依存性を示しており、1333 KeV ガンマ線に対して 2.1×10^4 (cts/photon) であり、この値は 3" × 3" NaI (Tℓ) 検出器のピーク検出効率 1.2×10^3 (cts/photon) に比べて 17.5% となった。

+ ホンダ EM3000J 3KVA, AC 100V

* たゞし、IC メモリを使用しているマルチ・チャンネル・アナライザでは、通常、電源を切ると、メモリに記憶されたデータは消えるので、コアメモリを持つマルチ・チャンネル・アナライザのように電源を切って研究室に持ち帰り研究室で打ち出すことはできない。

3.2 73cm³ Ge (Li) ガンマ線スペクトロメータの入射角度依存性

環境ガンマ線のin-situ 測定結果を解析して、土壌中のガンマ線放出核種の単位重量あたりの放射能 (pCi/g) やその放射能による検出器位置 (地上 1 m) における線量率 (μR/h) を計算するとき、検出器のガンマ線ピーク検出効率 (N₀/Φ) およびそのガンマ線入射角度依存性を測定する必要がある。この測定は、通常、標準ガンマ線源を検出器から 1 m 以上離れた場所において、測定する。筆者らは、検出器の中心から 1 m の点に Am-241, Ba-133, Co-57, Cs-137, Na-22, Mn-54, Co-60, Y-88 の標準線源 (~10 μCi) を置いて測定した。

検出器の直下 (θ = 0°) における検出効率の測定結果を Table 3.2.1 に示す。右端の欄のピーク検出効率は、検出器中心におけるガンマ線束 (Γ/cm² sec) あたりの計数率 (cps), N₀/Φ (cps/Γ/cm² sec) を示している。ガンマ線束 Φ は、線源のガンマ線放出率 (Γ/sec) を

$$4 \pi \times 100^2 = 1.26 \times 10^5 \text{ cm}^2$$

で割り算して得られる。

このピーク検出効率をガンマ線エネルギーに対してプロットすると Fig 3.2.1 の黒丸 (θ = 0° 実線) が得られる。

662 keV ガンマ線に対するピーク検出効率 3.62 cps/photon/cm² sec は、H.L. Beck⁵⁾ の 60 cm³ Ge (Li) 検出器の 2.17 cps/photon/cm² sec および P.L. Phelps¹⁰⁾ の 70 cm³ Ge (Li) 検出器の 2.9 cps/photon/cm² sec よりも大きい⁺。

線源の位置を検出器中心からの距離 1 m を保ちながら、垂直方向からの角度 θ を 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° に変えて、それぞれの角度におけるピーク検出効率のガンマ線エネルギー依存性を測定した。そのピーク検出効率の測定結果を Table 3.2.2 に示す。ガンマ線の入射角度 θ = 45°, 90° に対する単位ガンマ線束あたりのピーク検出効率を Fig 3.2.1 に ---+--- および - - - - Δ - - - - で示した。特に、300 keV 以下のガンマ線に対して、ガンマ線入射角度が増すと、検出効率が減少していることが判る。

θ = 0° のピーク検出効率に対するガンマ線入射角度 θ のピーク検出効率の比 R (θ) を各ガンマ線エネルギーに対して計算した値を Table 3.2.3 に示す。R (θ) の角度依存性をガンマ線エネルギーをパラメータとしてプロットしたものを Fig. 3.2.2 ~ Fig. 3.2.5 に示す。300 keV 以下のガンマ線に対して、R (θ) の角度依存性が大きいことが判る。300 keV 以上のガンマ線に対しては、R (θ) のほとんどの値は、1.00 ± 0.05 の中に入っていることが判る。

in-situ 測定結果を解析して、土壌中の放射能 (pCi/g) や線量率 (μR/h) を計算する際に、検出効率の角度依存性を考慮した補正係数 (N_f/N₀) を求める必要がある。この補正係数 (N_f/N₀) は、

$$\frac{N_f}{N_0} = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\pi/2} R(\theta) \frac{d\Phi}{d\theta} d\theta \quad \dots\dots\dots (3.2.1)$$

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \frac{d\Phi}{d\theta} d\theta \quad \dots\dots\dots (3.2.2)$$

で与えられる。R (θ) は、すでに計算し、Table 3.2.3 および Fig. 3.2.2 ~ Fig. 3.2.5 に示した値である。Φ は検出器中心におけるガンマ線束、 $\frac{d\Phi}{d\theta}$ はガンマ線束の角度依存性であり、Φ および

+ H.L. Beck¹²⁾ が最近使用していると伝えられる 120 cm³ Ge (Li) 検出器 (プラスチック型) に関しては、特性が報告されていないので、検出効率は不明である。

$\frac{d\phi}{d\theta}$ のいずれについても、仮定した土壌中の核種の分布に対して理論的に計算できるものであり、すでに第2章において詳細に説明を行なったので、第2章を参照してほしい。

(3.2.1)式で与えられる補正係数 (N_f/N_0) を計算するためには、 $R(\theta)$ を何らかの式で表わしておく必要がある。一般に、角度依存性 $R(\theta)$ としては、

$$R(\theta) = A_1 + A_2 \cos(A_3\theta + A_4) \dots\dots\dots (3.2.3)$$

を用いる⁹⁾が、 θ の高次多項式、例えば

$$R(\theta) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4 + a_5\theta^5 \dots\dots\dots (3.2.4)$$

を用いることも、できる。

筆者らは、Table 3.2.2 に示した単位ガンマ線束あたりのピーク検出効率の角度依存性 $N_0 \cdot R(\theta)$ に θ の多項式をフィッティングした。これは Table 3.2.3 に示したように、 $\theta = 0^\circ$ のときの N_0 を 1.0000 としてしまうと、 $\theta = 0^\circ$ のときの値が誤差の全然ない値と定義したことになるからである。

ピーク検出効率 P.D.E. (θ) (cps/photon/cm² sec) を

$$P.D.E.(\theta) = P.D.E.(0^\circ) [a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4 + a_5\theta^5] \dots\dots\dots (3.2.5)$$

で表わし、Table 3.2.2 に示した測定値に最小自乗フィッティングしたとき、P.D.E. (0°)、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、として、各ガンマ線エネルギーに対して Table 3.2.4 に示したような値が得られた。また、 $\theta = 0^\circ$ におけるピーク検出効率 (Table 3.2.4 に示した P.D.E. (0°)) を Fig 3.2.6 に示す。

3.3 73 cm³ Ge (Li) ガンマ線スペクトロメータの環境ガンマ線検出特性

Table 3.2.4 に示した通りの係数を持つ多項式を用いて、(3.2.1)式に示した補正係数 N_f/N_0 を求めると、Table 3.3.1 が得られる。たゞし、 ϕ 、および $\frac{d\phi}{d\theta}$ は、(2.5)式~(2.12)式に与えられており、 μ_s/ρ は、Table 2.3 に示した 10% H₂O を含む土壌に対する H.L. Beck ら⁵⁾ の値を使用し、 $\alpha/\rho = 0, 0.0625, 0.206, 0.312, 0.625, 6.25, \infty$ (cm²/g) に対する N_f/N_0 を計算した。Table 3.3.1 は梯形近似による数値積分 ($\Delta\theta = 0.01^\circ$) を行なった結果を示している。

Table 3.3.1 に示した $\alpha/\rho = 0$ (一様分布) に対する N_f/N_0 をガンマ線エネルギーに対してプロットすると Fig 3.3.1 が得られる。 N_f/N_0 は低いエネルギーで小さく、高いエネルギーのガンマ線に対して高くなっている。これは、低エネルギーのガンマ線に対して、検出効率の角度依存性が大きく、高いエネルギーのガンマ線に対して角度依存性が小さいことを対応している。図中の点以外のエネルギーのガンマ線に対する N_f/N_0 は、図中の曲線の上から読み取ることができる。

同様に、662 keV ガンマに対する N_f/N_0 を、 α/ρ の関数としてプロットすると Fig 3.3.2 が得られる。 $\alpha/\rho = 0.0625 \sim 6.25$ に対して、 $N_f/N_0 = 0.95$ であることが判る。

Table 3.3.2 に一様に分布する ($\alpha = 0$) 自然放射能 (K-40, U-238, Th-232) に対する 73 cm³ closed end 同軸型 Ge (Li) 検出器の環境ガンマ線検出特性の計算結果を示す。表中 N_0/ϕ は Table 3.2.4 それをプロットした Fig 3.2.6 から得られた値、 N_f/N_0 は Fig 3.3.1 から得られた値、 ϕ/S は Table 2.6, 2.7 から、また、 ϕ/I は Table 2.13, 2.15 から得られた値であり、 N_f/S および N_f/I が我々の求める検出特性である。 N_f/S は土壌 1 g 中に 1 pCi の放射性核種があったときに、地上 1 m の高さにおかれた 73 cm³ closed-end 同軸型 Ge (Li) 検出器のピーク計数率

(cps)を与え、したがって、in-situ 測定において得たピーク計数率を N_f/S で割れば、土壌1g中に存在する核種のpCi 数が算出できる。 N_f/I はK-40, U-238とその娘核種, Th-232とその娘核種が地上1mの検出器位置において $1 \mu R/h$ の線量率を与えるときの 73 cm^3 closed-end 同軸型Ge(Li)検出器のピーク計数率(cps)を与える。したがって、実際のin-situ 測定を行ない得られたピーク計数率を N_f/I で割れば、K-40, U-238とその娘核種*, Th-232とその娘核種*が地上1m高の検出器位置に与える線量率($\mu R/h$)が求められる。

同様に、土壌中に深さ方向Zに対して $\exp(-\alpha Z)$ で分布するフォールアウト核種について、 73 cm^3 closed-end 同軸型Ge(Li)検出器の検出特性を計算することができる。Table 3.3.3は、Cs-137の662 keVガンマ線について計算したもので、 N_o/ϕ はTable 3.2.4から、 N_f/N_o はTable 3.3.1から、 ϕ/S はTable 2.7から、 ϕ/I はTable 2.15から得た値であり、求める結果は N_f/S および N_f/I で与えられる。 N_f/S は 1 km^2 あたり 1 mCi のCs-137があったとき、地上高1mの 73 cm^3 closed-end 同軸型Ge(Li)検出器のピーク計数率(cps)を与え、したがって、実際のin-situ 測定結果のピーク計数率を、実際に採取した土壌試料から求めたCs-137の深さ方向分布を示す α/ρ に対する N_f/S で測ると、地上1m高の検出器位置における線量率が求まる。Cs-137について N_f/S および N_f/I の α/ρ 依存性をプロットするとFig 3.3.3, Fig 3.3.4が得られる。Fig 3.3.4から判るように、 N_f/I の α/ρ 依存性はそれほど大きくない。

* 1本のガンマ線ピークの計数率を N_f/I で割ったとき、求められる値はその1本のガンマ線の与える線量率でもなく、また、その1本のガンマ線の放出する核種の与える線量率でもなく、その1本のガンマ線を放出する核種が属する崩壊系列中の全核種のガンマ線が与える線量率であることに注意すること。ただし、崩壊系列中の核種は放射平衡にあるとしている。

+ $S = S_o \exp(-\alpha Z)$ で深さ方向Zに分布するCs-137がZ=0から ∞ で積分した値 $\int_0^{\infty} S_o \exp(-\alpha Z) dZ$ が 1 km^2 あたり 1 mCi あるという意味。

4. 土壤試料ガンマ線測定用 Ge(Li) スペクトロメータ

4.1 土壤試料採取方法

第2章で説明したように、in-situ 測定結果の解析に測定場所の土壤中のガンマ線放出核種の地面下の深さ方向の分布を知る必要があり、また、in-situ 測定結果と比較するためにも、土壤を採取してそのガンマ線を測定して土壤中のガンマ線放出核種の分布を知る必要がある。in-situ 測定との比較を目的として土壤試料を採取するとき、通常、採取点は、in-situ 検出器の直下および周辺の4点（例えば1.5 m離れた場所¹¹⁾）の合計5点で、深さ30 cm程度の土壤を打ち抜いて、表面から例えば、0-2, 2-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 cm¹¹⁾の深さの土壤試料を採取する。あるいは、より広範囲には、8 m × 16 mの矩形の4隅と中心の合計5点を2箇所合計10点で、深さ方向0-1, 1-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 cmと採取している例⁹⁾もある。土壤の採取方法についても、採取した試料が地面下における核種の分布を正確に保持していることが望ましいので、HASL*では採取点の横に大きな孔を掘って、その孔の壁から試料を採取するという方法を用いている。あるいは、6.7 cm径のCore sampler⁺を使用している例⁹⁾もある。

筆者らは、若干の誤差は認め得ると判断して、もっとも簡単な方法、すなわち、ありあわせの鉄管（外径9 cm、内径7.5 cm、長さ39 cm）の先を削って刃状としたものを土中に約30 cmたたき込み、鉄管内に入った土壤を下から5 cmづつ園芸こてで取って試料容器につめるという方法をとった。試料容器は、口の内径75 mm、底の内径70 mm、深さ43 mm、厚さ約1.5 mm、内容積200 cm³、平均重量33.5 gの透明プラスチック製亀甲容器（タッパーウェア[#]）を使用した。

Photo 4.1.1の左は土壤採取に使用した鉄管、左側はタッパーウェアに入った土壤試料を深さ方向に積み重ねたものである（上が地表側、下が最も深い場所で採取したもの）。この例では、地表附近は黒土、その下は赤土、それから、再び黒土、砂の順になっているのが判る。タッパーウェアが白く粉を吹いているように見える所は、タッパーウェアの内面に土壤中の水分が蒸発して附着している。また、試料採取場所はin-situ 検出器の直下および周辺1.5 m離れた場所4点、合計5箇所とした。この採取土壤の入った容器を、次節で説明する鉛遮蔽内のGe(Li)検出器の直前に置いて、その放出するガンマ線のスペクトルを測定した。

* 来日したH. L. Beck から阪井が聞いた話である。理化学研究所の岡野真治氏によれば、地質学の調査などでは、30 cm角程度の四角な鉄棒を打ち込み、その隣りに人が入れる孔を掘って、その中に人が入って、打ち込んだ鉄棒の中の土壤を上からカンナをかけるようにして、1 cmづつ土をはがして行くとのことである。HASL - 300¹²⁾参照。

+ P. Gudixsen, C. Veith, and R. Taylor. "Soil sampler for depth Profile measurements of radioactivity". In Hazards Control Progress Report No. 41, September through December, 1971, pp. 18-19. UCRL - 50007 - 71 - 3

SANOKA 製 80 - 1, 蓋ポリエチレン製, 本体AS樹脂製

4.2 Ge (Li) ガンマ線スペクトロメータ

採取した土壌試料から放出されるガンマ線のスペクトルを測定するために、Photo 4.2.1に示したガンマ線スペクトロメータを使用した。検出器はOrtec社製の同軸型Ge (Li) 検出器 (System Model No. 8501-1022, Serial No. 14-1193)* で、Table 4.2.1に示す通り、直径47 mm、長さ47 mm、n⁺層厚0.6 mm、i層厚18.85 mm、p層径8.1 mm、検出体積75 cm³のGe (Li) 検出器を、Model 85共通真空型のクライオスタットに取り付けたものである。検出器前面には、厚さ0.5 mmのアルミニウム・エンド・キャップ、1 mm厚のテフロン吸収体があり、検出器前面とエンド・キャップの前面間の距離は5 mmである。検出器は2600V印加時、全静電容量24 pFを示し、パルス分解能は1.27 keV、1333 keVガンマ線に対する半値幅エネルギー分解能は205 keV、検出器・線源間距離25 cmにおけるピーク検出効率14.1% (3" × 3" NaI (TL) 検出器に比べて)、ピーク/コンプトン比は30/1であった。

土壌試料が放出するガンマ線は極めて低レベルであるので、低バックグラウンド装置にする必要がある。鉄や鉛を用いて内容積の大きな遮蔽室を作る方法もあるけれども、予算もないので、Photo 4.1.1に示したように、土壌試料容器 (外径7.5 cm、深さ4.3 cmのポリエチレン製容器、SANOYA 80-1) が入るだけの小さな空間 (7 cm × 10 cm × 10 cm) を検出器前面に残して鉛ブロック (5 cm × 10 cm × 20 cm) を積んで遮蔽箱とした。鉛遮蔽の厚さは平均して10 cmとなった。試料の入る空間の鉛壁面は、厚さ0.5 mmの銅板をはり、鉛のK-X線を一応減ずることにした。⁺

電子回路系は、前置増幅器Ortec 120-4B、スペクトロスコーピ増幅器Ortec-452 (Shaping time 1 μsec, BLR Hi, Unipolar出力)、高圧電源Ortec 459、ND-50/50パルス波高分析装置である。それらの測定条件をTable 4.2.2に示す。

4.3 土壌試料ガンマ線検出特性

前節で説明したスペクトロメータで土壌試料の放出するガンマ線を測定し、その測定の結果から土壌中に存在するガンマ線放出核種を定量するとき、スペクトロメータの検出効率を校正する必要がある。土壌の放出するガンマ線は低レベルであるので、必然的に多量の土壌を検出器の前面にできるだけ近づけて置いて測定することとなる。このとき、土壌試料中におけるガンマ線の自己吸収および幾何条件が等しい標準線源を使用して、スペクトロメータの検出効率を校正する必要がある。筆者らは土壌試料の校正にしばしば用いられるリン酸次ナトリウム無水塩 (Na₂ HPO₄) の母材の中にCs-137およびCo-60線源を加えた標準試料[#]を使用して校正を行なった。すなわち、リン酸次ナトリウム無水塩250 gの中に、Cs-137の標準溶液 (1.13 μCi/100 cm³) 2 cm³ およびCo-60の標準溶液 (1.147 μCi/100 cm³) 3 cm³ を加えた線源を作成したものである。それぞれの線源の放射能は、半減期の補正を行なった後、1975年4月18日現在、2.16 × 10⁴ pCi および

* 原研安全工学第2研究室から借用したもの。以下の検出器特性の記述は、Ortec社のCustom Series Coaxial Ge(Li) Detector Systems Operating and Service Manualによる。

+ この銅板の効果は確認していない。

この標準試料を作成して頂きました動力炉・核燃料開発事業団、東海事業所、環境安全課、大和愛司氏に深く感謝を捧げます。

2.66×10⁴ pCiであった。このリン酸次ナトリウム無水塩粉末を、土壌試料測定に使用するものと
 同じ容器 (SAOYA 80-1) に入れた。土壌試料は、土壌が容器に一杯に入っているものとか、半
 分しか入っていないものとかがあるので、標準試料も、リン酸次ナトリウム無水塩粉末が容器を満
 しているもの (粉末重量 249.4 g, 厚さ 4.3 cm, 標準試料#0), 厚さ 2.5 cm 入っているもの (粉
 末重量 178.2 g, 標準試料#1), 厚さ 1.2 cm 入っているもの (粉末重量 71.2 g, 標準試料#2)
 の3種類を作り、これを検出器のエンド・キャップの前面にピッタリとつけて、検出効率を測定し
 た。他の厚さの土壌の測定には、上の3種類の標準試料を測定して作成した検出効率の校正曲線を
 内挿した曲線を使用した。

Table. 4.3.1 は3種類の標準試料に対する Ge(Li) ガンマ線スペクトロメータのピーク検出効率
 の測定結果を示す。ただし、このピーク検出効率は、pCi あたりに放出するガンマ線1本あたりの
 計数率を表わしている。横軸に標準試料の厚さをとり、縦軸にピーク検出効率をプロットすると、
 Fig. 4.3.1 が得られる。厚さ 3.0 cm (#3), 厚さ 3.5 cm (#4) に対するピーク検出効率をこの
 図から読みとり、厚さ 4.3 cm, 2.5 cm, 1.2 cm, 3.0 cm, 3.5 cm に対するピーク検出効率をガン
 マ線エネルギーを横軸にとってプロットすると Fig. 4.3.2 が得られる。第5.3節に述べるように、
 採取した土壌試料の測定の解析に、Fig. 4.3.2 を使用する。Fig. 4.3.2 は 662 keV と 333 keV の
 間のガンマ線のみに対して成立するもので、662 keV 以下のエネルギーのガンマ線に対しては、自
 己吸収の影響が大きくなるのでピーク検出効率は Fig. 4.3.2 の曲線よりは小さな値となるものと思
 われる。

このような大きな体積を持ち、自己吸収が無視できないような試料のガンマ線検出効率の校正方
 法には、自己校正という方法がある。これは、その試料が含むガンマ線自体で、試料のガンマ線検
 出効率を校正する方法である。すなわち、エネルギーの異なる2本以上のガンマ線を放出する核種
 が試料に均一に含まれている場合、各ガンマ線ピークの計数率と既知のガンマ線分岐率から相対的
 なピーク検出効率のガンマ線エネルギー依存性が計算できる。後は、どれか1つのエネルギーのガ
 ンマ線に対するピーク検出効率の絶対値が判れば、計算した相対的なピーク検出効率のガンマ線エ
 ネルギー依存性の曲線上に、1つのエネルギーのガンマ線のピーク検出効率の絶対値が乗るように、
 相対的なピーク検出効率にある定数を掛ければよい。例えば、われわれの土壌試料の場合、Table
 3.3.2 に示したように、例えば、Ac-228 が1崩壊あたり 338 keV, 464 keV, 908 keV, 966
 keV のガンマ線を、それぞれ、0.129, 0.047, 0.290, 0.230本放出する⁵⁾とすれば、採取した土壌
 試料 (#W1) の各ピークの計数率の測定値 0.00877 cps, 0.001994 cps, 0.007813 cps,
 0.004261 cps をそれぞれのガンマ線放出率で割算をして、相対的なピーク検出効率 4.33×10^{-2} ,
 2.702×10^{-2} , 1.716×10^{-2} , 1.357×10^{-2} , cps/r/dis を得る。この相対的ピーク検出効率を
 Fig. 4.3.2 の曲線#0に乗るように、 0.637×10^{-2} /pCi を掛け算すると、ピーク検出効率は、そ
 れぞれ、4.33, 2.70, 1.72, 1.18×10^{-4} cps/(r/dis) pCi となる。同様な手続きを Bi-214, Tl-
 208, Pb-214のガンマ線について行ない、その計算結果をガンマ線エネルギーに対してプロッ
 トすると、Fig. 4.3.3 が得られる。計算点が若干散らばっているが、300 keV ~ 2615 keV のガ
 ンマ線に対して、#0の曲線を使用してもよいといえることができる。

次に、この鉛遮蔽 75 cm³ 同軸型 Ge(Li) ガンマ線スペクトロメータの検出限界について検討し
 て見る。Fig. 4.3.4 に示した通り、バックグラウンド A, B, C の上に、ある核種の放出するガンマ

線のピークDがあるとする。図中のa は半値幅エネルギー分解能 (FWHM) の2倍にとった。A およびC は、 $a/2$ (=FWHM) の幅を持つようにとる。面積 $(D+B) = E$ とおくと、 $B \cong (A+C)$ であるから、

$$D \cong E - (A+C) \quad \dots\dots\dots (4.3.1)$$

となり、その標準偏差 σ_D は

$$\sigma_D \cong \sqrt{E+A+C} \quad \dots\dots\dots (4.3.2)$$

計数時間をT sec とすると、計数率は

$$D/T \cong \frac{E - (A+C)}{T} \quad \dots\dots\dots (4.3.3)$$

となり、その標準偏差は $\sigma_{D/T}$ は

$$\sigma_{D/T} = \frac{D}{T} \sqrt{\left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_D}{T}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (4.3.4)$$

であり、充分長い時間計数すれば

$$\left(\frac{\sigma_D}{T}\right)^2 \cong 0 \quad \dots\dots\dots (4.3.5)$$

となるので、

$$\sigma_{D/T} \cong \frac{\sigma_D}{T} \cong \frac{\sqrt{E+A+C}}{T} \quad \dots\dots\dots (4.3.6)$$

となる。面積Dの検出限界 D.L. を $3\sigma_{D/T}$ と定義すれば、

$$(D.L.) \text{ peak area} \cong 3\sigma_{D/T} \sim 3 \sqrt{E+A+C} / T \quad \dots\dots\dots (4.3.7)$$

となる。この面積の検出限界を、ピーク検出効率 ϵ 、および、その核種の崩壊あたりのガンマ線放出割合 (r/dis) で割れば、その核種の放射能 (dps) の検出限界が出せる。

すなわち、

$$(D.L.) \text{ dps} = \frac{3 \sqrt{E+A+C}}{T \cdot \epsilon \cdot (r/\text{dis})} \quad \dots\dots\dots (4.3.8)$$

土壌試料を入れないで、試料ケースのみ入れて、鉛遮蔽75 cm³ 同軸型 Ge(Li)ガンマ線スペクトロメータで40000 sec 測定して得られたガンマ線スペクトル (Fig 5.3.2) を用いて(4.3.8)式の検出限界を計算すると、Table 4.3.3 に示した値が得られる。このとき、ガンマ線検出効率 ϵ としては、Fig 4.3.2 のリン酸次ナトリウム無水塩250 g, 200 cm³ に対する値 (曲線#0) を用いた。したがって、この検出限界は、容器一杯につまった土壌試料に対するものである。他の体積の土壌試料の検出限界は、Fig 4.3.2 に示した他の曲線を検出効率 ϵ として(4.3.8)式の計算を行えばよい。小さな体積の土壌試料に対する検出効率はFig 4.3.2に見られるように、200 cm³ の試料の検出効率よりも大きいから、その検出限界はTable 4.3.3 に示した値よりも小さくなる。

5. 環境ガンマ線測定結果

5.1 測定場所

本研究のように、環境ガンマ線の in-situ 測定結果と採取した土壌試料の測定結果を比較しようとするとき、in-situ 測定結果の解析時に仮定する諸条件が充分満足されるような場所を選ぶ必要がある。すなわち、近くに建物や建造物のない広い平坦な場所で、かつ、K-40, U-238, Th-232 などの自然放射能核種が広範囲の土壌において深さ方向にも面積方向にも一様な濃度の分布をしている場所であること。また、フォールアウト核種（例えば Cs-137）が広範囲において一様であり、深さ方向 Z に対して $\exp(-\alpha Z)$ の分布をしている場所であることなどの条件を満たす場所が望ましい。ここで α は深さ方向の放射性核種の濃度の分布を示す定数である（第1章参照）。このような場所としては、原爆実験開始前から（過去30年以上）人間の立ち入らない平坦な牧草地帯などが適しているが、原研東海研究所周辺では見つからない。

そこで、実験上の便利さを考えて、筆者らの研究室の近くの工作工場と器財課倉庫の間の芝生の上を選んだ。この附近は、東海研究所創立後、昭和32年（1959年）頃に松林を切りひらき、砂地の上に赤土を入れ、さらに遅れて芝生を張ったものと想像される。また、コンクリートの建物である工作工場と倉庫の間隔が約20mしかないという点でも、全部、厳密な実験には適していないが、止むを得ず、この地点を選んだのである。なお、芝生のある場所は裸地に比べて Cs-137 をよく保持していることは確かめられている。

Photo 5.1.1 に測定場所の写真を示す。左側が工作工場、右側が器財課倉庫であり、その中間に Ge(Li) 検出器が見える。Fig. 5.1.1 は、その平面図を示す。図中には、5点の土壌試料採取点（in-situ Ge(Li) 検出器測定点直下、および、東(E)、西(W)、南(S)、北(N)に1.5m離れた点）と採取した土壌が7.5cm径、深さ30cmであることを示している。

5.2 In-situ 測定結果

昭和50年（1975年）10月26日、14時から2時間、73 cm³ Ge(Li) 検出器を前節で説明した測定場所に置いて測定したガンマ線パルス波高分布を Fig. 4.2.1 に示す。K-40 (1464 keV) U-238崩壊系列の Ra-226 (186 keV), Pb-214 (242 keV, 352 keV), Bi-214 (609 keV, 1120 keV, 1765 keV, 2205 keV), Th-232 系列の Ac-228 (338 keV, 463 keV, 911 keV, 965+969 keV), Tl-208 (583 keV, 2615 keV) が見られた。

このガンマ線スペクトルの解析⁺を行なうと、Table 5.2.1 が得られた。Table 5.2.1 は左からガンマ線エネルギー、ピークチャンネル番号、半値幅チャンネル数、半値幅エネルギー、ピーク面積、ピーク面積誤差、ピーク面積標準偏差、ピーク計数率、ピーク計数率誤差、計算の状態を示している。半値幅は重要で、そのピークが異常に広ければ、2本以上のガンマ線を1ピークと見なしていることになる。187 keV, 241 keV, 511 keV, 967 keV, 1120 keV, 1591 keV, 1722 keV, 2203 keV は、半値幅が異常に広いので、ガンマ線スペクトルを広げて見ると511 keVピークを除

+ NuclearData 社製マルチ・チャンネル・アナライザ ND-50/50 のミニ・コンピュータ PDP-8/L 用に筆者の一人（片桐政樹）が作成した解析プログラムを使用した。
31)

いて2本のガンマ線をひろっていることが判る。511 keV は、1本で拡がっているので、Tl-208の510 keV と annihilation gamma-rays がまざったものと思われる。2450 keVのピークはスペクトルを見ると統計が悪くピークとは見なし難い。

Table 5.2.1 に示したピーク計数率 (cps) を Table 3.2.6 で得られた N_f/S , N_f/I で割ると、Table 5.2.2 に示すような自然放射能核種の土壌 1g 中に含まれる pCi および K-40, U-238 とその娘核種、Th-232 とその娘核種による地上 1m 高の検出器位置における線量率が得られる。K-40, Bi-214 (あるいは放射平衡にあるとすれば、U-238 系列のすべての核種)、Ac-228, Tl-208 は、それぞれ、9.37, 0.29, 0.49, 0.48 pCi/g 存在する (Table 5.2.4 参照)。また、K-40, U-238 系列の全核種、Th-232 系列の全核種のあたえる線量率は、それぞれ、1.68, 0.52, 1.41 $\mu\text{R}/\text{h}$ (Table 5.2.5 参照) となった。

同様に Cs-137 について、計算すると、Table 5.2.3 が得られる。Cs-137 の α は、採取した土壌試料の測定結果の平均として、

$$\alpha = 0.691 \text{ cm}^{-1}$$

をとり、土壌密度 ρ として

$$\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3$$

をとると、 α/ρ は、

$$\alpha/\rho = 0.4607 \text{ cm}^2/\text{g}$$

となる。 $\alpha/\rho = 0.4607 \text{ cm}^2/\text{g}$ に対する 73 cm^3 Ge (Li) 検出器の ϕ/S および ϕ/I は、Fig 3.3.3 および Fig 3.3.4 から、0.0095 cps/mCi/km² および 1.69 cps/ $\mu\text{R}/\text{h}$ である。in-situ 測定で得られたピーク計数率 0.660 ± 0.017 cps (Table 5.2.1 参照) を ϕ/S および ϕ/I で割って、Cs-137 の放射能およびその線量率は、それぞれ、69.47 mCi/km² および 0.391 $\mu\text{R}/\text{h}$ となる (Table 5.2.3 参照)。

上記の結果を、核種の濃度および線量率でまとめたものを Table 5.2.4 および Table 5.2.5 に示す。Table 5.2.4 には、Table 5.3.3 および Table 5.3.4 に示した採取した土壌試料のガンマ線測定結果の平均値を比較のために記載した。Table 5.2.5 には、3"×3" NaI (Tl) 検出器を用いた in-situ 測定結果を原研森内茂氏の開発したスペクトル線量変換演算子による線量評価法²⁵⁾²⁶⁾により解析して得られた全線量率を比較のために記載した。Ge (Li) 検出器による全線量率は 3.996 $\mu\text{R}/\text{h}$ であるのに対して、3"×3" NaI (Tl) 検出器による全線量率の測定値は 4.641 $\mu\text{R}/\text{h}$ となった。この差は、違う日時の測定であり、この間の自然放射能の時間的変動があると思われるので、直接比較することはできない。

5.3 土壌試料測定結果

Fig 5.1.1 に示したように、原研東海研究所の工作工場と器財課倉庫の間の芝生の上に in-situ 測定点と、その点から 15 m 離れた東 (E), 西 (W), 南 (S), 北 (N) の 4 点、合計 5 点を第 4.1 節で説明したような方法 (鉄管を打ち込む方法) で、直径 7.5 cm, 深さ 30 cm の土壌を採取

* 3"×3" NaI (Tl) 検出器を使用した in-situ 測定は、1975 年 9 月に筆者の一人 (寺田博海) と原研原子炉研修所研修生 中尾祐次氏により行なわれた。³²⁾

し、約5 cm厚づつ底から土壌をかき出して亀甲容器(SANOYA 80-1)につめ、第3.2節で説明した鉛遮蔽75cm³ Ge(Li)ガンマ線スペクトルを測定した。計数時間は1試料あたり40,000 secであった。30,000 sec, 50,000 sec 計数のものも若干ある。試料には、底から1, 2, 3, ……と番号をつけ、試料採取点の頭文字をつけた。例えば、W点で測定した試料は、W-1, …… W-8の番号をつけた。Table 5.3.1に、採取した土壌試料の試料番号の関係、土壌の重量、厚さ、体積、密度を示す。土壌試料の重量は容器を含めた重量から容器の重さの平均値2.35 gを引いて求めた。土壌試料の厚さは、容器に入っている土壌の厚さを示しており、その土壌が大地中にあった厚さではない。また、容器中への土壌の詰め方にもよることは勿論である。土壌試料の体積は、容器の深さ43 mmと土壌試料の厚さA mmの比に容器の内容積200 cm³を掛けて計算した。密度は土壌試料の重量をその体積で割った値を示した。密度は、深い場所では大体1.5 g/cm³を示し、地表に近い場所では、0.7~1.0 g/cm³程度の値であった。地表付近では黒土、その下に赤土、その下は砂と変化しているため、黒土の密度が小さいことになる。黒土は植物などの腐蝕物・有機物を含んでおり、密度が小さいと思われる。

土壌試料のガンマ線スペクトルの例をFig. 5.3.1に示す。Fig. 5.3.1は、採取地点Wの地表2.8 cm厚の土壌を容器につめて2.1 cm厚となった試料W-8の40,000 sec 計数時のガンマ線スペクトルであり、自然放射性核種K-40やU-238の娘核種Pb-214(RaB), Bi-214(RaC)およびTh-232の娘核種Ac-228(Ms Th₂), Pb-212(Th-B), Tl-208(Th-C^{''})のガンマ線ピークが見られる。さらに、フォールアウト核種Cs-137, Zr-95, Nb-95のガンマ線が見られる。このガンマ線スペクトロメータは、土壌を入れない容器のみを計数したとき、Fig. 5.3.2中の下例のパルス波高分布として示したように、バックグラウンドとして、K-40, Tl-208, Bi-214, Pb-212, Pb-214のガンマ線ピークを示す。Fig. 5.3.2の中の上は、Fig. 5.3.1に示した土壌試料のガンマ線スペクトルを重ねて示したものである。各ピークの計数率を計算した後、土壌試料のピーク計数率から、バックグラウンドのピーク計数率を引き算して、土壌のみのガンマ線ピーク計数率を算出した。

Table 5.3.2に各土壌試料における各ガンマ線ピークの計数率(cps)を示す。なお、Fig. 4.3.2に示したように、土壌試料の厚さが変わるとピーク検出効率が異なるので、使用したピーク検出効率の値が、厚さのことなる試料グループの前に書かれている(試料の厚さについてはTable 4.3.1参照)。

Table 4.3.2に示した各ピークの計数率と検出効率から各土壌試料中のTl-208(Th-232の娘核種)、Bi-214(U-238の娘核種)、Cs-137(フォールアウト核種)、K-40の代表的な核種について、単位重量あたりの放射能(pCi/g)を計算した値をTable 5.3.3に示す。誤差は、統計誤差のみを示している。

Table 5.3.3に示したTl-208, Bi-214, Cs-137, K-40の放射能濃度(pCi/g)を、C(in-situ 検査器直下), E, W, S, Nの各試料採取点に対して、地表からの深さを横軸にとって、プロットすると、Fig. 5.3.3~Fig. 5.3.7が得られた。K-40表面付近で数pCi/gであり、深くなるにしたがって増え、深さ25 cm付近では15 pCi/g程度になっている。K-40は、土壌中のKの分布をそのまま示しており、地表面の有機質の多い土壌に対しては少なく、深くなるにしたがってKを含む砂の割合が多くなっていることによるものと思われる。Th-232の娘

核である ^{137}Cs の濃度は、地表面の数 cm を除いて、約 5 pCi/g 、また、 ^{238}U の娘核である ^{214}Bi は、S 点 (Fig. 5.3.6 参照) を除いて、 $2\sim 3\text{ pCi/g}$ であった。フォールアウト核種の ^{137}Cs については、地表面で数 pCi/g であり、深くなると急激に減少するが、深さ 20 cm 附近に 0.1 pCi/g 程度の山が見られ、それより深い場所では検出限界以下であった。地表附近の深さ $0\sim 10\text{ cm}$ における ^{137}Cs の放射能濃度の深さ方向の分布を $\exp(-\alpha Z)$ とおいたとき (Z : 深さ cm) の α の値を各採取点において求めると、Table 5.3.4 に示した通り、C, E, W, S, N 点に対して、それぞれ、 0.697 cm^{-1} , 0.742 cm^{-1} , 0.767 cm^{-1} , 0.575 cm^{-1} , 0.676 cm^{-1} となった (Fig. 5.3.3 ~ Fig. 5.3.7 中の点線参照)。 α の 5 つの値を算術平均すると、 0.691 cm^{-1} となった。 α の値は、フォールアウト直後では地表面のみに存在するから $\alpha = \infty$ であり、時間の経過とともに雨水などにより大地内に浸み込むと考えれば、時間の経過とともに α の値は小さくなっていくものと考えられる。土壌の状態 (水を良く通すかどうかなど) も α に影響を与えよう。深さ 20 cm 附近で ^{137}Cs の放射能濃度が山を作る原因については、例えば、20 cm 附近の土壌が ^{137}Cs を保持しやすい化学的活性を持っているということも考えられないことはないにしても、むしろ、原研東海研究所創成時 (昭和 32 年頃?) までにある程度のフォールアウトがあった土の上に、新しく約 20 cm ほどの土を乗せ芝生を植えたことによると考える方が考えやすいと思われる。

Table 5.3.4 に土壌試料中の ^{137}Cs の放射能についてまとめてみた。各試料中の ^{137}Cs の放射能 (pCi)、各採取点における試料中の ^{137}Cs の放射能の総和 (pCi)、総和の値を試料の断面積 $44.18\text{ cm}^2 (= \pi (7.5/2)^2)$ で割って単位を mCi/km^2 に直した値を示した。1 km^2 あたりの ^{137}Cs フォールアウトの放射能の平均値は 77.7 mCi/km^2 となった。

一方、Fig. 5.3.3 ~ Fig. 5.3.7 に示した点線が深さ 0 cm を横切る点の放射能濃度 S_0 (pCi/g) を読みとり、点線の勾配 α (cm^{-1}) および土壌の密度 ρ (g/cm^3) から、1 cm^2 の断面積を持つ無限長の土壌円柱に含まれる ^{137}Cs の総量 S_A は

$$S_A = \rho S_0 \int_0^\infty \exp(-\alpha Z) dZ = \rho S_0 / \alpha \quad \dots\dots\dots (4.3.1)$$

となる。(4.3.1) 式で S_A (pCi/cm²) を計算し、単位を (mCi/km^2) に直した値を Table 5.3.4 に示した。この値は、試料の実測値の総和より大きくなった。

* Table 4.3.3 から検出限界は、200 cm^3 試料に対して 7.1 pCi である。200 cm^3 の土壌試料は約 300 g であるから、検出限界は $7.1\text{ pCi} / 300\text{ g} = 0.024\text{ pCi/g}$ となる。

+ α に関しては、Anspaugh ら⁹⁾ は $\alpha = 0.16\text{ cm}^{-1}$, Raigaini ら¹¹⁾ は $0.092\sim 0.64\text{ cm}^{-1}$ を報告している。Beck ら^{5,33)} は $\alpha = 0.34\text{ cm}^{-1}$ を報告している。

$$= 1\text{ pCi/cm}^2 = 10\text{ mCi/km}^2$$

6. 応 用

In-situ Ge(Li) 検出器の応用としては、第1章後半にも記述した通り、いろいろの事項があり、また将来さらに多くの問題にin-situ Ge(Li) 検出器が使用されることになる。

例えば、放射性廃棄物の貯蔵倉庫に立ち入り作業を行なうとき、倉庫内に危険な放射能核種がないかどうかを調べるなどの保健物理的な応用も考えられる。また、Ge(Li) 検出器で常時モニタするのが困難な場合、TLDなどで積算線量を測定しておき、その場所でのガンマ線スペクトルを1年に1度程度測定しておくとか、何かTLDの線量に変化が生じたときにGe(Li) 検出器を持って行ってガンマ線スペクトルを調べるなども今後の環境ガンマ線モニタの一方向であろう。¹¹⁾

筆者らは、現在、Ge(Li) 検出器を使用して環境ガンマ線スペクトルの時間的変動をどの程度測定できるか、plumes からのガンマ線をGe(Li) 検出器で測定し解析することがどの程度できるか、スペクトル—線量変換演算子値関数法²⁵⁾²⁶⁾をGe(Li) 検出器にどの程度適用できるかを調べているので、それらの preliminary な結果を次に述べる。

6.1 Ge(Li) 検出器による環境ガンマ線の時間的変動の測定

よく知られているように、土壌中に存在するU-238, Th-232 の崩壊系列中にガス状放射性核種ラドン(Rn-222)およびトロン(Rn-220)があり、大気中に上昇するが、これらの濃度は、自然環境条件の変動に伴なって時間的に変動する。この変動の範囲を測定しておくことは自然放射能による線量を評価する上で重要である。

Fig. 6.1.1 は、49 cm³ 同軸型 Ge(Li) 検出器(上向きディップスチック型クライオスタットに取り付けたもの)*を野外に放置して測定した環境ガンマ線スペクトルの変化の例を示したものである。²²⁾ 測定場所は、5.1節で述べた原研東海研究所構内の工作工場と器財課倉庫の間の芝生の上である。測定中に激しい雷雨があった。検出器には、ビニールをかぶせて、前置増幅器や高圧電源の内部に雨水が入らないようにした。激しい雷光が見られるときには、増幅器の出力を飽和させるような大きなパルスが増幅器の出力で観測された。激しい雷雨が小雨になってから測定したとき得られたパルス波高分布が(A)である(測定は1975年11月6日19:00から4800 sec行なわれた)。その後数時間経過して、雨が止んだ後で測定を行なうと(B)に示したパルス波高分布が得られた(11月6日22:00から4800 secの測定)。(C)は翌日(11月17日)正午から4800 sec 測定したとき得られたもの、(D)はその夕方18:00 から4800 sec 測定して得られたパルス波高分布である。この日は晴天であった。(A)、(B)、(C)、(D)のパルス波高分布を比較すると、(A)だけが(B)、(C)、(D)と非常に異なっており、(A)においてはBi-214のガンマ線ピークが他のガンマ線ピークに比べて異常に強くでていることが判る。各ピークの計数率を計算して、時間を横軸にしてプロットするとFig. 6.1.2 に示すようになる。Bi-214のガンマ線ピーク(609 keV および 1763 keV) および Pb-214 のガンマ線ピーク(353 keV)の計数

* 筆者らが試作したもの。1.3 MeV ガンマ線に対するピーク検出効率は9%、エネルギー分解能は2.3 keV。液体窒素 Dewar を芝生の上に直接置くと、増幅器出力にハムが見られた。アクリル板をDewarの下に置くとハムは出なくなった。検出器がグランドされて、ハムを生じたものと思われる。

率は、11月16日の19:00と22:00の間に急激に減少しているのに対して、Cs-137の662 keV ガンマ線ピーク、K-40の1460 keV ガンマ線ピーク、Ac-228の911 keV ガンマ線ピーク、Tl-208の2614 keV ガンマ線ピークの計数率はいずれも殆んど変化していないことが判る。すなわち、地上1 mにおいた検出器により測定されるBi-214およびPb-214のガンマ線の計数率は雨が降ると増え、雨が止むと急速に減少しており、その半減期は1時間より短い程度であることが判る。Bi-214 およびPb-214 はU-238の崩壊系列中にあり、ラドン(Rn-222)の後、

Rn-222(3.82d)→Po-218(3.05m)→Pb-214(268m)→Bi-214(19.8m)→のように崩壊して生じるので、雨が降ると大気中にあったラドンが地表附近に降りて来て、Pb-214、Bi-214のガンマ線を増加させ、雨が止むとラドンが土壌中から大気中に上昇して、地表附近のPb-214のガンマ線計数率を減少させ、その半減期が1時間以内であることを示していると考えられる。地表附近のラドンの量の変化は、降雨により地表面が水でおおわれ、ラドンガスが大気圏に放出されないで地表面にたまる現象、大気圏に放出されたラドンが気象条件により大気下層(100 m以下)にたよって存在する現象、および、雷雨により大気圏内(高さ数Km内)に存在するラドン娘核種が雨滴の核となって地表面に降下する現象の組み合わせによるものと考えられ、非常に複雑な現象である。³⁴⁾このような現象を研究するために、エネルギー分解能のよいGe(Li)検出器が今後使われることになると思われるが、短時間の変化を測定するためには短時間に十分な計数率を得ることが要求され、できるだけピーク検出効率の大きな大体积Ge(Li)検出器を使用する必要がある。

6.2 Plumes からのガンマ線測定用鉛遮蔽体付き Ge(Li) 検出器の特性

環境問題と関連して、自然放射能の1/100程度の極少量の人工放射能による線量を自然放射能から分離して測定する技術の開発が求められるようになり、現在の所、Ge(Li)検出器によるスペクトル測定がその一つの有力な手段であることが期待されている。原子力施設から大気中に放出された放射性核種からのガンマ線を測定する場合、土壌中の自然放射性核種K-40、Bi-214、Tl-208 やフォールアウト核種Cs-137からのガンマ線を減衰させることができれば、大気中の核種からのガンマ線を、より低い計数率まで検出することができるはずである。森内氏は³⁶⁾下方 2π からの放射線を遮蔽し、上方向空間 2π からのガンマ線に対する相対効率を高める目的で、 $2'' \times 2''$ 、 $3'' \times 3''$ NaI(Tl)検出器用の鉛遮蔽体を作り、降雨による線量率の上昇分については1/5に、バックグラウンドの一定成分を1/4程度に、Ar-41雲からの寄与分は1/1.5程度に減衰でき、その結果、鉛遮蔽体を使用した場合は、施設からの寄与率と降雨からの寄与分の比を3倍以上に改善できたと報告している。

筆者らは²⁰⁾²¹⁾、上向きディップ・スチック型クライオスタットに取り付けた 49cm^3 同軸型Ge(Li)検出器と組み合わせるために、Fig. 6.2.1に示したような鉛遮蔽体を作った。鉛遮蔽体は外径40 cm、厚さ5 cm、深さ6 cmの鉛のリング3個を5 cm厚の鉛の底板の上に重ねたもので、底板は鉄枠により支えられ、その中心には、ディップ・スチックの冷却棒の部分が通る孔(径3.5 cm)が明けられている。検出器の中心は鉛リングの上端と同じ高さとなっている*。

Fig. 6.2.2は、この装置を用いて4800 sec 計数を行なって得られたin-situ 環境ガンマ線のパルス波高分布を示している。測定場所は、第5.1節で説明した原研構内工作工場と器財課倉庫の

* 鉛遮蔽体の設計は原研、原子炉計測研究室伊藤浩氏により行なわれた。

間の芝生の上である。(A)は鉛遮蔽体を使用しないとき、(B)は鉛遮蔽体を使用したときのパルス波高分布を示している。(B)の各ピークの計数率は(A)に比べて減少している。特に662 keV ガンマ線(フォールアウト核種Cs-137)は(B)では全然見られなくなっている。K-40からの1461 keV ガンマ線ピークは約1/3に減少しているので、Ar-41の1293 keV ガンマ線ピーク検出限界が約3倍向上することになる。

鉛遮蔽体を使用した場合においても、大気中に存在するラドンの娘核種Pb-214, Bi-214からのガンマ線ピークは残る。また、測定場所は工作工場と器財課倉庫の間の芝生の上であり、建物のコンクリート中に存在するU-238, Th-232の崩壊系列中の核種からのガンマ線の一部は検出器に直接入射している。したがって(B)のパルス波高分布中に見られるようにそれぞれのガンマ線ピークの計数率の(A)からの減少の割合は、それぞれ異なっている。

6.3 Ge(Li) 検出器のスペクトル-線量変換演算子値関数

第1章, 第2章で詳細に説明したようにGe(Li)検出器のパルス波高分布中のガンマ線ピーク計数率から検出器位置における線量率を算出することができる。しかしながら, 第1章, 第2章で説明したH.L.Beckらの方法(HASL-258(1972))⁵⁾は, 土壌中の放射性核種の分布を仮定して理論的に求めた線量率と直接ガンマ線の線束の関係を利用したものである。したがって, 放射性核種の分布が仮定と異なっていれば, 線量率を求めることができず, 現在, 特に問題となっている原子力施設が放出するガンマ線による線量率を求めることが困難となる。例えば, 原子炉のスタックから出るplumes中のガンマ線の与える線量率は, plumesと検出器の間の幾何学的ジェオメトリが判らない限り, 求めることができない。BWRのタービンから出るN-16のガンマ線による線量率を測定する場合も同様である*。

Ge(Li)検出器のパルス波高分布は, その中に検出器位置における線量率に関する情報を持っているはずであり, 線源と検出器間の幾何学的ジェオメトリや線源の分布を仮定しなくても線量率を出すことができる可能性がある。森内氏らがNaI(Tl)検出器に対して開発した「スペクトル-線量変換演算子値関数法」は, そのような方法で, パルス波高分布から直接, 線量率を求めることができ, このとき, 線源の空間分布は入って来ない。ただし, 検出器の検出特性(ピーク検出効率, 全検出効率, リスponse関数)のガンマ線入射角度依存性が平坦で, 入射角度に無関係であることが必要な条件である。したがって, スペクトル-線量変換演算子値関数法をGe(Li)検出器に適用するときには, 入射角度依存性を持たないGe(Li)検出器を製作する必要がある。

今, エネルギー E_j (MeV)の単位線束(photon/cm² sec)のガンマ線が検出器に入射したとき生じるエネルギー E のパルスの分布関数を $n(E, E_j)$ (cts/sec · MeV per photon/cm² sec)とし, 検出器位置における照射線量率を $D(E_j)$ ($\mu R/h$), スペクトル-線量変換演算子値関数を $G(E)$ とすると,

$$D(E_j) = \int_0^{\infty} n(E, E_j) \cdot G(E) dE \quad \dots\dots\dots (6.31)$$

* W.M.Lowderら⁴⁾は, 4"×4" NaI(Tl)検出器のパルス波高を高圧電離箱による線量率の測定結果と比較している。Ge(Li)検出器は使用していない。

となる。G(E) を高次多項式で表わし、標準線源を用いた標準スペクトルの測定結果 $n(E, E_j)^+$ を(6.3.1)式に代入し、未定係数法によりG(E)の多項式の各係数を求めておく。

実際の in-situ 測定においては、いろいろのエネルギーのガンマ線が混在しているので、そのガンマ線のパルス波高分布 N(E) は、

$$N(E) = \sum_j \phi(E_j) \cdot n(E, E_j) \quad \dots\dots\dots (6.3.2)$$

で表わされる。ここで、 $\phi(E_j)$ はエネルギー E_j のガンマ線の線束 (photons/cm² sec) である。したがって、いろいろのエネルギーのガンマ線束による放射線量率の総和 D は、

$$\begin{aligned} D &= \sum_j \phi(E_j) D(E_j) = \sum_j \left[\phi(E_j) \int_0^\infty n(E, E_j) G(E) dE \right] \\ &= \int_0^\infty \left[\sum_j \phi(E_j) n(E, E_j) \right] G(E) dE \quad \dots\dots\dots (6.3.3) \end{aligned}$$

となり、(6.3.2)を代入すると、

$$D = \int_0^\infty N(E) G(E) dE \quad \dots\dots\dots (6.3.4)$$

となる。このようにいろいろのエネルギーのガンマ線が混在するときも、G(E)を適用することができ、その場の線量率を求めることができる。

73cm³ closed-end 同軸型 Ge(Li) 検出器を使用して Am-241, Co-57, Cs-137, Mn-54, Na-22, Co-60, Y-88 のガンマ線の標準パルス波高分布を測定し、G(E)を求めて見ると、Fig. 6.3.1 に示すような値となった。ただし、標準パルス波高分布は、検出器の軸上 1 m に線源をおいて測定したものを使用し、ガンマ線の入射角度依存性(第 3.2 節参照)はないと仮定した。したがって、入射角度依存性(θ が大きくなると $n(E, E_j)$ は少し小さくなる)を考慮した場合より G(E)は少し小さい値となっている。

この G(E) を用いて in-situ 測定結果(1975年10月26日の測定結果、Fig. 5.2.1 参照)について解析すると、線量率 3.4 μ R/h が得られた。同じ in-situ 測定結果を H.L.Beck らの方法(HASL-258⁵⁾)で解析すると、Table 5.2.5 に示したように 4.0 μ R/h が得られた。また、同じ場所において 3"×3" NaI(Tl) 検出器を使用して測定した結果(1975年9月16日)を森内茂氏の計算した G(E)²⁶⁾を使用して解析すると 4.6 μ R/h となった。また 3"×3" NaI(Tl) 検出器と Ge(Li) 検出器の森内方式による測定値の差は、測定日時が違うので、比較できない。いずれにしても、より一層の実験および解析法の検討とともに検出効率のレスポンスがガンマ線入射角度依存性を持たないような Ge(Li) 検出器の製作が望まれる。

+ この $n(E, E_j)$ がガンマ線の入射角度依存性を持っていないことが必要である。

7. まとめ

環境ガンマ線の in-situ 測定用の可搬型 73 cm³ closed-end 同軸型 Ge(Li) 検出器を製作し、これを用いて環境ガンマ線の in-situ 測定を行なった。

土壌中の U-238, Th-232, K-40, Cs-137 の濃度およびそれらの与える地上 1 m における線量率を算出し、これらの結果を採取試料中の放射性核種の濃度および in-situ 3"×3" NaI (TL) 検出器による全線量率と比較した。

Ge(Li) 検出器による環境ガンマ線スペクトルの時間的変動の測定例、土壌中の放射性核種からのガンマ線を遮蔽し plumes からのガンマ線の検出感度を高める試み、Ge(Li) 検出器のスペクトル線量率変換演算子値関数を決定する試みを紹介した。

謝 辞

本研究を遂行する上で次の諸兄の御指導、御協力をうけましたので、深く感謝する次第です。

土壌試料を測定するときに必要であった標準試料を作成して頂きました動力炉・核燃料開発事業団東海事業所、環境安全課、大和愛司氏、3"×3" NaI (TL) 検出器を使用した in-situ 測定に御協力下さった長野県立諏訪清陵高校中尾祐次氏(当時、原研原子炉研修所研修生)、同検出器の測定結果のスペクトル線量変換演算子による線量評価法を御指導下さいました原研保健物理安全管理部森内茂氏、土壌からのガンマ線を遮蔽する鉛遮蔽体を設計して頂きました原研原子炉計測研究室伊藤浩氏。

7. まとめ

環境ガンマ線の in-situ 測定用の可搬型 73 cm³ closed-end 同軸型 Ge(Li) 検出器を製作し、これを用いて環境ガンマ線の in-situ 測定を行なった。

土壌中の U-238, Th-232, K-40, Cs-137 の濃度およびそれらの与える地上 1 m における線量率を算出し、これらの結果を採取試料中の放射性核種の濃度および in-situ 3"×3" NaI (TL) 検出器による全線量率と比較した。

Ge(Li) 検出器による環境ガンマ線スペクトルの時間的変動の測定例、土壌中の放射性核種からのガンマ線を遮蔽し plumes からのガンマ線の検出感度を高める試み、Ge(Li) 検出器のスペクトル線量率変換演算子値関数を決定する試みを紹介した。

謝 辞

本研究を遂行する上で次の諸兄の御指導、御協力をうけましたので、深く感謝する次第です。

土壌試料を測定するときに必要であった標準試料を作成して頂きました動力炉・核燃料開発事業団東海事業所、環境安全課、大和愛司氏、3"×3" NaI (TL) 検出器を使用した in-situ 測定に御協力下さった長野県立諏訪清陵高校中尾祐次氏(当時、原研原子炉研修所研修生)、同検出器の測定結果のスペクトル線量変換演算子による線量評価法を御指導下さいました原研保健物理安全管理部森内茂氏、土壌からのガンマ線を遮蔽する鉛遮蔽体を設計して頂きました原研原子炉計測研究室伊藤浩氏。

References

- 1) J.J.Koranda, P.L.Phelps, L.R.Anspaugh, and G.Holladay; Sampling and analytical systems for measurement of environmental radioactivity, UCRL-72987 (June 16,1971)
- 2) P.L.Phelps, L.R.Anspaugh, J.J.Koranda, and G.W.Huckabay; A portable Ge(Li)detector for field measurement of radionuclides in the environment, UCRL-73561 (November 15,1971), also IEEE Trans., NS-19(1),199 (1972)
- 3) H.L.Beck, J.A.DeCampo, C.V.Gogolak, W.M.Lowder, J.E.McLaughlin, and P.D.Raft; New perspectives on low level environmental radiation monitoring around nuclear facilities, Nuclear Technology, 14, 232 (1972)
- 4) W.M.Lowder, P.D.Raft, and C.V.Gogolak; Environmental gamma radiation from ^{16}N in reactor turbines, ANS Trans., 15(1), 540 (1972), also, Environmental gamma radiation from nitrogen-16 decay in the turbines of a large boiling water reactor, HASL-271(1973)
- 5) H.L.Beck, J.A.DeCampo, and C.V.Gogolak; In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry, HASL-258(1972)
- 6) J.E.McLaughlin and H.L.Beck; Environmental radiation dosimetry for nuclear facilities and problems, IEEE Trans., NS-20(1), 36(1973)
- 7) R.L.Heath and J.E.Cline; Effluent monitoring in nuclear plants using on line gamma-ray spectrometry, IEEE Trans., NS-20(1), 65(1973)
- 8) L.R.Anspaugh, P.L.Phelps, G.W.Huckabay, and T.Todachine; Field spectrometric measurements of radionuclide concentrations and external gamma exposure rates at the Nevada Test Site. A demonstration study, UCRL-51412(July 5,1973)
- 9) L.R.Anspaugh, P.L.Phelps, P.H.Gudiken, C.L.Lindeken, and G.W.Huckabay; The in-situ measurement of radionuclides in the environment with a Ge (Li) spectrometer, UCRL-73904 (January 24,1973), also Proceedings of the Natural Radiation Environment II, August 7 - 11, 1972, Houston, Tex.
- 10) P.L.Phelps, L.R.Anspaugh, S.J.Roth, G.W.Huckabay, and D.L.Sawyer; Ge(Li) low level in-situ gamma-ray spectrometer applications, IEEE Trans., NS-21(1), 543(1974)
- 11) R.C.Ragaini, D.E.Jones, G.W.Huckabay, and T.Todachine; Terrestrial gamma-ray surveys at preoperational nuclear power plants using an in-situ Ge (Li)spectrometer, UCRL-75864(December 5,1974), also IEEE Trans., NS-22(1), 636(1975)
- 12) J.E.McLaughlin, et al; Field gamma spectrometry, C-02-01 in HASL Procedure Manual, HASL-300 (August 1975)

- 13) H.L.Beck, W.J.Condon, and W.M.Lowder; Spectrometric techniques for measuring environmental gamma radiation, HASL-150(1964)
- 14) B.G.Bennett and H.L.Beck; Legendre, Tschebyscheff, and half-range Legendre polynomial solutions of the gamma-ray transport equation in finite homogeneous and two media plane geometry, HASL-185(1967)
- 15) H.L.Beck and G.De Planque; The radiation field in air due to distributed gamma-ray source in the ground, HASL-195 (May 1968)
- 16) S.Okano; Fundamentals of environmental radiation measurement (7), Genshiryoku Kogyo, 21(7), 51(1975) (in Japanese)
- 17) E.Sakai; In-situ measurement of environmental radiation using germanium detectors, The 12th Annual Meeting on Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry, Tokyo, June 19, 1975 (in Japanese)
- 18) E.Sakai, H.Terada, M.Katagiri, and H.Itoh; In-situ gamma-ray measurement of fall-out ¹³⁷Cs by portable Ge(Li) spectrometer, *ibid.*(in Japanese)
- 19) H.Terada, E.Sakai, M.Katagiri, and H.Itoh; In-situ measurement of environmental gamma-rays using Ge(Li) detector, 1975 Autumn Meeting of Atomic Energy Society of Japan, Paper G-55, November 6, 1975, Osaka (in Japanese)
- 20) E.Sakai, H.Terada, and M.Katagiri; In-situ gamma-ray measurement using Ge(Li) detectors, *IEEE Trans.*, NS-23(1),726(1976)
- 21) E.Sakai, H.Terada, M.Katagiri, H.Yoshida, and H.Itoh; Ge(Li)detector measurement of gamma-rays from plumes, 1976 Annual Meeting of Atomic Energy Society of Japan, Paper D8, March 25,1976 (in Japanese)
- 22) E.Sakai, H.Terada, M.Katagiri, H.Yoshida, and H.Itoh; Sequential variation in environmental gamma-ray spectrum measured by an in-situ Ge(Li) detector, *ibid.*, Paper D9, March 25, 1976 (in Japanese)
- 23) H.Terada, E.Sakai, and M.Katagiri; Spectrum-to-dose rate conversion operator function for a Ge(Li)gamma-ray spectrometer, *ibid.*, Paper D10, March 25,1976 (in Japanese)
- 24) M.Sakanoue; Low level radioactivity experimental facility, *Nihon Genshiryoku Gakkaishi*, 17(8), 422(1975)
- 25) S.Moriuchi and I.Miyanaga; *Health Physics*, 12, 541(1966)
- 26) S.Moriuchi; A new method of dose evaluation by spectrum-dose conversion operator and determination of the operator, JAERI-1209(1971) (in Japanese)
- 27) H.L.Beck, J.E.McLaughlin, and K.M.Miller, In situ determinations of environmental plutonium and its related nuclides, *IEEE Trans.*, NS-23(1), 676(1976)

- 28) J.A.Kirby, L.R.Anspaugh, P.L.Phelps, G.A.Armantrout, and D.Sawyer; A detector system for in-situ spectrometric analysis of Am-241 and Pu in soil, IEEE Trans., NS-23(1), 683(1976)
- 29) K.Siegbahn, ed.; α , β , γ Ray Spectroscopy, vol.1, p.827, Appendix 1 (North Holland Publishing Company, 1965)
- 30) for an example, Atomic Data and Nuclear Data Table, vol.13 (1974)
- 31) E.Sakai, H.Terada, M.Katagiri, and H.Itoh; Progress Report, Semiconductor Detector Group - April 1, 1974 to March 31, 1975 -, JAERI-M 6258 (1975)
- 32) Y.Nakao; In-situ environmental gamma-ray spectrometry using 3" x 3" NaI (Tl) detector, Reactor Engineering School Report, September 1975, unpublished (in Japanese)
- 33) H.L.Beck; Environmental gamma radiation from deposited fission products, 1960 - 1964, Health Physics, 12, 313 (1966)
- 34) S.Okano; Environmental radiations and radioactivities, Shosha (Irradiation), No.23, 3 (October 1975) (in Japanese)
- 35) E.Sakai; unpublished data (1975)
- 36) S.Moriuchi, H.Kobayashi, and J.Mizov; Nuclear facility contribution and background variation in environmental gamma-ray monitoring - Discrimination and evaluation- (II), 1974 Autumn Meeting of Atomic Energy Society of Japan, B44 (October 1974)(in Japanese)

Table 1.1 Examples of in-situ gamma-ray detectors

	Closed-end coaxial Ge(Li)detector						NaI(Tl)
	HASL ¹⁾	HASL ¹⁾	LLL ²⁾	LLL ²⁾	Okano ³⁾	Sakai	HASL ¹⁾
Active volume (cm ³)	60	25	70	70	55	73	820
Diameter (mm)	43		40	44	44.5	48	101.6
Length (mm)	44		68	55	38	44.5	101.6
Cross section (cm ²)	14.5		12.5	15	15.6	18.1	81.1
Detection efficiency at 662keV gamma-rays (cps/photons/cm ² sec)	2.17	0.82	1.4	2.9	1.44	3.65	37
Energy resolution (FWHM keV)	2.3*	2.3*	3.1#	3.0#	1.8#	2.4#	52*

*for 662keV gamma-rays

for 1332keV gamma-rays

1) H.L.Beck, et al ; HASL-258 (1972)

2) P.L.Phelps, et al ; IEEE Trans. NS-21 (7) 543 (1974)

3) S.Okano ; Genshiryoku Kogyo 21 (7) 51 (1975)

Table 2.1 Analytical method of in-situ measurement

$$\frac{N_f}{S} = \frac{N_0}{\phi} \frac{N_f}{N_0} \frac{\phi}{S}$$

N_f/S ; the counting rate(cps) in the photopeak per unit of soil activity(pCi/g, or mCi/km², etc.)

N_0/ϕ ; the counting rate(cps) in the photopeak per unit flux(photons/cm²sec) of the unscattered photon when a point source is placed at 0° from the detector axis

N_f/N_0 ; a correction factor taking account of the angular dependence of the photopeak detection efficiency

$$\frac{N_f}{N_0} = \frac{1}{\phi} \int_0^{\pi/2} R(\theta) \frac{d\phi}{d\theta} d\theta$$

where

$R(\theta)$ is the angular dependence of the photopeak detection efficiency of the detector

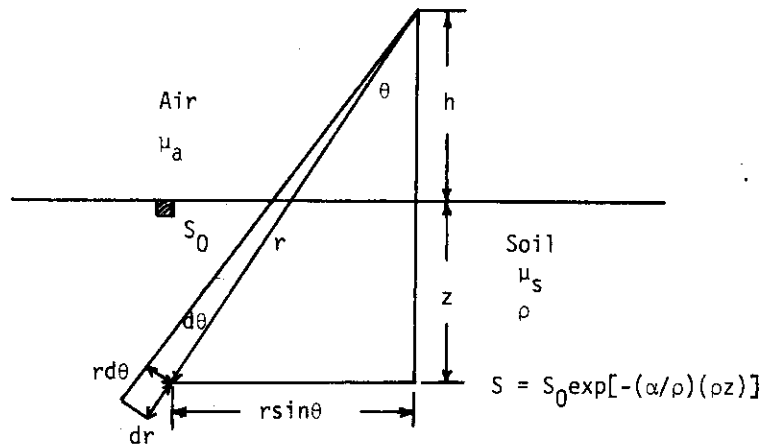
ϕ/S ; the flux of the unscattered photons(photons/cm²sec) incident at the detector per unit of soil activity

PHOTOPEAK COUNTING RATE TO EXPOSURE RATE AT THE DETECTOR

$$\frac{N_f}{I} = \frac{N_0}{\phi} \frac{N_f}{N_0} \frac{\phi}{I}$$

I ; the exposure rate(μR/h) at the detector

Table 2.2 Gamma-ray flux Φ and its angular dependence $d\Phi/d\theta$ at h meter above the ground for three different distributions of gamma-ray emitting nuclides in the soil



For exponentially distributed source with depth(ex.fallout nuclides)

$$\begin{aligned} \Phi &= \iint \frac{S_0}{4\pi r^2} \exp[-(\alpha/\rho)(\rho z)] \exp(-\mu_s z/\cos\theta) \exp(-\mu_a h/\cos\theta) 2\pi r \sin\theta \, r \, dr \, d\theta \\ &= \frac{S_0}{2} \int_0^{\pi/2} \int_{h/\cos\theta}^{\infty} \exp[-\{(\alpha/\rho)\rho + (\mu_s/\cos\theta)\}z] \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \sin\theta \, dr \, d\theta \\ \frac{d\Phi}{d\theta} &= \frac{S_0}{2\rho} \frac{\sin\theta}{(\alpha/\rho)\cos\theta + (\mu_s/\rho)} \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \end{aligned}$$

For uniformly distributed source with depth (ex. K-40, U-238 series,Th-232 series)

$$\begin{aligned} \alpha/\rho &= 0 \\ \Phi &= (S_0/\rho)/[2\mu_s/\rho] \int_0^{\pi/2} \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \sin\theta \, d\theta \\ \frac{d\Phi}{d\theta} &= \frac{(S_0/\rho)\sin\theta}{2(\mu_s/\rho)} \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \end{aligned}$$

For infinite plane source (ex. fresh fallout nuclides)

$$\begin{aligned} \alpha/\rho &\rightarrow \text{infinite} \\ \Phi &= (S_A/2) \int_0^{\pi/2} \tan\theta \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \, d\theta = (S_A/2) E_1(\mu_a h) \\ \frac{d\Phi}{d\theta} &= (S_A/2) \tan\theta \exp(-\mu_a h/\cos\theta) \end{aligned}$$

S_A ; soil activity per unit area

E_1 ; exponential integral

Table 2.3 Mass attenuation coefficients in soil of various moisture contents

Gamma-ray energy (keV)	Mass attenuation coefficient μ/ρ (cm ² /g)						Linear attenuation coefficient μ (cm ⁻¹)		
	Soil ¹⁾ 0%H ₂ O	Soil ¹⁾ 10%H ₂ O	Soil ¹⁾ 25%H ₂ O	Aluminum ²⁾	Water ²⁾	Air ²⁾⁺	Soil 10%H ₂ O $\rho=1.6\text{g/cm}^3$	Soil** $\rho=1.5\text{g/cm}^3$	Air
10				25.8	4.96	4.76			
15				7.67	1.49	1.44			
20	3.01	2.78	2.05	3.22	0.705	0.683	4.448	4.830	0.000823
25	2.34	1.52	1.13	1.76			2.432	2.640	
30	1.00	0.938	0.838	1.03	0.335	0.315	1.5008	1.545	0.000380
35	0.656	0.644	0.566	0.669			1.0304	1.0035	
40	0.470	0.471	0.433	0.492	0.243	0.225	0.7536	0.7380	0.000271
45	0.380	0.381	0.338	0.386			0.6096	0.5790	
50	0.327	0.314	0.298	0.319	0.211	0.193	0.5024	0.4785	0.000233
55	0.282	0.277	0.265	0.277			0.4432	0.4155	
60	0.254	0.248	0.239	0.246	0.196	0.177	0.3968	0.3690	0.000213
65	0.233	0.230	0.221	0.219			0.3680	0.3285	
70	0.218	0.214	0.206	0.205			0.3424	0.3075	
75	0.204	0.202	0.194	0.193			0.3232	0.2895	
80	0.192	0.190	0.189	0.185	0.178	0.161	0.3040	0.2775	0.000194
85	0.189	0.185	0.181	0.177			0.2960	0.2655	
90	0.179	0.178	0.175	0.171			0.2848	0.2565	
95	0.173	0.173	0.170	0.166			0.2768	0.2490	
100	0.166	0.167	0.167	0.160	0.167	0.151	0.2672	0.2400	0.000182
150	0.138	0.139	0.141	0.134	0.149	0.134	0.2224	0.2235	0.000162
200	0.124	0.125	0.127	0.120	0.136	0.123	0.2000	0.2040	0.000148
250	0.114	0.115	0.118	0.111			0.1840		
300	0.106	0.108	0.109	0.103	0.118	0.106	0.1728	0.1770	0.000128
350	0.100	0.101	0.105	0.098			0.1616		
400	0.0950	0.0963	0.0975	0.0925	0.106	0.0953	0.1541	0.1590	0.000115
450	0.0906	0.0919	0.0931	0.0875			0.1470		
500	0.0869	0.0875	0.0894	0.0844	0.0966	0.0868	0.1400	0.1449	0.000105
550	0.0831	0.0844	0.0856	0.0806			0.1350		
600	0.0800	0.0813	0.0825	0.0775	0.0896	0.0804	0.1301	0.1344	0.000097
650	0.0769	0.0788	0.0800	0.0756			0.1261		
700	0.0744	0.0756	0.0775	0.0731			0.1210		
750	0.0725	0.0731	0.0750	0.0706			0.1170		
800	0.0706	0.0713	0.0725	0.0681	0.0786	0.0706	0.1141	0.1179	0.0000851
850	0.0681	0.0694	0.0706	0.0669			0.1110		
900	0.0669	0.0675	0.0688	0.0644			0.1080		
950	0.0656	0.0650	0.0669	0.0631			0.1040		
1000	0.0638	0.0638	0.0650	0.0614	0.0706	0.0635	0.1021	0.1059	0.0000765
1500	0.0515	0.0521	0.0530	0.0500	0.0575	0.0517	0.0834	0.0863	0.0000623
2000	0.0444	0.0449	0.0456	0.0432	0.0493	0.0444	0.0718	0.0740	0.0000535
2500	0.0398	0.0401	0.0413	0.0388			0.0642		
3000	0.0362	0.0364	0.0371	0.0353	0.0396	0.0358	0.0582	0.0594	0.0000431
4000				0.0310	0.0340	0.0308		0.0510	0.0000371
5000				0.0280	0.0302	0.0274		0.0453	0.0000330
6000				0.0265	0.0276	0.0251		0.0414	0.00003025
8000				0.0242	0.0242	0.0222		0.0363	0.0000268
10000				0.0230	0.0220	0.0203		0.0330	0.0000245
15000				0.0217	0.0193	0.0179		0.0290	0.0000216
20000				0.0215	0.0180	0.0169		0.0270	0.0000204
30000				0.0217	0.0170	0.0161		0.0255	0.0000194
40000				0.0224	0.0166	0.0159		0.0249	0.0000192
50000				0.0229	0.0166	0.0161		0.0249	0.0000194
60000				0.0234	0.0166	0.0161		0.0249	0.0000194
80000				0.0243	0.0169	0.0164		0.0254	0.0000198
100000				0.0251	0.0172	0.0168		0.0258	0.0000202

1) H.L. Beck, J.A.DeCampo, and C.V. Gogolak: HASL-258 (1972)

2) K. Siegbahn, ed., "α-β-γ Ray Spectroscopy" Vol.1, Appendix 1, p.827 (North-Holland Publ. Co. 1965).

* Soil 10%H₂O: 13.5%Al₂O₃, 4.5%Fe₂O₃, 67.5%SiO₂, 4.5%CO₂, 10%H₂O density 1.6 g/cm³.

+ Air: 75.5%N, 23.2%O, 1.3%Ar by weight.

cm²/g × 0.001205 = cm⁻¹ at 20°C and 76 cmHg pressure** μ/ρ for soil was taken as μ/ρ of Al for gamma-rays of smaller than 100 keV and μ/ρ of water for gamma-rays of larger than 100 keV. Then, multiplied by $\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3$.

Table 2.4 Calculated angular flux ($d\Phi/d\theta$), normalized angular flux ($d\Phi/d\theta$), normalized angular flux ($d\Phi/d\theta$), normalized angular flux ($d\Phi/d\theta$) / Φ , and cumulative normalized flux $\int_0^\theta (d\Phi/d\theta)d\theta/\Phi$ of 662keV gamma-rays at one meter above ground

θ (deg.)	Distance tan θ (m)	$\alpha/p = 0$ (Uniform)		$\alpha/p = 0.0625$		$\alpha/p = 0.206$		$\alpha/p = 0.312$		$\alpha/p = 0.625$		$\alpha/p = 6.25$		$\alpha/p = \infty$ (Plane)		
		$\frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{d\Phi}{d\theta}$	$\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{d\theta}$	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0.1765	0.0195	0.00316	0.0158	0.0007	0.00242	0.0121	0.0011	0.00183	0.00916	0.00122	0.00164	0.00820	0.00136	0.00137	0.00683
20	0.3642	0.0385	0.00621	0.0628	0.0014	0.00486	0.0485	0.0023	0.00373	0.0369	0.00249	0.00335	0.03309	0.00278	0.00281	0.02761
30	0.5776	0.0562	0.00907	0.1394	0.0021	0.00735	0.1095	0.0035	0.00578	0.0843	0.00388	0.00522	0.07581	0.00437	0.00440	0.06350
40	0.8394	0.0721	0.01164	0.2432	0.0028	0.00991	0.1957	0.0049	0.00806	0.1533	0.00548	0.00737	0.1385	0.00624	0.00629	0.1167
50	1.1822	0.0857	0.01384	0.3709	0.0035	0.01255	0.3079	0.0065	0.0108	0.2469	0.00741	0.00997	0.2247	0.00861	0.00868	0.1910
60	1.7327	0.0965	0.01538	0.5184	0.0043	0.01530	0.4471	0.0085	0.0141	0.3705	0.00994	0.01337	0.3405	0.0119	0.01201	0.2934
70	2.7490	0.1038	0.01676	0.6806	0.0051	0.01811	0.6141	0.0112	0.0185	0.5322	0.01357	0.01825	0.4970	0.01717	0.01732	0.4377
80	5.6771	0.1060	0.01710	0.8509	0.0058	0.0207	0.8087	0.0149	0.0247	0.7465	0.01940	0.02610	0.7154	0.02748	0.02771	0.6560
85	11.453	0.1016	0.0164	0.9352	0.0059	0.02116	0.9140	0.0170	0.0281	0.8790	0.02343	0.03152	0.8594	0.03720	0.03753	0.9174
88	28.78	0.0868	0.01401	0.9819	0.0053	0.01882	0.9754	0.0164	0.0271	0.9637	0.02373	0.03193	0.9566	0.04230	0.04267	0.9397
89	57.87	0.0663	0.01069	0.9945	0.0041	0.01456	0.9925	0.0130	0.0216	0.9887	0.01931	0.02599	0.9864	0.03631	0.03662	0.9804
90	∞	0	0	1.0000	0	0	1.0000	0	0	1.0000	0	0	1.0000	0	0	1.0000

Table 2.5 Unscattered flux at one meter above ground for exponentially distributed sources in the soil

Source Energy (keV)	(α/ρ) -cm ² /g						
	0 (Uniform)	0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	∞ (Plane)
50	1.4403	0.0816	0.2245	0.3049	0.4748	1.147	1.577
100	2.7744	0.1458	0.3627	0.4708	0.6786	1.359	1.710
150	3.3264	0.1702	0.4103	0.5261	0.7438	1.427	1.775
200	3.7056	0.1843	0.4550	0.5770	0.8018	1.483	1.804
250	4.0640	0.2008	0.4697	0.5910	0.8185	1.506	1.863
364	4.7184	0.2268	0.5158	0.6429	0.8775	1.578	1.933
500	5.3904	0.2519	0.5595	0.6918	0.9334	1.650	1.995
662	6.1456	0.2788	0.6041	0.7412	0.9889	1.719	2.054
750	6.5312	0.2919	0.6257	0.7649	1.015	1.752	2.084
1000	7.5280	0.3245	0.6769	0.8209	1.077	1.830	2.151
1173	8.1472	0.3437	0.7067	0.8531	1.113	1.874	2.189
1250	8.4384	0.3523	0.7198	0.8675	1.129	1.895	2.205
1333	8.7504	0.3617	0.7336	0.8826	1.145	1.914	2.224
1460	9.1472	0.3731	0.7511	0.9011	1.166	1.941	2.247
1765	10.091	0.3997	0.7897	0.9428	1.211	1.997	2.294
2004	10.818	0.4188	0.8173	0.9725	1.243	2.036	2.334
2250	11.397	0.4357	0.8414	0.9982	1.271	2.071	2.358
2500	12.173	0.4536	0.8667	1.025	1.300	2.105	2.385

*The activity at depth Z cm or ρZ g/cm² is S (gammas emitted per gram soil per sec) = $\alpha/\rho S_A e^{-(\alpha/\rho)(\rho Z)}$ where $S_A = 1.0$ gamma/cm²-s is the total number of gammas emitted in a column of area 1 cm² and infinite depth (see equation 3). For $\alpha/\rho = 0$, $S_0/\rho = 1.0$ gammas emitted per gram of soil for all Z.

From H.L.Beck, et al; HASL-258 (1972)

Table 2.6 Unscattered flux per pCi/g at one meter above ground for uniformly distributed ²²⁶Ra and ²³²Th sources in the soil

Decaying Isotope	E (keV)	γ's/dis.*	Flux (γ's/cm ² -s)	Decaying Isotope	E (keV)	γ's/dis.*	Flux (γ's/cm ² -s)
²²⁶ Ra	186	0.034	4.58(-3)	²¹⁴ Pb	239	0.490	7.25(-2)
²¹⁴ Pb	242	0.070	1.04(-2)	²²⁶ Ra	241		
	295	0.179	2.91(-2)	²²⁸ Ac	270	0.065	1.02(-2)
	352	0.350	6.01(-2)	²⁰⁸ Tl	277		
²¹⁴ Bi	609	0.430	9.42(-2)	²²⁸ Ac	282		
	666	0.015	3.39(-3)	²¹² Pb	301	0.034	5.53(-3)
	768	0.048	1.17(-2)	²²⁸ Ac	338	0.129	2.18(-2)
	934	0.031	8.10(-3)	Mixed	328-340	0.172	2.90(-2)
	1120	0.145	4.21(-2)	²²⁸ Ac	463	0.047	9.20(-3)
	1238	0.056	1.72(-2)	²⁰⁸ Tl	510	0.096	1.93(-2)
	1378	0.046	1.49(-2)	²⁰⁸ Tl	583	0.300	6.39(-2)
	1401-08	0.038	1.25(-2)	²¹² Bi, ²²⁸ Ac	727	0.079	1.86(-2)
	1510	0.021	7.12(-3)	²²⁸ Ac	755	0.011	2.70(-3)
	1730	0.028	1.02(-2)		772	0.017	4.10(-3)
	1765	0.147	5.39(-2)		795	0.049	1.20(-2)
	1848	0.021	7.91(-3)		830-35+40	0.038	9.40(-3)
	2205	0.047	1.95(-2)	²⁰⁸ Tl	860	0.047	1.18(-2)
	2448	0.015	6.66(-3)	²²⁸ Ac	911	0.290	7.55(-2)
²²⁸ Ac	129	0.025	2.90(-3)		965+69	0.230	6.13(-2)
	210	0.041	5.80(-3)	²⁰⁸ Tl	1588	0.046	1.63(-2)
					2615	0.360	0.167

*Transitions for which γ's/dis. < .02 are not listed except where they are required to correct measurements of the flux from some other natural or fallout emitter. Series equilibrium is assumed.

From H.L.Beck, et al; HASL-258(1972)

Table 2.7 Unscattered flux per mCi/km² at one meter above ground for typical fallout isotopes in the soil

Isotope	E _γ (keV)	γ's/dis.	(σ/ρ) - cm ² /g					φ (Plane)
			0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	
¹⁴⁴ Ce	134	.108	6.51(-5)	1.59(-4)	2.04(-4)	2.90(-4)	5.63(-4)	6.99(-4)
¹⁴¹ Ce	145	.490	3.03(-4)	7.43(-4)	9.43(-4)	1.34(-3)	2.57(-3)	3.21(-3)
¹³¹ I	364	.824	6.92(-4)	1.58(-3)	1.96(-3)	2.67(-3)	4.82(-3)	5.88(-3)
¹³⁷ Sb	428	.296	2.63(-4)	5.89(-4)	7.39(-4)	9.88(-4)	1.75(-3)	2.15(-3)
¹⁴⁰ La	487	.45	4.13(-4)	9.19(-4)	1.14(-3)	1.54(-3)	2.71(-3)	3.30(-3)
¹⁰³ Ru	497	.89	8.20(-4)	1.84(-3)	2.27(-3)	3.08(-3)	5.43(-3)	6.59(-3)
¹⁰⁶ Ru	512	.206	1.94(-4)	4.34(-4)	5.33(-4)	7.16(-4)	1.27(-3)	1.53(-3)
¹⁴⁰ Ba	537	.238	2.29(-4)	5.11(-4)	6.25(-4)	8.37(-4)	1.47(-3)	1.78(-3)
¹³⁸ Sb	601	.184	1.84(-4)	4.02(-4)	4.90(-4)	6.57(-4)	1.14(-3)	1.38(-3)
¹⁰³ Ru	610	.054	5.33(-5)	1.18(-4)	1.44(-4)	1.93(-4)	3.40(-4)	4.06(-4)
¹⁰⁶ Ru	622	.10	1.00(-4)	2.19(-4)	2.68(-4)	3.59(-4)	6.29(-4)	7.55(-4)
¹³⁷ Cs	662	.846	8.73(-4)	1.89(-3)	2.32(-3)	3.08(-3)	5.38(-3)	6.42(-3)
⁹⁰ Zr	724	.435	4.67(-4)	9.98(-4)	1.22(-3)	1.61(-3)	2.82(-3)	3.33(-3)
⁹⁶ Zr	757	.543	5.91(-4)	1.27(-3)	1.54(-3)	2.07(-3)	3.54(-3)	4.22(-3)
⁹⁰ Nb	766	.998	1.09(-3)	2.35(-3)	2.85(-3)	3.85(-3)	6.59(-3)	7.77(-3)
¹⁴⁰ La	816	.231	2.58(-4)	5.47(-4)	6.67(-4)	8.97(-4)	1.54(-3)	1.81(-3)
⁵⁴ Mn	835	1.0	1.13(-3)	2.39(-3)	2.89(-3)	3.89(-3)	6.66(-3)	7.84(-3)
¹⁴⁰ La	1597	.956	1.38(-3)	2.71(-3)	3.26(-3)	4.21(-3)	6.93(-3)	8.03(-3)
⁶⁰ Co	1173	1.0	1.27(-3)	2.62(-3)	3.16(-3)	4.12(-3)	6.93(-3)	8.10(-3)
⁶⁰ Co	1333	1.0	1.34(-3)	2.72(-3)	3.27(-3)	4.24(-3)	7.08(-3)	8.23(-3)

From H.L.Beck, et al; HASL-258(1972)

Table 2.8 Exposure rate ($\mu\text{R/h}$) per unit flux ($\text{photon/cm}^2\text{sec}$) of gamma-rays

Air 75.5% N, 23.2% O, 1.3% A by weight,
 $1 \mu\text{R/h} = 0.01456 \text{ MeV/g}\cdot\text{sec}$
 $\text{cm}^2/\text{g} \times 0.001205 = \text{cm}^{-1}$ at 20°C and 76 cmHg pressure

E_γ (MeV)	Energy transfer coefficient* μ_e/ρ (cm^2/g)	$\frac{\mu_e E_\gamma}{\rho}$ (MeV) $\text{MeV cm}^2/\text{g}$	$\frac{\mu_e E_\gamma}{0.01456\rho}$ ($\frac{\mu\text{R/h}}{\text{photons/cm}^2\text{sec}}$)
0.01	4.58	0.0458	3.1456
0.015	1.25	0.01875	1.2878
0.02	0.504	0.01008	0.6923
0.03	0.145	0.00435	0.2988
0.04	0.0623	0.002492	0.1712
0.05	0.0377	0.001885	0.1295
0.06	0.0287	0.001722	0.1183
0.08	0.0235	0.00188	0.1291
0.10	0.0231	0.00231	0.1587
0.15	0.0249	0.003735	0.2565
0.20	0.0266	0.00532	0.3654
0.30	0.0287	0.00861	0.5913
0.40	0.0295	0.01180	0.8104
0.50	0.0299	0.01495	1.0268
0.60	0.0296	0.01776	1.2218
0.80	0.0289	0.02312	1.5879
1.0	0.0280	0.0280	1.9231
1.5	0.0257	0.03855	2.6477
2.0	0.0238	0.0476	3.2692
3.0	0.0211	0.0633	4.3475
4.0	0.0194	0.0776	5.3297
5.0	0.0182	0.0910	6.2500
6.0	0.0173	0.1038	7.1291
8.0	0.0162	0.1296	8.9011
10	0.0155	0.155	10.6456
15	0.0146	0.219	15.0412

* From K. Siegbahn "α,β,γ Spectroscopy," Vol.1, p.841 (1965).

Table 2.9 Exposure rate ($\mu\text{R/h}$) at one meter above ground for exponentially distributed monoenergetic sources in the soil

Source Energy (keV)	$(\alpha/\rho)\text{-cm}^2/\text{g}$						
	0 (Uniform)	0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	∞ (Plane)
50	0.88	-	-	-	-	-	-
100	2.05	~0.095	0.185	0.215	0.270	0.400	0.438
150	3.39	0.140	0.285	0.335	0.418	0.620	0.700
200	4.88	0.200	0.390	0.460	0.570	0.845	0.960
250	6.37	0.258	0.491	0.583	0.731	1.08	1.25
364	10.2	0.404	0.771	0.896	1.11	1.63	1.91
500	14.4	0.558	1.03	1.23	1.52	2.27	2.60
662	19.6	0.738	1.37	1.60	1.97	2.95	3.39
750	22.6	0.837	1.54	1.80	2.21	3.32	3.80
1000	30.4	1.10	2.00	2.32	2.85	4.28	4.86
1173	36.2	1.28	2.31	2.63	3.27	4.87	5.52
1250	38.4	1.33	2.41	2.79	3.42	5.14	5.86
1333	41.8	1.42	2.56	2.95	3.62	5.35	6.16
1460	45.1	1.54	2.75	3.18	3.88	5.73	6.56
1765	54.6	1.78	3.25	3.75	4.40	6.45	7.78
2004	62.2	2.07	3.60	4.13	5.00	7.15	8.20
2250	69.5	-	-	-	-	-	-
2500	77.2	-	-	-	-	-	-
2750	85.0	-	-	-	-	-	-

*The activity at depth Z cm or $\rho Z \text{ g/cm}^3$ is S (gammas emitted per gram soil per sec) = $\alpha/\rho S_A e^{-(\alpha/\rho)(\rho Z)}$ where $S_A = 1.0 \text{ gamma/cm}^2\text{-s}$ is the total number of gammas emitted in a column of area 1 cm^2 and infinite depth (see equation 3). For $\alpha/\rho = 0$, $S_0/\rho = 1.0 \text{ gammas emitted per gram of soil for all Z}$.

From H.L.Beck, et al; HASL-258 (1972)

Table 2.10 Unscattered gamma-ray exposure rate and total exposure rate ($\mu\text{R}/\text{h}$) per unit radioactivity (one photon/sec per gram of soil)

Gamma-ray energy (keV)	Unscattered* gamma-ray flux at one meter $\alpha=0$ (Uniform) (photons/cm ² sec per photon/sec·g)	H.L. Beck* HASL-258 Table 1 ($\mu\text{R}/\text{h}$ per photon/cm ² sec)	Exposure rate due to unscattered gamma-rays ($\mu\text{R}/\text{h}$ per 1 photon/g soil)	Total * exposure rate ($\mu\text{R}/\text{h}$ per 1 photon/g soil)	Exposure rate ratio of unscattered to total
50	1.4403	0.1295	0.1865	0.88	0.212
100	2.7744	0.1587	0.4403	2.05	0.215
150	3.3264	0.2565	0.8532	3.39	0.252
200	3.9056	0.3654	1.4271	4.88	0.292
250	4.0640	0.48	1.9507	6.37	0.306
364	4.7154	0.73	3.4444	10.2	0.338
500	5.3904	1.0268	5.5349	14.4	0.384
662	6.1456	1.32	8.1122	19.6	0.414
750	6.5312	1.48	9.666	22.6	0.428
1000	7.5280	1.9231	14.477	30.4	0.476
1173	8.1472	2.2	17.924	36.2	0.495
1250	8.4384	2.3	19.4083	38.4	0.505
1333	8.7504	2.4	21.001	41.8	0.502
1460	9.1472	2.6	23.783	45.1	0.527
1765	10.091	3.0	30.273	54.6	0.554
2004	10.818	3.2692	36.366	62.2	0.569
2250	11.397	3.55	40.459	69.5	0.582
2500	12.173	3.82	46.501	77.2	0.602
2700				85.0	

* H.L. Beck et al. HASL-258(1972).

Table 2.11 Total exposure rate at one meter above ground for natural emitters uniformly distributed in the soil

Nuclide	Gamma-ray energy (keV)	Photons/dis	Photons/sec pCi	$\mu\text{R/h}^+$ Photon/sec per g	$\mu\text{R/h}$ pCi/g	H.L. Beck, et al. HASL-258(1972) Table 8		
						Subtotal	Subtotal	
K-40	1464	0.107	0.003959	45.1	0.1786		0.179	
U-238 series						1.574	1.82	
Ra-226	186	0.034	0.001258	4.4	5.54(-3)	0.0055		
Pb-214	242	0.070	0.00259	6.2	1.606(-2)	0.1920	0.20	
"	295	0.179	0.006623	7.8	5.1659(-2)			
"	352	0.350	0.01295	9.6	0.1243	1.3765	1.60	
Bi-214	609	0.430	0.01591	17.8	0.28320			
"	666	0.015	0.000555	19.5	0.01082			
"	768	0.048	0.001776	23.4	0.04156			
"	934	0.031	0.001147	28.5	0.03269			
"	1120	0.145	0.005365	35.0	0.18778			
"	1238	0.056	0.002072	39.0	0.08081			
"	1378	0.046	0.001702	43.5	0.07404			
"	1401-08	0.038	0.001406	44.5	0.06257			
"	1510	0.021	0.000777	47.5	0.03691			
"	1730	0.028	0.001036	54.5	0.05646			
"	1765	0.147	0.005439	55.5	0.30186			
"	1848	0.021	0.000777	58.0	0.04507			
"	2205	0.047	0.001739	69.0	0.11999			
"	2448	0.015	0.000555	77.0	0.04274			
Th-232 series						2.3615	2.82	
Ac-228	129	0.025	0.000925	2.8	0.00259	Ac-228	0.90409	1.18
"	210	0.041	0.001517	5.1	0.00774	Tl-208	1.3896	1.36
Ac-228	270	0.065	0.002405	7.1	0.01708	Pb-212	0.00994	0.09
Tl-208	277							
Ac-228	282							
Pb-212	301							
Ac-228	338	0.129	0.004773	9.3	0.04439	Mixed	0.05791	0.09
Mixed	328-340	0.172	0.006364	9.1	0.05791			
Ac-228	463	0.047	0.001739	13.5	0.02348			
Tl-208	510	0.096	0.003552	15.0	0.05328			
"	583	0.300	0.0111	17.5	0.19425			
Bi-212	727	0.079	0.002923	22.0	0.06431			
Ac-228								
Ac-228	755	0.011	0.000407	22.5	0.009158			
"	772	0.017	0.000629	23.5	0.01478			
"	795	0.049	0.001813	24.2	0.04387			
"	830+35+40	0.038	0.001406	25.5	0.03585			
Tl-208	860	0.047	0.001739	26.5	0.04608			
Ac-228	911	0.290	0.01073	28.0	0.30044			
"	965+69	0.230	0.00851	30.0	0.2553			
"	1588	0.046	0.001702	50.0	0.08510			
Tl-208	2615	0.360	0.01332	81.0	1.07892			

+ From Table 2.11 and Fig. 2.10

Table 2.12 Total exposure rate at one meter above ground for natural emitters uniformly distributed in the soil

Isotope	$\mu\text{R/h}$ pCi/g	$\mu\text{R/h}$ unit concentration
^{40}K	0.179	1.49 per % K
^{226}Ra +daughters	1.80	0.61 per 0.358×10^{-6} ppm Ra
^{214}Pb	0.20	0.07 " " "
^{214}Bi	1.60	0.54 " " "
^{235}U +daughters	1.82	0.62 per ppm ^{235}U
^{232}Th +daughters	2.82	0.31 per ppm ^{232}Th
^{228}Ac	1.18	0.13 " "
^{208}Tl	1.36	0.15 " "
^{212}Bi	0.09	0.01 " "
^{212}Pb	0.09	0.01 " "
Other	0.09	0.01 " "

Note: Values quoted in reference 1 based on old decay scheme data and buildup factor calculations were:

$$^{235}\text{U} - 0.76 (\mu\text{R/h})/\text{ppm}$$

$$^{232}\text{Th} - 0.36 (\mu\text{R/h})/\text{ppm}$$

$$^{40}\text{K} - 1.71 (\mu\text{R/h})/\% \text{K}$$

From H.L.Beck, et al; HASL-258 (1972)

Table 2.13 ϕ/I - Ratio of gamma-ray flux density to exposure rate from natural emitters in the soil

Parent Isotope	E_γ (keV)	ϕ/I ($\frac{\gamma' \text{ s/cm}^2 \text{ -s}}{\mu\text{R/h}}$)	Parent Isotope	E_γ (keV)	ϕ/I ($\frac{\gamma' \text{ s/cm}^2 \text{ -s}}{\mu\text{R/h}}$)
Uranium Series, I = 1.82 $\frac{\mu\text{R/h}}{\text{pCi/g}}$			Thorium Series, I = 2.82 $\frac{\mu\text{R/h}}{\text{pCi/g}}$		
^{226}Ra	186	2.52 (-3)	^{228}Ac	129	1.03 (-3)
^{214}Pb	242	5.71 (-3)	^{212}Pb	210	2.06 (-3)
	295	1.60 (-2)	^{212}Pb	239}	2.57 (-2)
	352	3.30 (-2)	^{228}Ra	241}	
^{214}Bi	609	5.18 (-2)	^{228}Ac	270}	3.62 (-3)
	666	1.86 (-3)	^{208}Tl	277}	
	768	6.43 (-3)	^{228}Ac	282	
	934	4.45 (-3)	^{212}Pb	301	1.96 (-3)
	1120	2.31 (-2)	^{228}Ac	338	7.73 (-3)
	1238	9.45 (-3)	Mixed	328-340	1.03 (-2)
	1378	8.19 (-3)	^{228}Ac	463	3.26 (-3)
	1401-08	6.87 (-3)	^{208}Tl	510	6.84 (-3)
	1510	3.91 (-3)	^{208}Tl	583	2.27 (-2)
	1730	5.60 (-3)	$^{212}\text{Bi}, ^{228}\text{Ac}$	727	6.60 (-3)
	1765	2.96 (-2)	^{228}Ac	755	9.57 (-4)
	1845	4.35 (-3)		772	1.45 (-3)
	2205	1.07 (-2)		795	4.25 (-3)
	2448	3.66 (-3)		830+835+840	3.33 (-3)
Potassium, I = 0.179 $\frac{\mu\text{R/h}}{\text{pCi/g}}$			^{208}Tl	860	4.18 (-3)
^{40}K	1464	0.203	^{228}Ac	911	2.68 (-2)
				965+969	2.17 (-2)
				1588	4.36 (-3)
			^{208}Tl	2615	5.92 (-2)

From H.L.Beck, et al; HASL-258(1972)

Table 2.14 Total exposure rate ($\mu\text{R/h}$) at one meter above ground for selected fallout isotopes in the soil

Isotope	Source Activity (mCi/km^2)	$(\alpha/p) - \text{cm}^2/\text{g}$					
		0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	= (Plane)
^{144}Ce	1.0	6.25(-5)	1.34(-4)	1.56(-4)	1.96(-4)	2.86(-4)	3.27(-4)
$^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}^*$	2.0	1.85(-4)	3.51(-4)	4.05(-4)	5.03(-4)	7.22(-4)	8.34(-4)
^{141}Ce	1.0	2.60(-4)	5.23(-4)	6.21(-4)	7.68(-4)	1.15(-3)	1.31(-3)
^{131}I	1.0	1.56(-3)	2.92(-3)	3.35(-3)	4.20(-3)	6.91(-3)	7.28(-3)
^{125}Sb	1.0	1.77(-3)	3.33(-3)	3.82(-3)	4.86(-3)	7.14(-3)	8.29(-3)
^{140}Ba	1.0	7.74(-4)	1.45(-3)	1.69(-3)	2.09(-3)	3.16(-3)	3.66(-3)
^{140}La	1.0	8.98(-3)	1.63(-2)	1.88(-2)	2.40(-2)	3.56(-2)	3.96(-2)
$^{140}\text{Ba}+^{140}\text{La}^*$	2.15	1.11(-2)	2.02(-2)	2.33(-2)	2.97(-2)	4.40(-2)	4.92(-2)
^{103}Ru	1.0	1.97(-3)	3.66(-3)	4.30(-3)	5.37(-3)	7.90(-3)	9.22(-3)
$^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}^*$	2.0	7.74(-4)	1.43(-3)	1.67(-3)	2.11(-3)	3.17(-3)	3.65(-3)
^{137}Cs	1.0	2.31(-3)	4.29(-3)	4.99(-3)	6.17(-3)	9.24(-3)	1.06(-2)
^{95}Zr	1.0	3.02(-3)	5.51(-3)	6.36(-3)	7.81(-3)	1.17(-2)	1.35(-2)
^{95}Nb	1.0	3.15(-3)	5.74(-3)	6.66(-3)	8.14(-3)	1.24(-2)	1.41(-2)
$^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$	3.155	9.91(-3)	1.79(-2)	2.07(-2)	2.54(-2)	3.84(-2)	4.39(-2)
^{54}Mn	1.0	3.40(-3)	6.29(-3)	7.22(-3)	8.88(-3)	1.34(-2)	1.54(-2)
^{60}Co	1.0	9.99(-3)	1.80(-2)	2.06(-2)	2.55(-2)	3.78(-2)	4.32(-2)

*Assuming daughter is in equilibrium with parent-exposure rate is for 1 mCi/km^2 of parent activity.

From H.L.Beck, et al; HASL-258(1972)

Table 2.15 Φ/I - (one meter) for fallout emitters in the soil - (photons/ $\text{cm}^2 \text{sec})/(\mu\text{R/h})$

Isotope	E_γ (key)	$(\alpha/p) - \text{cm}^2/\text{g}$					
		0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	= Plane
^{144}Ce	134	1.04	1.19	1.31	1.48	1.97	2.14
$^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$	134	0.352	0.453	0.504	0.577	0.780	0.838
^{141}Ce	145	1.17	1.42	1.52	1.74	2.23	2.45
^{131}I	364	0.444	0.541	0.585	0.636	0.702	0.808
^{125}Sb	428	0.149	0.177	0.193	0.203	0.245	0.259
^{140}La	487	0.046	0.056	0.061	0.064	0.076	0.083
$^{140}\text{Ba}-^{140}\text{La}$	487	0.037	0.045	0.049	0.052	0.062	0.067
^{103}Ru	497	0.416	0.503	0.528	0.574	0.687	0.715
$^{106}\text{Ru}-^{106}\text{Rh}$	512	0.251	0.303	0.319	0.339	0.401	0.419
^{140}Ba	537	0.296	0.352	0.370	0.400	0.465	0.496
$^{140}\text{Ba}-^{140}\text{La}$	537	0.0206	0.0253	0.0268	0.0282	0.0334	0.0362
^{125}Sb	601	0.104	0.121	0.128	0.135	0.160	0.166
^{103}Ru	610	0.0271	0.0322	0.0335	0.0359	0.0430	0.0440
^{106}Ru	622	0.129	0.153	0.160	0.170	0.198	0.207
^{137}Cs	662	0.377	0.440	0.465	0.499	0.582	0.606
^{95}Zr	724	0.155	0.181	0.192	0.206	0.241	0.247
$^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$	724	0.0476	0.0557	0.0589	0.0634	0.0734	0.0758
^{95}Zr	757	0.196	0.230	0.242	0.265	0.303	0.313
$^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$	757	0.0602	0.0709	0.0744	0.0815	0.0922	0.0961
^{95}Nb	766	0.346	0.409	0.428	0.473	0.531	0.551
$^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$	766	0.239	0.282	0.297	0.328	0.371	0.381
^{140}La	816	0.0287	0.0336	0.355	0.0374	0.0433	0.0457
$^{140}\text{Ba}-^{140}\text{La}$	816	0.0232	0.0270	0.0286	0.0302	0.0350	0.0368
^{54}Mn	835	0.332	0.380	0.400	0.438	0.497	0.509
^{140}La	1597	0.154	0.166	0.173	0.175	0.195	0.203
$^{140}\text{Ba}-^{140}\text{La}$	1597	0.124	0.134	0.140	0.142	0.158	0.163
^{60}Co	1173	0.127	0.146	0.153	0.162	0.183	0.188
^{60}Co	1333	0.134	0.151	0.159	0.168	0.187	0.191

From H.L.Beck, et al; HASL-258(1972)

Table 3.2.1 Peak detection efficiencies of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector for parallel beams of gamma-rays of different energies

Gamma-ray energy (keV)	Source	Gamma-rays per sec from source (γ/sec)	Peak counting rate (cps)	Peak detection efficiency (absolute) (cts/ γ)	Peak detection efficiency N_0/ϕ^* (cps/ $\gamma/\text{cm}^2\text{sec}$)
60	Am-241	1.598×10^5	9.7222	0.6084×10^{-4}	7.6454
81	Ba-133	1.412×10^5	13.4691	0.9539 "	11.9871
122	Co-57	1.905×10^5	19.7168	1.035 "	13.0062
136	Co-57	2.556×10^4	2.3837	0.9326 "	11.7194
276	Ba-133	2.850×10^4	2.0446	0.7174 "	9.0151
303	Ba-133	7.316×10^4	4.4920	0.6140 "	7.7158
356	Ba-133	2.455×10^5	12.9771	0.5286 "	6.6426
384	Ba-133	3.517×10^4	1.7567	0.4995 "	6.2769
511	Na-22	6.832×10^5	24.5132	0.3588 "	4.5088
662	Cs-137	3.463×10^5	9.9734	0.2880 "	3.6191
835	Mn-54	2.444×10^5	5.6310	0.2304 "	2.8953
898	Y-88	8.737×10^4	1.9274	0.2206 "	2.7721
1173	Co-60	3.511×10^5	6.0530	0.1724 "	2.1664
1274	Na-22	3.772×10^5	5.6995	0.1511 "	1.8988
1333	Co-60	3.476×10^5	5.5442	0.1595 "	2.0043
1836	Y-88	9.464×10^4	1.0183	0.1076 "	1.3521

* Gamma-ray flux at detector center ($\gamma/\text{cm}^2\text{sec}$) was calculated from $\phi = (\text{gamma-rays per sec from source})/4\pi(100)^2$.

Table 3.2.2 Angular dependence of peak detection efficiency per unit flux of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer

Measurement conditions: 2500V, source-to-detector center 100cm
Date of measurement: May 16, 1975

Gamma-ray energy (keV)	Source	Peak detection efficiency (cps/photon/ cm^2sec)						
		$\theta=0^\circ$	15	30	45	60	75	90
60	Am-241	7.6454	7.1792	6.0419	4.1771	2.2896	0.9385	0.8120
81	Ba-133	11.7194	11.6679	11.2130	10.0380	11.2796	10.4640	8.2197
122	Co-57	13.0062	12.8051	12.3967	12.2560	11.4744	10.3622	9.3846
136	Co-57	11.7194	11.6679	11.2130	10.0380	11.2796	10.4640	8.2197
276	Ba-133	9.0151	8.5225	8.3529	8.0388	8.0990	7.9319	8.3013
303	Ba-133	7.7158	8.1015	7.6730	7.7195	7.6554	7.3300	7.0623
356	Ba-133	6.6426	6.5257	6.3548	6.3913	6.3309	6.1550	6.0507
384	Ba-133	6.2769	5.9112	6.0658	6.4591	6.0143	6.2556	5.5154
511	Na-22	4.5088	4.4736	4.3894	4.4183	4.4372	4.3103	4.1406
662	Cs-137	3.6191	3.5575	3.6317	3.5148	3.4935	3.4042	3.3892
835	Mn-54	2.8953	2.8161	2.8413	2.8551	2.8337	2.7646	2.6980
898	Y-88	2.7721	2.7169	2.6905	2.6427	2.7282	2.6188	2.5799
1173	Co-60	2.1664	2.1664	2.0936	2.1049	2.1476	2.1338	2.0747
1274	Na-22	1.8988	1.9729	1.8900	1.9340	1.9201	1.9277	1.8033
1333	Co-60	2.0043	1.9465	1.9000	1.9327	1.9287	1.9641	1.7895
1836	Y-88	1.3521	1.3848	1.3848	1.3622	1.3823	1.3320	1.3358

Table 3.2.3 Angular dependence of relative peak detection efficiency per unit flux of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer

Measurement conditions: 2500V, source-to-detector center 100 cm
Date of measurement : May 16, 1975

Gamma-ray energy (keV)	Source	Relative peak detection efficiency R(θ)						
		θ=0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
60	Am-241	1.0000	0.9390	0.7903	0.5464	0.2995	0.1228	0.1062
81	Ba-133	1.0000	0.9333	0.8277	0.6546	0.5376	0.4186	0.3245
122	Co-57	1.0000	0.9845	0.9681	0.9423	0.8961	0.8092	0.7215
136	Co-57	1.0000	0.9956	0.9568	0.7450	0.9625	0.8929	0.7014
276	Ba-133	1.0000	0.9456	0.9265	0.8917	0.8984	0.8798	0.9208
303	Ba-133	1.0000	1.0500	0.9945	1.0003	0.9922	0.9500	0.9153
356	Ba-133	1.0000	0.9824	0.9567	0.9622	0.9531	0.9266	0.9109
384	Ba-133	1.0000	0.9417	0.9664	1.0290	0.9582	0.9966	0.8787
511	Na-22	1.0000	1.0014	0.9735	0.9799	0.9841	0.9560	0.9183
662	Cs-137	1.0000	0.9830	1.0035	0.9712	0.9653	0.9406	0.9365
835	Mn-54	1.0000	0.9727	0.9813	0.9861	0.9787	0.9549	0.9319
898	Y-88	1.0000	0.9801	0.9705	0.9533	0.9841	0.9447	0.9306
1173	Co-60	1.0000	1.0000	0.9664	0.9716	0.9913	0.9849	0.9577
1274	Na-22	1.0000	1.0390	0.9954	1.0185	1.0113	1.0152	0.9497
1333	Co-60	1.0000	0.9712	0.9480	0.9643	0.9624	0.9799	0.8928
1836	Y-88	1.0000	1.0242	1.0242	1.0074	1.0223	0.9851	0.9879

Table 3.2.4 Least square fitted peak detection efficiency per unit flux dependence on angle of incident gamma-ray beam of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer

Peak detection efficiency per unit flux, P.D.E. is expressed as

$$\text{P.D.E.}(\theta) = \text{P.D.E.}(0^\circ) (a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4 + a_5\theta^5)$$

where θ (in degree) is the angle of incident gamma-ray beam measured from the detector axis.

Gamma-ray energy (keV)	P.D.E.(0°) cps (photon/cm ² sec)	Coefficients					
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
60	7.64	1.00	-0.198(-2)	-0.513(-4)	-0.680(-5)	0.106(-6)	-0.386(-9)
81	11.96	1.00	-0.276(-2)	-0.148(-3)	-0.106(-5)		
122	13.01	1.00	-0.531(-3)	-0.694(-4)	-0.309(-5)	-0.553(-7)	0.288(-9)
303	7.78	1.00	0.144(-2)	-0.401(-4)	0.143(-6)		
356	6.65	1.00	-0.191(-2)	0.320(-4)	-0.246(-6)		
511	4.53	1.00	-0.156(-2)	0.416(-4)	-0.386(-6)		
662	3.64	1.00	-0.743(-3)				
834	2.89	1.00	-0.579(-3)				
898	2.76	1.00	-0.636(-3)				
1173	2.16	1.00	-0.316(-3)				
1274	1.94	1.00	-0.425(-3)				
1333	1.99	1.00	-0.697(-3)				
1836	1.38	1.00	-0.272(-3)				

Table 3.3.1 Calculated N_f/N_0 (correction factor taking account of angular dependence of detection efficiency) for 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector

Gamma-ray energy (keV)	N_f/N_0							
	$\alpha/\rho=0(\text{cm}^2/\text{g})$ (Uniform)	0.0625(cm^2/g)	0.2060(cm^2/g)	0.3120(cm^2/g)	0.6250(cm^2/g)	6.2500(cm^2/g)	infinite (Plane)	
60	0.40955	0.39318	0.36714	0.35375	0.32797	0.25446	0.22427	
80	0.58067	0.56689	0.54632	0.53619	0.51720	0.46363	0.44032	
122	0.88300	0.87542	0.86414	0.85855	0.84791	0.81620	0.80160	
303	0.97227	0.96825	0.96299	0.96059	0.95631	0.94485	0.93997	
356	0.94690	0.94460	0.94164	0.94030	0.93789	0.93123	0.92825	
511	0.96615	0.96355	0.96012	0.95852	0.95558	0.94710	0.94317	
662	0.95820	0.95567	0.95292	0.95181	0.94996	0.94559	0.94391	
834	0.96738	0.96526	0.96306	0.96218	0.96074	0.95740	0.95612	
898	0.96415	0.96178	0.95934	0.95837	0.95679	0.95313	0.95173	
1173	0.98216	0.98085	0.97959	0.97910	0.97833	0.97656	0.97590	
1274	0.97600	0.97418	0.97246	0.97181	0.97077	0.96842	0.96754	
1333	0.96062	0.95752	0.95467	0.95360	0.95190	0.94811	0.94671	
1836	0.98461	0.98329	0.98215	0.98173	0.98107	0.97962	0.97909	

Table 3.3.2 In-situ gamma-ray detection characteristics of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) spectrometer for naturally occurring radionuclides uniformly distributed in the soil

Nuclide	Gamma-ray energy (keV)	N_0/Φ ($\frac{\text{Cps}}{\text{photon/cm}^2\text{sec}}$)	N_f/N_0	Φ/S ($\frac{\text{photon/cm}^2\text{sec}}{\mu\text{Ci/g}}$)	N_f/S ($\frac{\text{Cps}}{\mu\text{Ci/g}}$)	Φ/I ($\frac{\text{photon/cm}^2\text{sec}}{\mu\text{R/h}}$)	N_f/I ($\frac{\text{Cps}}{\mu\text{R/h}}$)
K-40	1461	1.76	0.976	3.63(-2)	6.24(-2)	2.03(-1)	3.49(-1)
U-238 series							
Ra-226	186	11.7	0.940	4.58(-3)	5.04(-2)	2.52(-3)	2.77(-2)
Pb-214	242	9.30	0.952	1.04(-2)	9.21(-2)	5.71(-3)	5.06(-2)
	295	7.90	0.960	2.91(-2)	2.21(-1)	1.60(-2)	1.21(-1)
Bi-214	352	6.65	0.961	6.01(-2)	3.84(-1)	3.30(-2)	2.11(-1)
	609	3.95	0.969	9.42(-2)	3.61(-1)	5.18(-2)	1.98(-1)
	666	3.65	0.970	3.39(-3)	1.20(-2)	1.86(-3)	6.59(-3)
	768	3.19	0.971	1.17(-2)	3.62(-2)	6.43(-3)	1.99(-2)
	934	2.68	0.972	8.10(-3)	2.11(-2)	4.45(-3)	1.16(-2)
	1120	2.24	0.972	4.21(-2)	9.17(-2)	2.31(-2)	5.03(-2)
	1238	2.05	0.972	1.72(-2)	3.43(-2)	9.45(-3)	1.88(-2)
	1378	1.86	0.974	1.49(-2)	2.70(-2)	8.19(-3)	1.48(-2)
1401-08	1.80	0.975	1.25(-2)	2.19(-2)	6.87(-3)	1.21(-2)	
	1510	1.69	0.976	7.12(-3)	1.17(-2)	3.91(-3)	2.55(-2)
	1730	1.48	0.978	1.02(-2)	1.48(-2)	5.60(-3)	8.11(-3)
	1765	1.46	0.978	5.39(-2)	7.70(-2)	2.96(-2)	4.23(-2)
	1845	1.40	0.979	7.91(-3)	1.08(-2)	4.35(-3)	5.96(-3)
	2205	1.18	0.979	1.95(-2)	2.25(-2)	1.07(-2)	1.24(-2)
	2448	1.06	0.979	6.66(-3)	6.91(-3)	3.66(-3)	3.80(-3)
Th-232 series							
Ac-228	129	13.0	0.894	2.90(-3)	3.37(-2)	1.03(-3)	1.20(-2)
"	210	10.2	0.948	5.80(-3)	5.61(-2)	2.06(-3)	1.99(-2)
Pb-212	239	9.40	0.952	7.25(-2)	6.49(-1)	2.57(-2)	2.30(-1)
Ru-224	241	9.39	0.952		6.48(-1)	2.57(-2)	2.30(-1)
Ac-228	270	8.50	0.958	1.02(-2)	8.31(-2)	3.62(-2)	2.95(-1)
Tl-208	277	8.30	0.958		8.11(-2)	3.62(-2)	2.88(-1)
Ac-228	282	8.15	0.959		7.97(-2)	3.62(-2)	2.83(-1)
Pb-212	301	7.75	0.960	5.53(-3)	4.11(-2)	1.96(-3)	1.46(-2)
Ac-228	338	7.70	0.961	2.18(-2)	1.61(-1)	7.73(-3)	5.72(-2)
Mixed	328-340	6.98	0.961	2.90(-2)	1.95(-1)	1.03(-2)	6.91(-2)
Ac-228	463	5.10	0.963	9.20(-3)	4.52(-2)	3.26(-3)	1.60(-2)
Tl-208	510	4.65	0.965	1.93(-2)	8.66(-2)	6.84(-3)	3.07(-2)
Tl-208	583	4.12	0.968	6.39(-2)	2.55(-1)	2.27(-2)	9.05(-2)
Bi-212 } Ac-228 }	727	3.35	0.970	1.86(-2)	6.04(-2)	6.60(-3)	2.14(-2)
Ac-228	755	3.25	0.971	2.70(-3)	8.52(-3)	9.57(-4)	3.02(-3)
"	772	3.18	0.971	4.10(-3)	1.27(-2)	1.45(-3)	4.48(-3)
"	795	3.10	0.971	1.20(-2)	3.61(-2)	4.25(-3)	1.28(-2)
"	830+835+840	2.90	0.971	9.40(-3)	2.65(-2)	3.33(-3)	9.38(-3)
Tl-208	860	2.88	0.971	1.18(-2)	3.30(-2)	4.18(-3)	1.17(-2)
Ac-228	911	2.71	0.971	7.55(-2)	1.99(-1)	2.68(-2)	7.05(-2)
"	965+969	2.58	0.971	6.13(-2)	1.54(-1)	2.17(-2)	5.44(-2)
"	1588	1.62	0.975	1.23(-2)	1.94(-2)	4.36(-2)	6.89(-3)
Tl-208	2615	1.01	0.979	1.67(-1)	1.65(-1)	5.92(-2)	5.85(-2)

Table 3.3.3 In-situ gamma-ray detection characteristics of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) spectrometer for 662keV gamma-rays from Cs-137 exponentially distributed in the soil

α/ρ (cm ² /g)	0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	infinite
$\frac{N_0}{\Phi}$ ($\frac{\text{cps}}{\text{photon/cm}^2\text{sec}}$)	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64
$\frac{N_f}{N_0}$	0.956	0.953	0.952	0.950	0.946	0.944
$\frac{\Phi}{S}$ ($\frac{\text{photons/cm}^2\text{sec}}{\text{mCi/km}^2}$)	8.73(-4)	1.89(-3)	2.32(-3)	3.08(-3)	5.38(-3)	6.42(-3)
$\frac{N_f}{S}$ ($\frac{\text{cps}}{\text{mCi/km}^2}$)	3.03(-3)	6.55(-3)	8.03(-3)	1.06(-2)	1.85(-2)	2.20(-2)
$\frac{\Phi}{I}$ ($\frac{\text{photons/cm}^2\text{sec}}{\mu\text{R/h}}$)	0.377	0.440	0.465	0.499	0.582	0.606
$\frac{N_f}{I}$ ($\frac{\text{cps}}{\mu\text{R/h}}$)	1.31	1.52	1.61	1.72	2.00	2.08

Table 4.2.1 Quality assurance data of 75cm³ coaxial Ge(Li) detector

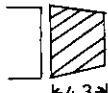
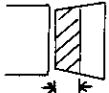

Ortec Custom Series Coaxial Ge(Li) Detector System
 System Model No. 8501-1022, Serial No. 14-1193
 Cryostat Model 85 Common vacuum system
 Detector size 47 mm dia. by 47 mm length
 Drift depth 18.85 mm Diffusion depth 0.6 mm
 Total active volume 75 cm³
 Absorbing layers: Aluminum 0.5 mm, Teflon 1 mm,
 Window to detector distance 5 mm
 Total capacitance 24 pF at 1000V
 Recommended operating bias +2600V
 Measured total resolution 2.05 keV FWHM using
 1333 keV photons at 2 μ sec amplifier time constant
 with Ortec Amplifier System with a noise width of
 1.27 keV
 Measured peak/Compton 39/1
 Measured efficiency 14.1%: Ratio of area under
 photopeak to that of 3"×3" NaI(Tl), measured at
 1333 keV, source-to-detector distance of 25 cm
 Date of shipment December 2, 1974

Table 4.2.2 Operating conditions of lead-shielded 75cm³ coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer

Ge(Li)detector	Ortec Custom series coaxial Ge(Li)detector system System Model No. 8501-1022, Serial No.14-1193	
Amplifier	Ortec Model 452 Spectroscopy Amplifier	
	Input	Negative
	Shaping time-constant	1 μsec
	Coarse gain	20
	Fine gain	11.8
	Base Line Restorer	Hi
	Delay Line	Out
	Output	Unipolar, +10V to ND-50/50 through ~100m RG-62/u cable
Bias voltage supply	Ortec Model 459 +2600V	
Multichannel analyser Nuclear Data ND-50/50		

Table 4.3.1 Peak detection efficiency calibration of Ge(Li) detector system used for gamma-ray measurement of radionuclides in sampled soil

Standard source: 2.16×10^4 pCi of Cs-137 and 2.66×10^4 pCi Co-60 dispersed into 250g sodium phosphate
 Ge(Li)detector : Ortec 8501-1022, serial no.14-1193, 75cm³, 2.05keV, 14.1%.

Source number	0	1	2
Source shape			
Sodium phosphate weight (g)	249.4	178.2	71.2
Radioactivity of Cs-137(pCi)	2.16×10^4	1.54×10^4	0.62×10^4
Radioactivity of Co-60 (pCi)	2.66×10^4	1.90×10^4	0.76×10^4
Peak detection efficiency [$\times 10^{-4}$ cps/(photon/disintegration)·pCi]			
662 keV*	2.136±0.007	2.94	4.16
1173 keV	1.253±0.004	1.63	2.18
1333 keV	1.175±0.004	1.44	1.95

* 0.86 photon/disintegration

Table 4.3.2 Self-calibration of peak detection efficiency of lead shielded 75cm³ coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer

Nuclide	Gamma-ray energy (keV)	Photons ⁺ per dis-integration (γ/dis)	Peak counting rate P(cps)	Back ground counting rate B(cps)	P-B (cps)	Relative peak detection efficiency* (×10 ⁻² cps/γ/dis)	Correction ^x factor (×10 ⁻² /pCi)	Peak detection efficiency (×10 ⁻⁴ cps/(γ/dis)pCi)
Ac-228	338	0.129	0.00877		0.00877	6.7984	×0.637	4.33
"	463	0.047	0.001994		0.001994	4.2426	"	2.70
"	911	0.290	0.007813		0.007813	2.6941	"	1.72
"	965+969	0.230	0.004261		0.004261	1.853	"	1.18
Bi-214	609	0.430	0.007825		0.007825	1.8198	×1.29	2.35
"	1765	0.147	0.001043		0.001043	0.7095	"	0.92
Tl-208	583	0.300	0.011442	0.000188	0.011254	3.751	×0.653	2.45
"	2615	0.360	0.004223	-0.000526	0.003697	1.01027	"	0.66
Pb-214	295	0.179	0.004903		0.004903	2.7391	×1.570	4.30
"	352	0.350	0.009578		0.009578	2.7366	"	4.30

+ From H.L. Beck, J. DeCampo, and C. Gogolak: HASL-258 (1972), Table 4

* (P-B)/(γ/dis)

x Correction Factor was determined to be the values to fit relative peak detection efficiencies on a curve #0 in Fig. 3.3.2.

Table 4.3.3 Detection limit of lead-shielded 75cm³ coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer for 7.2cm dia, 4.3cm thick, 200cm³ soil sample

Ge(Li) detector : Ortec 8501-1022 serial no. 14-1193, 73 cm³, 2.05 keV, 14.1%
Lead shield : 10 cm thick

Nuclide	Gamma-ray energy (keV)	E+A+C* (cts)	$\sqrt{E+A+C}$	$\frac{3\sqrt{E+A+C}}{T}$	γ/dis	Peak detection ⁺ efficiency (×10 ⁻⁴ cps/(γ/dis)pCi)	Detection limit (pCi)
Pb-214	352	/	/	/	0.350	3.4	/
Tl-208	583	234	15.30	1.1475×10 ⁻³	0.300	2.4	15.9
Bi-214	609	178	13.34	1.0005×10 ⁻³	0.430	2.35	9.9
Cs-137	662	145	12.04	0.9631×10 ⁻³	0.632	2.15	7.1
K-40	1461	71	8.43	0.632 ×10 ⁻³	0.107	1.02	57.9
Tl-208	2615	43	6.56	0.4918×10 ⁻³	0.360	0.58	23.6

* Data no. 8517

+ for 7.2 cm dia, 4.3 cm thick, 200 cm³, 250 g sodium phosphate including 21.6 nCi of Cs-137 and 26.6 nCi of Co-60 (see Fig. 4.3.2, curve #0)

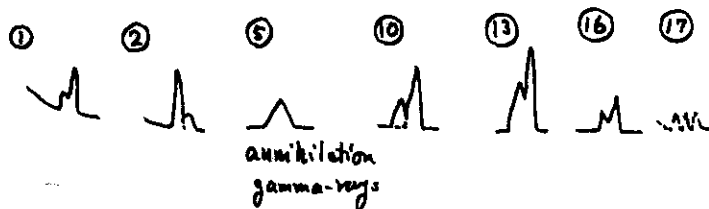
Table 5.2.1 Results of gamma-ray spectrum analysis of in-situ Ge(Li) environmental gamma-ray measurement made from 14:00 to 16:00 on October 26, 1975

*D 19

ENERGY CALIBRATION
 CHA=908 ENA=662
 CHB=2040 ENB=1461

In-situ Ge(Li) 1975.10.26
 Second measurement 14:00 ~ 16:00

EA= 0.705830
 EB= 21.10610
 *D 31



DATA KAISEKI PROGRAM 3

FWHM=6
 ERROR=2 %

COUNT TIME= 7200

NO	ENERGY	CHANNEL	FWHMC	FWHMK	PEAKARE	ERROR	ESDEV	COUNTRAT	CTERROR	CK
1	187.001	235.035	4.829	<u>3.408</u>	596	121	23.69	0.082715	0.019592	75
2	241.112	311.699	5.897	<u>4.163</u>	2271	113	5.625	0.315409	0.017740	55
3	339.625	451.268	2.995	2.114	598	53	9.022	0.083107	0.007498	35
4	353.074	470.323	3.489	2.462	791	59	7.661	0.109809	0.008413	15
5	511.827	695.239	4.587	<u>3.237</u>	778	50	6.667	0.108006	0.007201	15
6	583.886	797.330	4.221	2.979	1019	46	5.060	0.141508	0.007161	75
7	610.226	834.648	3.297	2.327	738	39	5.700	0.102522	0.005843	35
8	662.243	908.344	3.625	2.558	4753	75	2.543	0.660189	0.016790	3
9	911.824	1261.94	4.148	2.927	627	34	5.838	0.087102	0.005085	3
10	967.769	1341.20	8.829	<u>6.232</u>	557	40	7.513	0.077379	0.005814	35
11	1120.00	1556.88	6.427	4.536	175	31	18.00	0.024255	0.004366	25
12	1461.30	2040.43	4.790	3.381	4210	67	2.553	0.584675	0.014926	2
13	1591.38	2224.72	8.560	<u>6.042</u>	141	18	12.52	0.019561	0.002449	2
14	1721.86	2409.58	12.56	<u>8.864</u>	73	18	24.85	0.010160	0.002525	90
15	1764.79	2470.40	5.051	3.565	149	15	10.31	0.020649	0.002129	35
16	2203.45	3091.89	9.259	<u>6.535</u>	54	13	23.58	0.007477	0.001763	35
17	2450.57	3442.00	6.000	4.235	31	8	25.83	0.004348	0.001123	10
18	2615.01	3674.97	6.532	4.611	569	25	4.830	0.079053	0.003818	1
?	11.35	0	07.10							

*

Table 5.2.2 Results of in-situ Ge(Li) gamma-ray measurement performed on the lawn between Machine Shop and Storehouse, JAERI

Nuclide	Gamma-ray energy (keV)	N _f /S ($\frac{\text{cps}}{\text{pCi/g}}$)	N _f /I ($\frac{\text{cps}}{\mu\text{R/h}}$)	In-situ 73 cm ³ Ge(Li) 14:00 ~ 16:00, October 26, 1975		
				(cps)	(pCi/g)	($\mu\text{R/h}$)
K-40	1464	0.0624183	0.348705	0.58468±0.01493	9.367	1.6767
U-238 series						
Ra-226	186	0.0503708	0.027715	(0.0827±0.0196)*	(1.6418)	(2.9839)
Pb-214	242	0.0920774	0.050554	(0.3154±0.0177)*	(3.4254)	(6.2388)
	295	0.2206944	0.121344			
	352	0.3840781	0.210891	0.1098±0.0084	0.2858	0.5206
Bi-214	609	0.3605552	0.198267	0.10252±0.00584	0.2843	0.5171
	666	0.0120023	0.006585			
	768	0.03624063	0.019917			
	934	0.02110018	0.0115921			
	1120	0.09166349	0.0502952	0.02426±0.00437	0.2647	0.4824
	1238	0.03427272	0.0188301			
	1378	0.02699344	0.0148373			
	1401-08	0.02193750	0.0120569			
	1510	0.0117440	0.0254748			
	1730	0.0147639	0.0081057			
	1765	0.0769627	0.0422652	0.02065±0.00213	0.2683	
	1845	0.0108415	0.0059621			0.4886
	2205	0.0225268	0.0123609	0.00748±0.00176	0.3320	
	2448	0.0069113	0.0037981			0.6051
Average Bi-214 Average pCi/g 0.2873 0.5228 $\mu\text{R/h}$						
Th-232 series						
Ac-228	129	0.033704	0.011971			
"	210	0.056084	0.019919			
Pb-212	239	0.648788	0.229844			
Ra-224	241	0.648098	0.229739			
Ac-228	270	0.083059	0.29478			
Tl-208	277	0.081104	0.28784			
Ac-228	282	0.079722	0.28293			
Pb-212	301	0.041143	0.014582			
Ac-228	338	0.161313	0.0571997	0.08311±0.00750	0.5152	1.4530
Mixed	328-340	0.194526	0.0690901			
Ac-228	463	0.045184	0.0160108			
Tl-208	510	0.086604	0.0306928	(0.10801±0.00720)†	(1.2472)	(3.5191)
Tl-208	583	0.254843	0.090531	0.141508±0.007161	0.5552	1.5631
Bi-212, Ac-228	727	0.0604407	0.021447			
Ac-228	755	0.008521	0.0030200			
"	772	0.012660	0.0044773			
"	795	0.0361212	0.012793			
"	830+835+840	0.02647	0.009377			
Tl-208	860	0.032998	0.011689			
Ac-228	911	0.198671	0.070522	0.08710±0.00509	0.4384	1.2351
"	965+969	0.153568	0.054362	0.07738±0.00581	0.5039	1.4234
"	1588	0.019428	0.006887	(0.01956±0.00245)*	(1.0068)	(2.8401)
Tl-208	2615	0.16513	0.058536	0.07905±0.00382	0.4787	1.3505
Average Ac-228 Average pCi/g 0.4858 Tl-208 0.5170 pCi/g 1.4050 $\mu\text{R/h}$						
Total						3.6045 $\mu\text{R/h}$

Table 5.2.3 Radioactivity and exposure rate of Cs-137 gamma-rays measured on the lawn between Machine Shop and Storehouse, JAERI, on October 26, 1975 by 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li)detector

$\alpha = 0.691 \text{ cm}^{-1}$ (Averaged value from Table 5.3.4)
 $\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3$
 $\alpha/\rho = 0.4607 \text{ cm}^2/\text{g}$
 $N_f/S = 0.0095 \text{ cps/mCi/km}^2$ (From Fig. 3.3.3)
 $N_f/I = 1.69 \text{ cps}/\mu\text{R/h}$ (From Fig. 3.3.4)

In-situ Ge(Li) measurement on October 26, 1975 gave a 662 keV counting rate of $0.660 \pm 0.017 \text{ cps}$ (From Table 5.2.1).

Then, one obtains

radioactivity	69.47 mCi/km ²
exposure rate at 1 m above the ground	0.391 $\mu\text{R/h}$.

Table 5.2.4 Concentrations of activities in the soil obtained by in-situ analysis and sampling method

In-situ measurement point: Lawn between Machin Shop and Storehouse, JAERI

Nuclide	In-situ Ge(Li) 14:00 - 16:00 October 26, 1975	Soil sampling method average of 5 sampled points	
		Surface	30 cm depth
Bi-214	0.29 pCi/g	0.154 pCi/g	0.245 pCi/g
Tl-208	0.48 pCi/g	0.421 pCi/g ⁺	0.459 pCi/g
K-40	9.37 pCi/g	3.85 pCi/g	14.8 pCi/g
Cs-137	69.47 mCi/km ² *	77.7 mCi/km ²	

⁺ Average of two points
^{*} $\alpha/\rho = 0.461 \text{ cm}^2/\text{g}$

Table 5.2.5 Total exposure rates obtained by in-situ Ge(Li) spectrometry and 3" x 3" NaI(Tl) spectrometry on the lawn between Machine Shop and Storehouse, JAERI

Nuclide	In-situ Ge(Li) 14:00 ~ 14:00 October 26, 1975	In-situ 3"x3" NaI(Tl) 15:05 - 17:05 September 16, 1975
U-238+daughters	0.523 ($\mu\text{R/h}$)	S. Moriuchi's method of dose evaluation by spectrum-dose conversion operator (JAERI-1209(1971))
Th-232+daughters	1.405 ($\mu\text{R/h}$)	
K-40	1.677 ($\mu\text{R/h}$)	
Cs-137	0.391 ($\mu\text{R/h}$)*	
Total	3.996 ($\mu\text{R/h}$)	4.641 ($\mu\text{R/h}$)

* $\alpha/\rho = 0.461 \text{ cm}^2/\text{g}$

Table 5.3.1 Sampled soils

Sampled point	C			E			W			S			N					
	Sample No.	Thick-ness (mm)	Weight* (g)	Volume (cm ³)	Density (g/cm ³)	Thick-ness (mm)	Weight* (g)	Volume (cm ³)	Density (g/cm ³)	Thick-ness (mm)	Weight* (g)	Volume (cm ³)	Density (g/cm ³)	Thick-ness (mm)	Weight* (g)	Volume (cm ³)	Density (g/cm ³)	
			April 12, 1975			May 2, 1975			May 2, 1975			April 26, 1975						
8	43	215.6	200	1.08	21	83.2	97.7 ⁺	0.85	21	119.7	97.7 ⁺	1.23	23	99.9	107.2 ⁺	0.93		
7	43	214.3	200	1.07	31	167.0	144.2 ⁺	1.16	28	161.8	130.2 ⁺	1.24	30	192.5	139.5 ⁺	1.38		
6	43	273.2	200	1.37	43	266.4	200	1.33	43	272.6	200	1.36	43	137.1	200	0.69		
5	43	300.8	200	1.50	43	278.8	200	1.39	35	225.0	162.8 ⁺	1.38	42	255.4	200	1.08		
4	43	293.3	200	1.47	43	305.9	200	1.53	43	303.2	200	1.52	35	237.9	162.8 ⁺	1.46		
3	43	293.2	200	1.47	43	311.9	200	1.56	43	298.9	200	1.49	43	311.6	200	1.56		
2	43	301.9	200	1.51	43	318.2	200	1.59	43	298.5	200	1.49	43	285.3	200	1.43		
1	43	301.9	200	1.51	43	315.3	200	1.58	43	287.8	200	1.44	43	288.8	200	1.44		

* Weighed on May 7, 1975

+ Volume was calculated using an equation 200A/43, where A is the sample thickness in mm.

Table 5.3.2 Gamma-ray peak counting rates of sampled soil measured by lead-shielded 75 cm³ Ge(Li) gamma-ray spectrometer

Isotope	E _γ (keV)	Gamma-ray yield γ/dis	Detection efficiency (2) cps/(γ/dis pCi)	Detection efficiency cps/pCi	B.C(cps) Data no. #8517 counting time 40000 sec	Sample weight #8533g #8533g 40000	W2 298.5 #8534 40000	W3 298.9 #8533 40000	W4 303.2 #8532 40000	W6 272.6 #8530 40000	N1 298.8 #8520 50000	N2 285.3 #8527 40000	N3 311.6 #8526 40000
Pb-212	238.6	0.47	2.68x10 ⁻⁴	0.433 "	0.520cps	0.502	0.472	0.596	0.549	0.301	0.301	0.642	0.619
Pb-214	241.9	0.076	5.70	0.433 "	0.00075	3.10	2.92	3.69	3.40	1.86	1.86	3.97	3.83
Ra-224	241.0	0.037	0.211 "	0.211 "	±0.000642	6.61	6.00	7.56	6.97	3.83	3.83	8.15	7.86
Pb-214	295.2	0.19	4.65 "	0.884 "		0.193	0.155					0.170	0.145
Ac-228	338	0.15	4.10 "	0.615 "		0.495	0.250	0.343	0.465	0.261	0.261	0.378	0.380
Pb-214	352	0.36	3.95 "	1.42 "		0.234	0.215	0.313	0.217	0.202	0.202		0.263
Ac-228	463	0.036	3.06 "	0.110 "		0.630				0.602	0.602		0.540
Anhilation	511		2.79 "		0.0066 ±0.00069	[0.000111 cps/gr]	0.0000323	0.0000173	0.0000342			0.0000378	0.0000363
Tl-208	583.2	0.31	2.45 "	0.760 "	0.000188 ±0.000244	0.514	0.543	0.564	0.498	0.402	0.402	0.466	0.443
Bi-214	609.3	0.47	2.35 "	1.10 "		0.247	0.271	0.240	0.176	0.192	0.192	0.232	0.206
Cs-137	661.6	0.86	2.16 "	1.86 "									
Zr-95	724.2	0.43	1.99 "	0.856 "									
Bi-212	727.2	0.072	1.98 "	0.143 "		0.401	0.682	0.757	0.772				0.421
Zr-95	756.7	0.546	1.92 "	1.05 "									
Nb-95	765.8	0.99	1.87 "	1.87 "									
Pb-214	768.4	0.0008	1.89 "	0.00151 "									
Bi-214	768.7	0.05	0.0945 "	0.0945 "									
Bi-212	860.1	0.047	1.70 "	0.0799 "					1.04				
Ac-228	908	0.25	1.61 "	0.403 "		0.674	0.532	0.559	0.543	0.380	0.380	0.329	0.439
Ac-228	966	0.20	1.51 "	0.302 "		0.490	0.685	0.355	0.291			0.445	0.269
Bi-214	1120.4	0.17	1.32 "	0.224 "				0.190					
K-40	1460	0.11	1.02 "	0.112 "	0.000945 ±0.000255	15.8	15.0	14.9	8.02	13.2	13.2	14.8	13.3
Bi-214	1764	0.17	0.86 "	0.146 "		0.248	0.317	0.318		0.168	0.168		
Tl-208	2614.5	0.36	0.59 "	0.183 "	0.000526 ±0.000184	0.605	0.459	0.557	0.492	0.455	0.455	0.478	0.425

(Table 5.3.2 Continued)

N5	N6	E1	E2	E3	E4	E5	E6	B.G(cps)	S1	S2	S3	S4
255.4 #8524 40000	215.2 #8523 50000	315.3 #8543 31309	318.2 #8542 40000	311.9 #8541 40000	305.9 #8540 40000	278.8 #8539 40000	266.4 #8538 40000	#8510	288.8 #8511 30000	296.5 #8512 40000	303.9 #8513 40000	269.5 #8514 40000
0.543 3.36 6.90	0.588 3.64 7.46	0.493 3.05 6.27	0.436 2.70 5.54	0.422 2.61 5.36	0.379 2.35 4.81	0.399 2.47 5.07	0.513 3.17 6.51		0.611 3.78 7.77	0.635 3.93 8.06	0.687 4.25 8.73	0.353 2.19 4.49
	0.0519		0.0948	0.221								
	0.510	0.293	0.302	0.479	0.392	0.376	0.368		0.366	0.413		
	0.193	0.212	0.211	0.206	0.198	0.275	0.211				0.219	0.0970
0.0000354	0.0000424	0.0000126	0.0000122	0.0000134	0.0000159	0.0000116	0.0000149	0.0066 ±0.00075	0.0000159	0.0000114	0.0000172	0.00000428
0.653	0.534	0.462	0.540	0.509	0.467	0.483	0.576	0.001849 ±0.00045	0.476	0.450	0.542	0.393
0.200	0.202		0.209	0.221	0.215	0.241	0.197		0.281	0.227	0.225	0.156
				0.0897	0.0641	0.0502	0.0545		0.0474	0.0345		0.0350
0.367				0.458	0.600	0.603						
												0.756
0.757	0.672	0.429	0.503	0.515	0.491	0.547	0.561		0.663	0.601	0.585	0.405
0.743	0.656	0.395	0.348	0.321	0.194	0.292	0.379		0.637	0.487	0.461	0.264
9.16	7.30	14.3	15.1	14.4	13.8	15.2	7.78	0.001093 ±0.00260	14.7	13.4	14.9	8.54
										0.218	0.192	0.211
0.632	0.463	0.487	0.541	0.456	0.475	0.522	0.549		0.736	0.577	0.605	0.636

(Table 5.3.2 Continued)

Detection efficiency (3) cps/(Y/dls pCi)	W7 161.8 #8529 40000	E7 167.0 #8537 40000	N7 192.5 #8522 50000	Detection efficiency (4) cps/(Y/dls pCi)	cps/pCi	W5 225.0 #8531 40000	N4 237.9 #8525 40000
7.15×10^{-4}	0.405 0.543 " 2.51 0.265 " 5.14	0.395 2.45 5.01	0.539 3.33 6.83	6.35×10^{-4}	2.98×10^{-4} 0.483 " 0.235 "	0.439 2.71 5.57	0.557 3.44 7.07
5.80 "	1.10 "	0.212		5.25 "	1.00 "		
5.10 "	0.765 "	0.157	0.207	4.55 "	0.683 "	0.326	
4.91 "	1.77 "		0.219	4.41 "	1.59 "	0.240	0.187
3.71 "	0.134 "			3.38 "	0.122 "		
	0.0000136	0.0000072	0.0000125			0.0000469	0.00000432
2.98 "	0.923 "	0.396	0.470	2.71 "	0.840 "	0.553	0.469
2.85 "	1.34 "	0.184	0.173	2.60 "	1.22 "	0.231	0.201
2.60 "	2.24 "	0.357	0.416	2.38 "	2.05 "	0.0380	0.145
2.39 "	1.03 "			2.19 "	0.942 "		
2.38 "	0.171 "			2.18 "	0.157 "		0.629
2.30 "	1.26 "			2.11 "	1.15 "		
2.27 "	2.25 " 0.00182 " 0.114 "			2.09 "	2.07 " 0.00167 " 0.105 "		
2.01 "	0.0945 "			1.88 "	0.0884 "		
1.91 "	0.478 "	0.487	0.524	1.78 "	0.445 "	0.500	0.495
1.80 "	0.360 "	0.366	0.469	1.68 "	0.336 "	0.271	0.453
1.59 "	0.270 "			1.46 "	0.248 "		
1.23 "	0.135 "	4.48	5.95	1.14 "	0.125 "	14.6	11.2
1.02 "	0.173 "			0.94 "	0.160 "		0.187
0.67 "	0.208 "	0.595	0.472	0.64 "	0.198 "	0.482	0.430

Table 5.3.3 Radioactivity concentrations (pCi/g) of Tl-208, Bi-214, Cs-137, K-40 in sampled soil

Nuclide	Tl-208	Bi-214	Cs-137	K-40
Gamma-ray energy(keV)	583	609	662	1461
Sample No.	Radioactivity (pCi/g)	Radioactivity (pCi/g)	Radioactivity (pCi/g)	Radioactivity (pCi/g)
C7	0.418 ± 0.046	0.140 ± 0.027	0.949 ± 0.032	5.60 ± 0.29
C6	0.560 ± 0.050	0.263 ± 0.031	0.0586±0.0138	8.76 ± 0.36
C5	0.580 ± 0.045	0.274 ± 0.028	0.0539±0.0129	15.3 ± 0.41
C4	0.494 ± 0.041	0.262 ± 0.026	0.0492±0.0117	15.0 ± 0.39
C3	0.383 ± 0.038	0.202 ± 0.024	0.0855±0.0131	13.8 ± 0.39
C2	0.465 ± 0.038	0.248 ± 0.026		15.6 ± 0.40
C1	0.439 ± 0.040	0.258 ± 0.025		16.0 ± 0.41
E8			2.69 ± 0.06	2.84 ± 0.24
E7	0.396 ± 0.058	0.184 ± 0.029	0.357 ± 0.022	5.95 ± 0.35
E6	0.576 ± 0.043	0.197 ± 0.023	0.0545±0.0133	7.78 ± 0.34
E5	0.483 ± 0.042	0.241 ± 0.027	0.0502±0.0120	15.2 ± 0.41
E4	0.467 ± 0.039	0.215 ± 0.026	0.0641±0.0113	13.8 ± 0.38
E3	0.509 ± 0.040	0.221 ± 0.024	0.0897±0.0125	14.4 ± 0.37
E2	0.540 ± 0.042	0.209 ± 0.024		15.1 ± 0.38
E1	0.462 ± 0.043			14.3 ± 0.41
W8	0.443 ± 0.055	0.115 ± 0.038	1.52 ± 0.045	2.98 ± 0.27
W7	0.544 ± 0.050	0.158 ± 0.028	0.178 ± 0.020	7.33 ± 0.35
W6	0.498 ± 0.042	0.176 ± 0.024	0.0198±0.0095	8.02 ± 0.31
W5	0.553 ± 0.047	0.231 ± 0.029	0.0380±0.0122	14.6 ± 0.42
W4	0.564 ± 0.043	0.240 ± 0.026	0.117 ± 0.013	14.9 ± 0.38
W3	0.553 ± 0.045	0.267 ± 0.027	0.256 ± 0.017	15.1 ± 0.40
W2	0.543 ± 0.043	0.271 ± 0.026		15.0 ± 0.39
W1	0.514 ± 0.043	0.247 ± 0.025		15.8 ± 0.41
S6		0.231 ± 0.047	2.27 ± 0.062	5.00 ± 0.35
S5	0.401 ± 0.035	0.097 ± 0.022	0.174 ± 0.016	6.18 ± 0.30
S4	0.393 ± 0.035	0.156 ± 0.024	0.0350±0.0096	8.54 ± 0.34
S3	0.542 ± 0.039	0.225 ± 0.026		14.9 ± 0.39
S2	0.450 ± 0.035	0.227 ± 0.025	0.0345±0.0101	13.4 ± 0.38
S1	0.476 ± 0.042	0.281 ± 0.036	0.0474±0.0142	14.7 ± 0.46
N8		0.129 ± 0.031	2.33 ± 0.056	2.84 ± 0.23
N7	0.470 ± 0.039	0.173 ± 0.023	0.416 ± 0.020	5.95 ± 0.26
N6	0.534 ± 0.043	0.202 ± 0.025		7.30 ± 0.29
N5	0.653 ± 0.049	0.200 ± 0.027		9.16 ± 0.35
N4	0.469 ± 0.044	0.201 ± 0.028	0.145 ± 0.015	11.2 ± 0.37
N3	0.443 ± 0.038	0.206 ± 0.025	0.0244±0.0083	13.3 ± 0.37
N2	0.466 ± 0.039	0.232 ± 0.026	0.0230±0.0102	14.8 ± 0.40
N1	0.402 ± 0.032	0.192 ± 0.019		13.2 ± 0.35

Table 5.3.4 Cs-137 radioactivities in soil samples

Sampling point	C	E	W	S	N	Average
Sample No.	Radioactivity (pCi)	Radioactivity (pCi)	Radioactivity (pCi)	Radioactivity (pCi)	Radioactivity (pCi)	Radioactivity (pCi)
8		223.8	181.9		232.8	
7	204.6	59.6	28.8		80.1	
6	12.6	14.5	5.4	311.2	<D.L. ⁺	
5	14.7	14.0	8.6	42.4	<D.L. ⁺	
4	14.8	19.6	35.5	9.4	34.5	
3	25.1	28.0	76.5	<D.L. ⁺	7.6	
2	<D.L. ⁺	<D.L. ⁺	<D.L. ⁺	10.2	6.6	
1	<D.L. ⁺	<D.L. ⁺	<D.L. ⁺	13.7	<D.L.	
Sum of radioactivities in a column of soil(pCi)	271.8	359.5	336.7	386.9	361.6	343.3
Total radioactivities per km ² (mCi/km ²) ^x	61.5	81.4	76.2	87.6	81.8	77.7
α (cm ⁻¹) [*]	0.697	0.742	0.767	0.575	0.676	0.691
S ₀ (pCi/g) ⁺⁺	3.7	6.5	4.2	8.8	4.7	
S _A =S ₀ ρ/α(mCi/km ²) ^{**}	79.6	131.0	82.0	230.0	104.3	125.4

+ D.L.: detection limit = 7.1 pCi (see Table 4.3.3).

x Sum of radioactivities in a column of soil (pCi) divided by the column cross-section $44.18\text{cm}^2 (= \pi(7.5/2)^2)$. Unit was changed from pCi/cm² to mCi/km².

* The reciprocal of the relaxation length of the assumed exponentially-distributed source activity with depth.

++ From Fig. 5.3.3 ~ Fig. 5.3.7.

** ρ=1.5 (g/cm³). Unit was changed from pCi/cm² to mCi/km².



Photo 1.1 A van-type vehicle housed a complete spectrometric system for environmental radiation monitoring including Ge(Li)detector, NaI(Tl)detector, high-pressure ion chamber, FIDLER, multichannel analyser, etc. (P.L.Phelps, et al (Lawrence Livermore Laboratory) ; IEEE Trans., NS-21(1), 543 (1974))

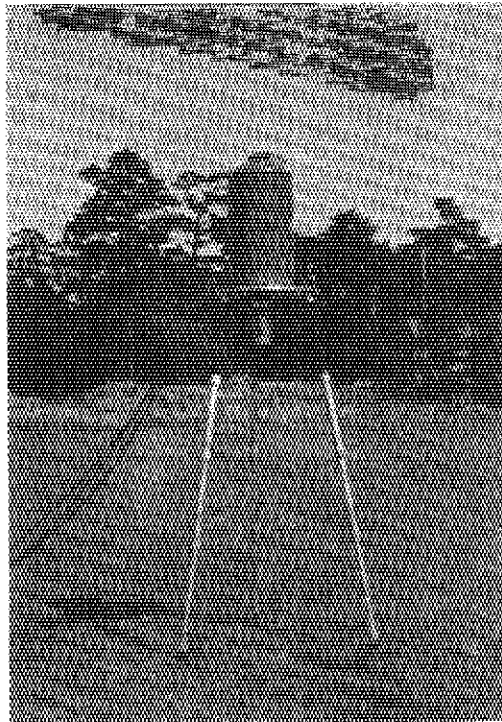


Photo 3.1.1 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector for in-situ environmental gamma-ray spectrometry

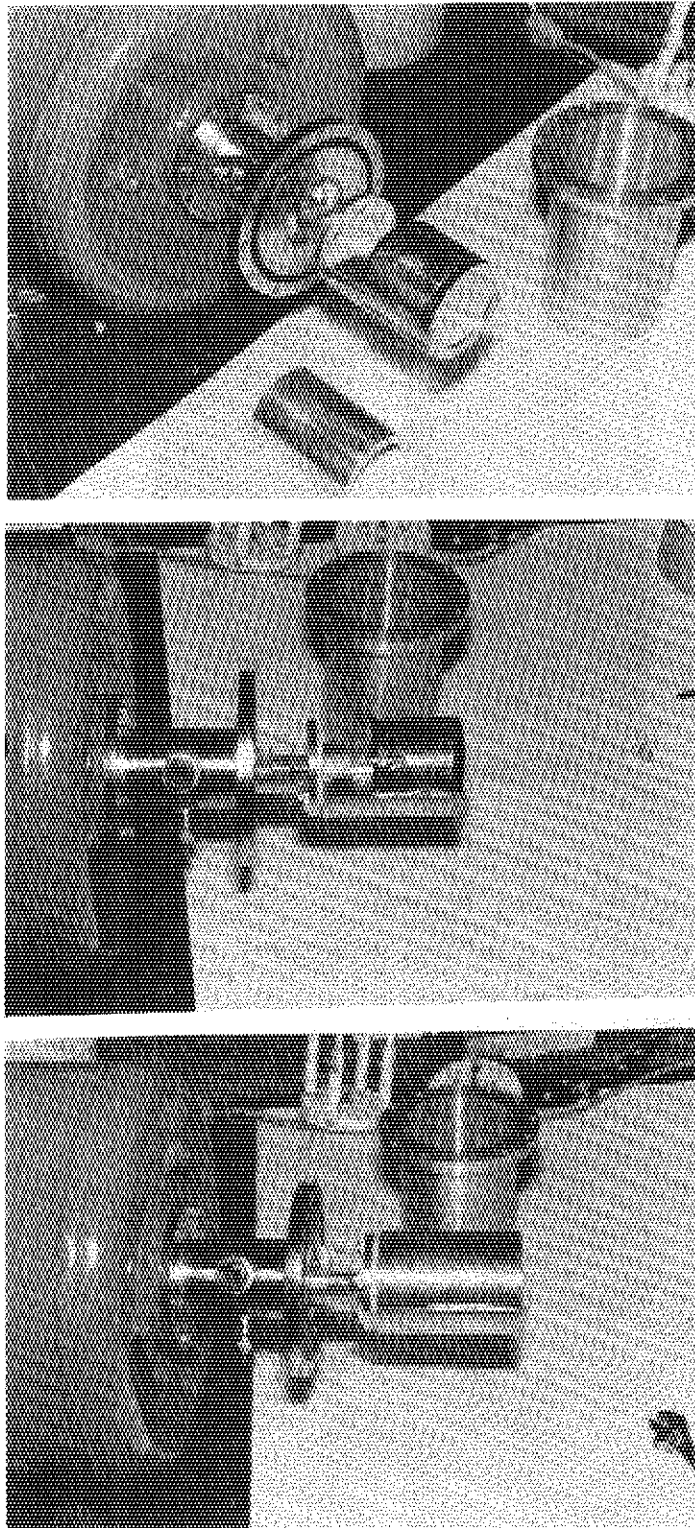


Photo 3.1.2 Ge(Li) detector mounting procedure

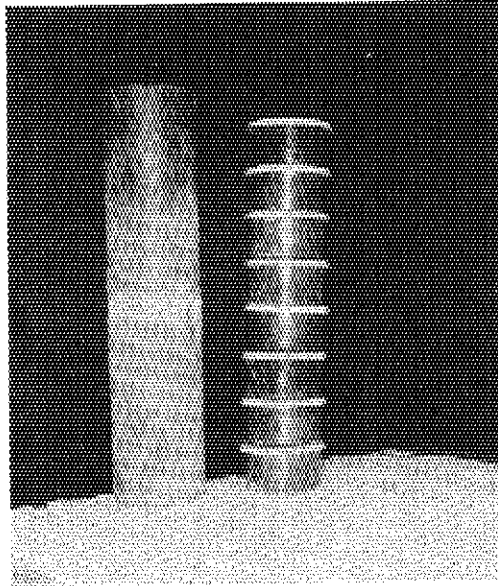


Photo 4.1.1 Iron pipe(outer diameter 9.0cm, inner diameter 7.5cm, length 39cm; very simple core sampler) and a stack of Tupperwares including sampled soil

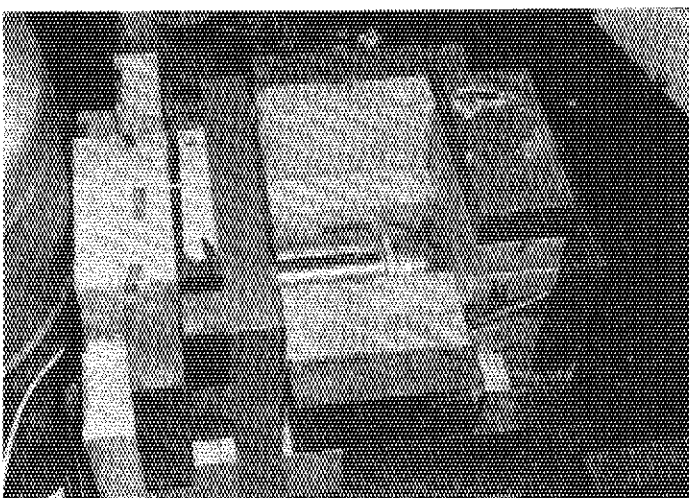
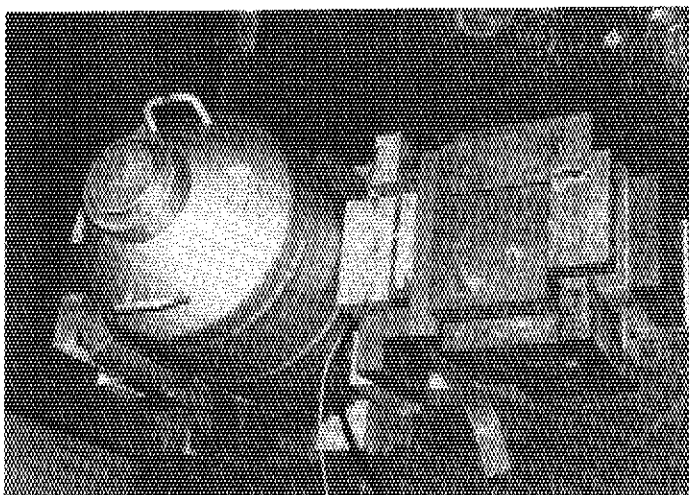


Photo 4.2.1 Lead-shielded 75cm³ coaxial Ge(Li)detector for gamma-ray spectrometry of sampled soil

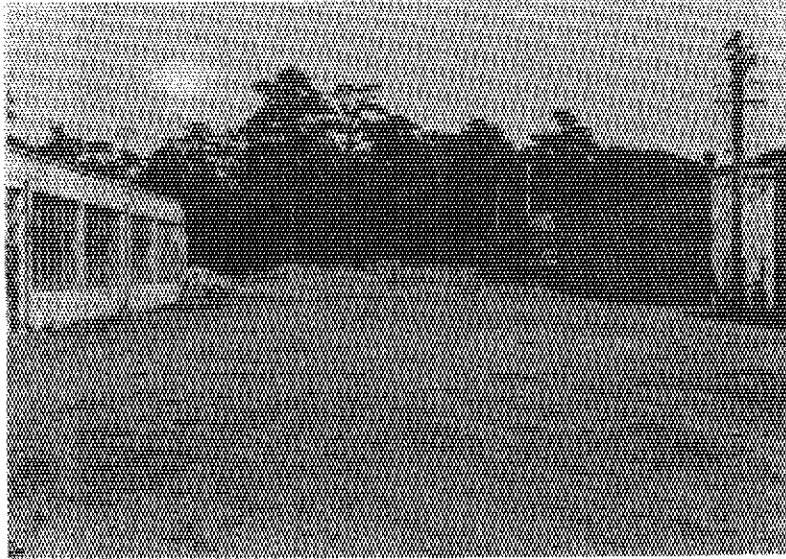


Photo 5.1.1 Location of in-situ Ge(Li) spectrometry on the lawn between
Machine Shop and Storehouse of JAERI, Tokai Research Establish-
ment

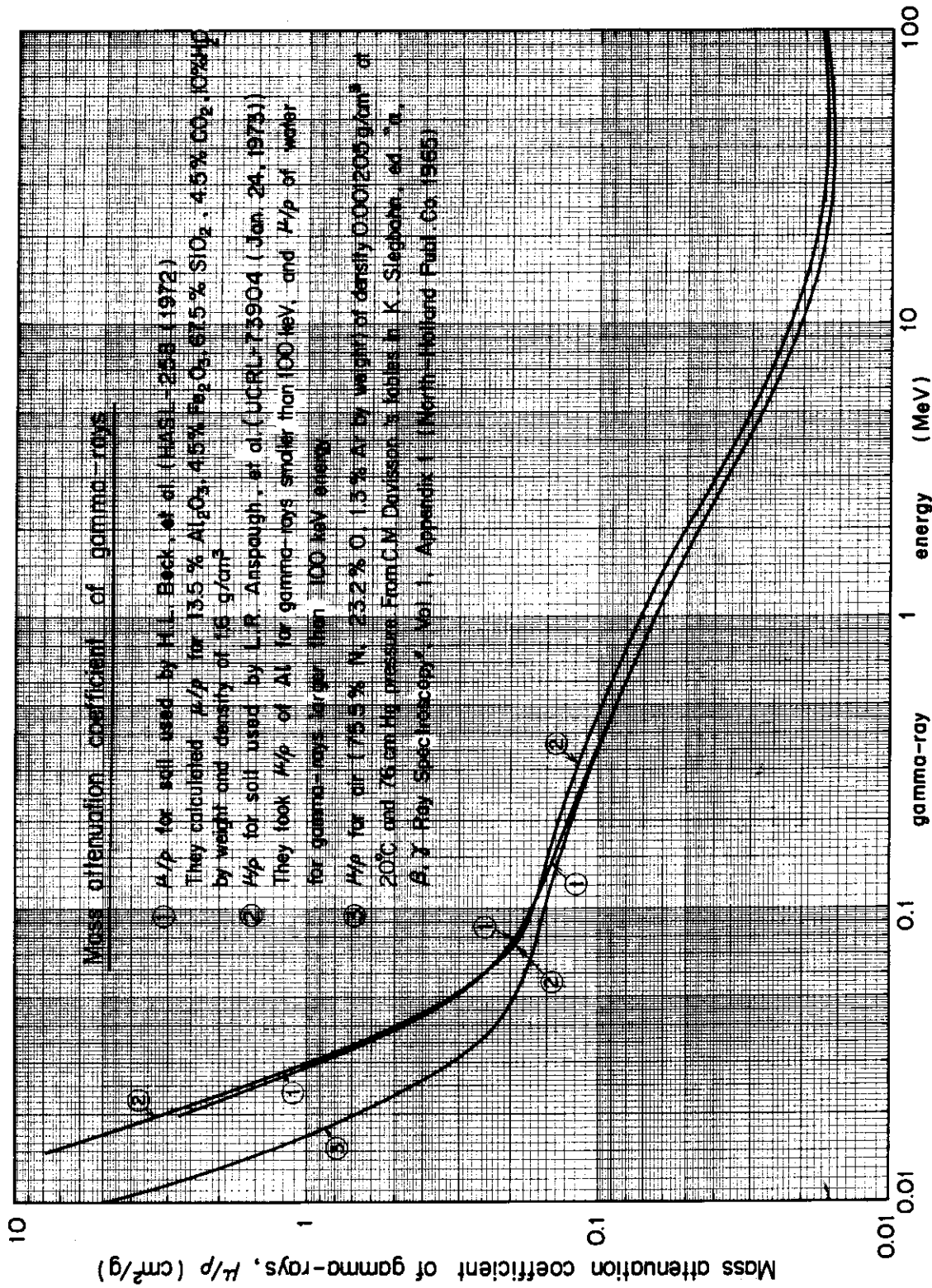


Fig.2.1 Mass attenuation coefficient of gamma-rays for soil and air

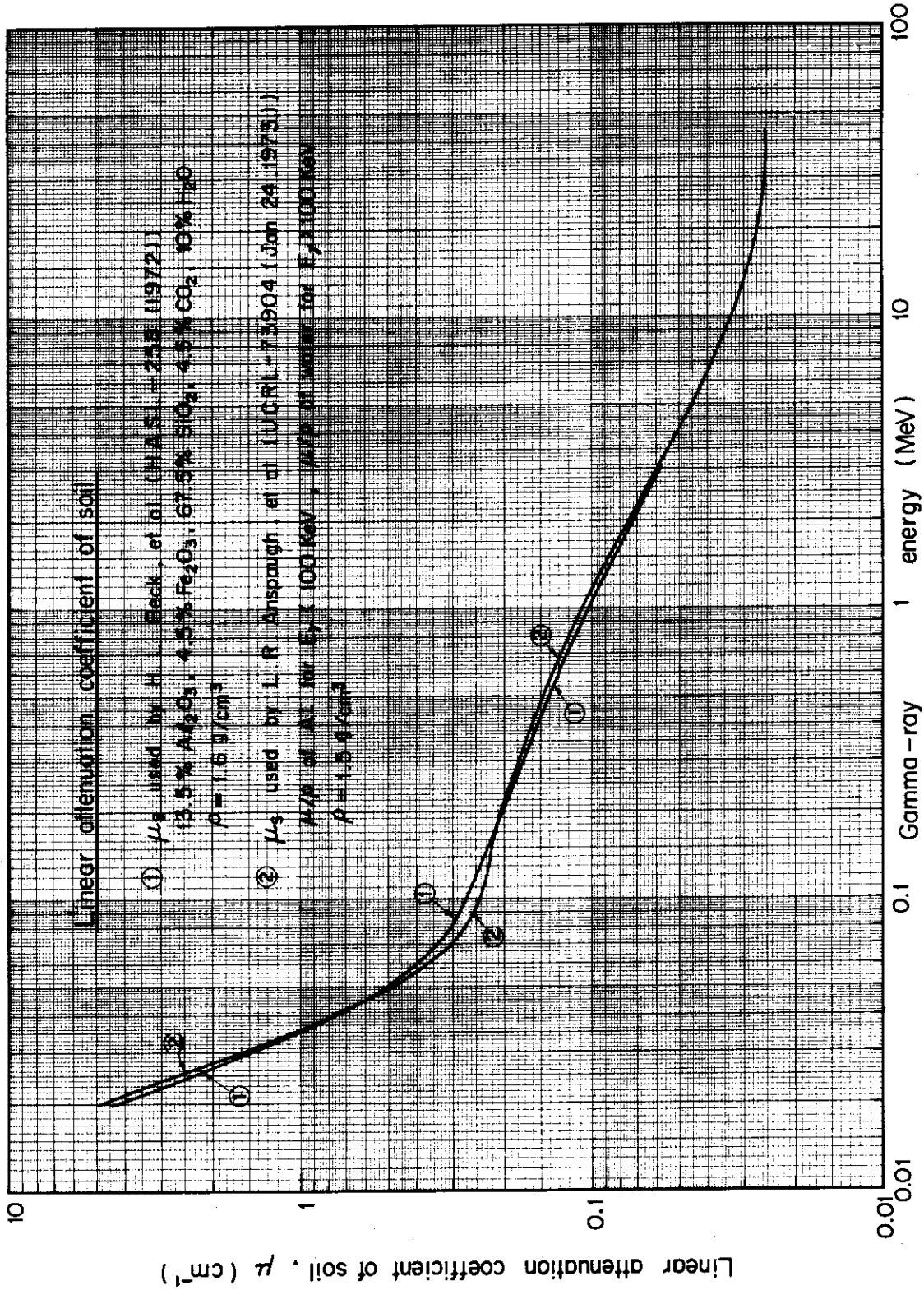


Fig.2.2 Linear attenuation coefficient of gamma-rays for soil

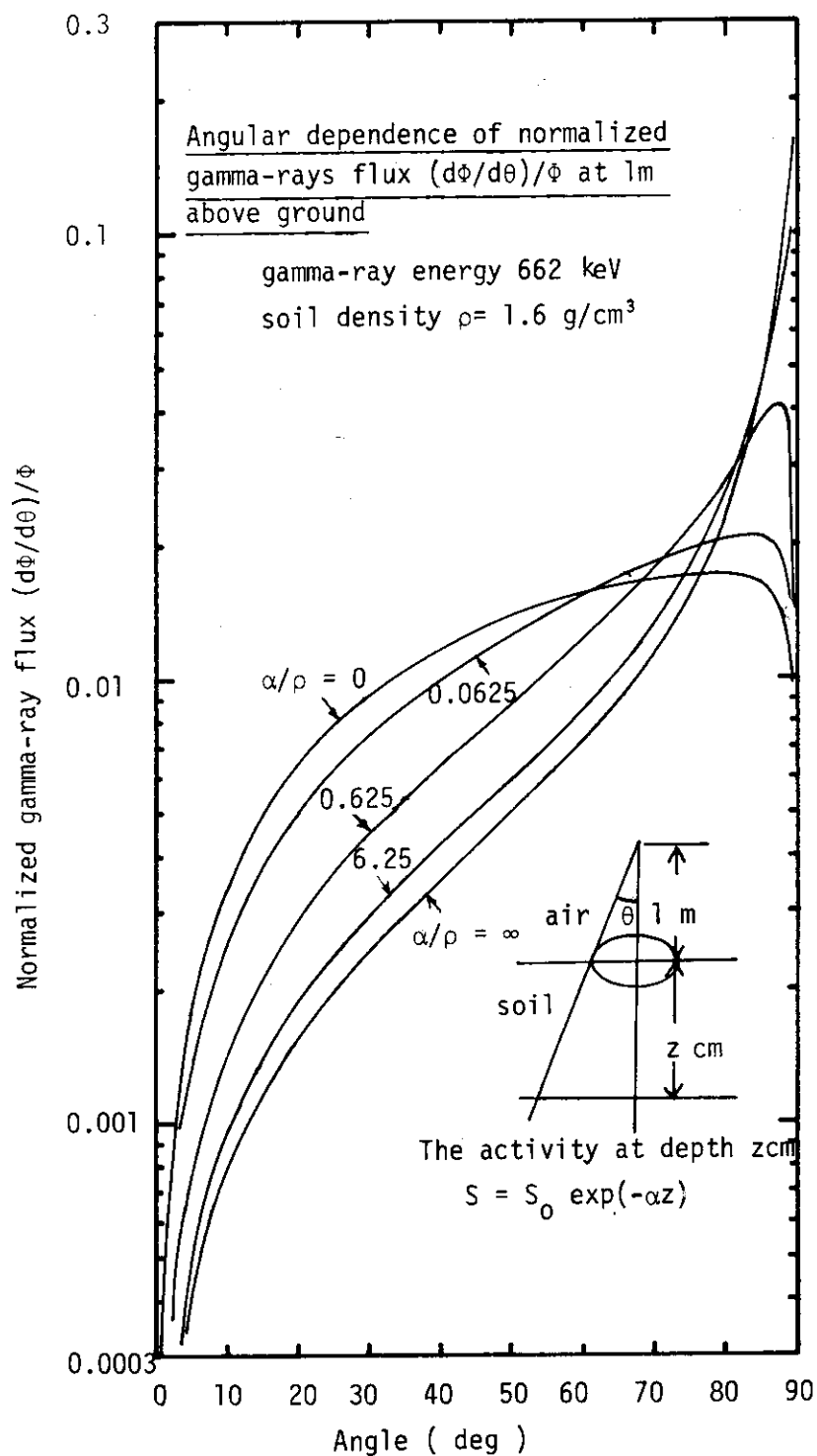


Fig.2.3 Angular dependence of normalized flux $(d\Phi/d\theta)/\Phi$ of 662keV gamma-rays at 1 meter above ground

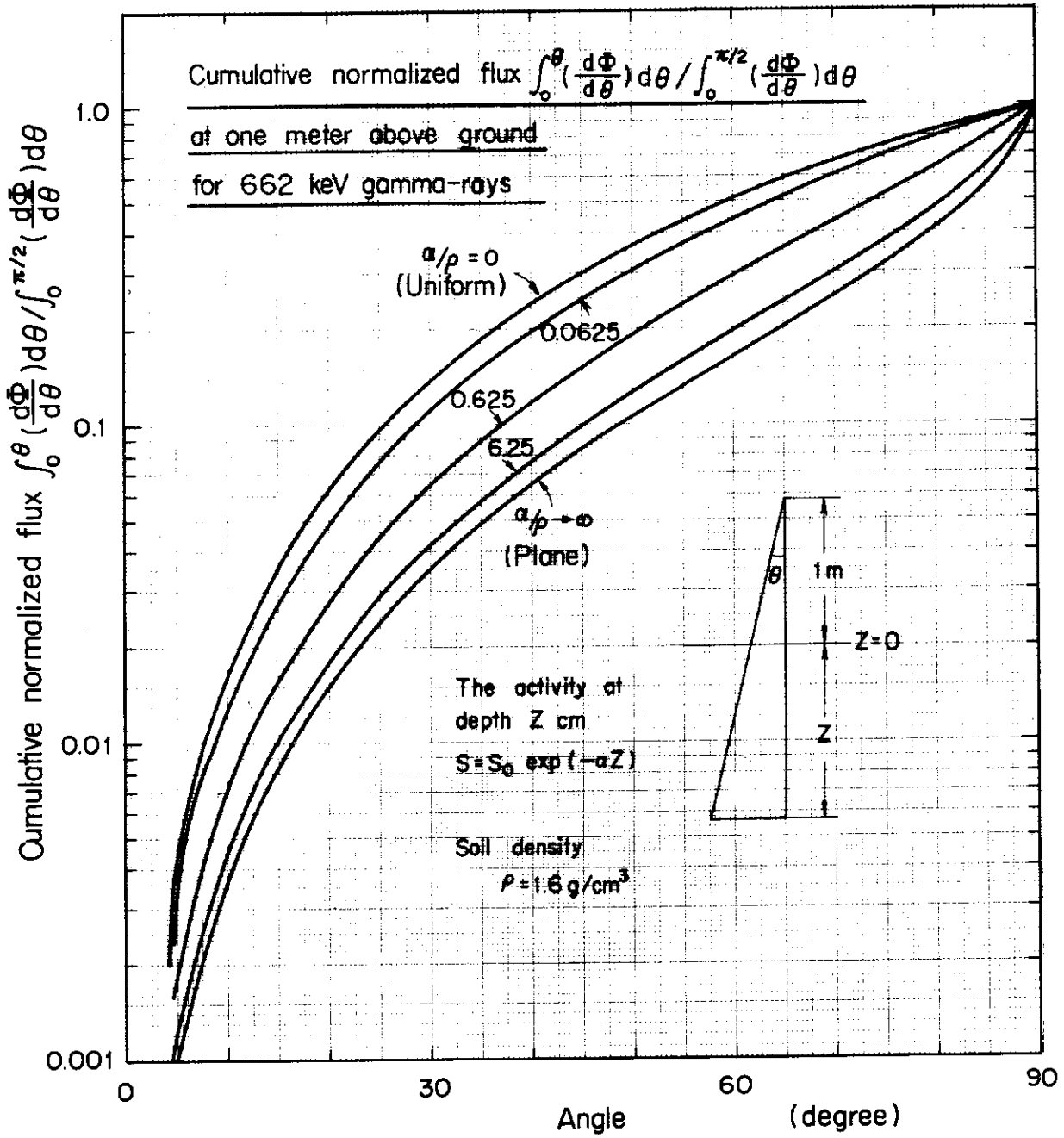


Fig.2.4 Cumulative normalized flux $\int_0^\theta (\frac{d\Phi}{d\theta}) d\theta / \int_0^{\pi/2} (\frac{d\Phi}{d\theta}) d\theta$ of 662keV gamma-rays at one meter above ground

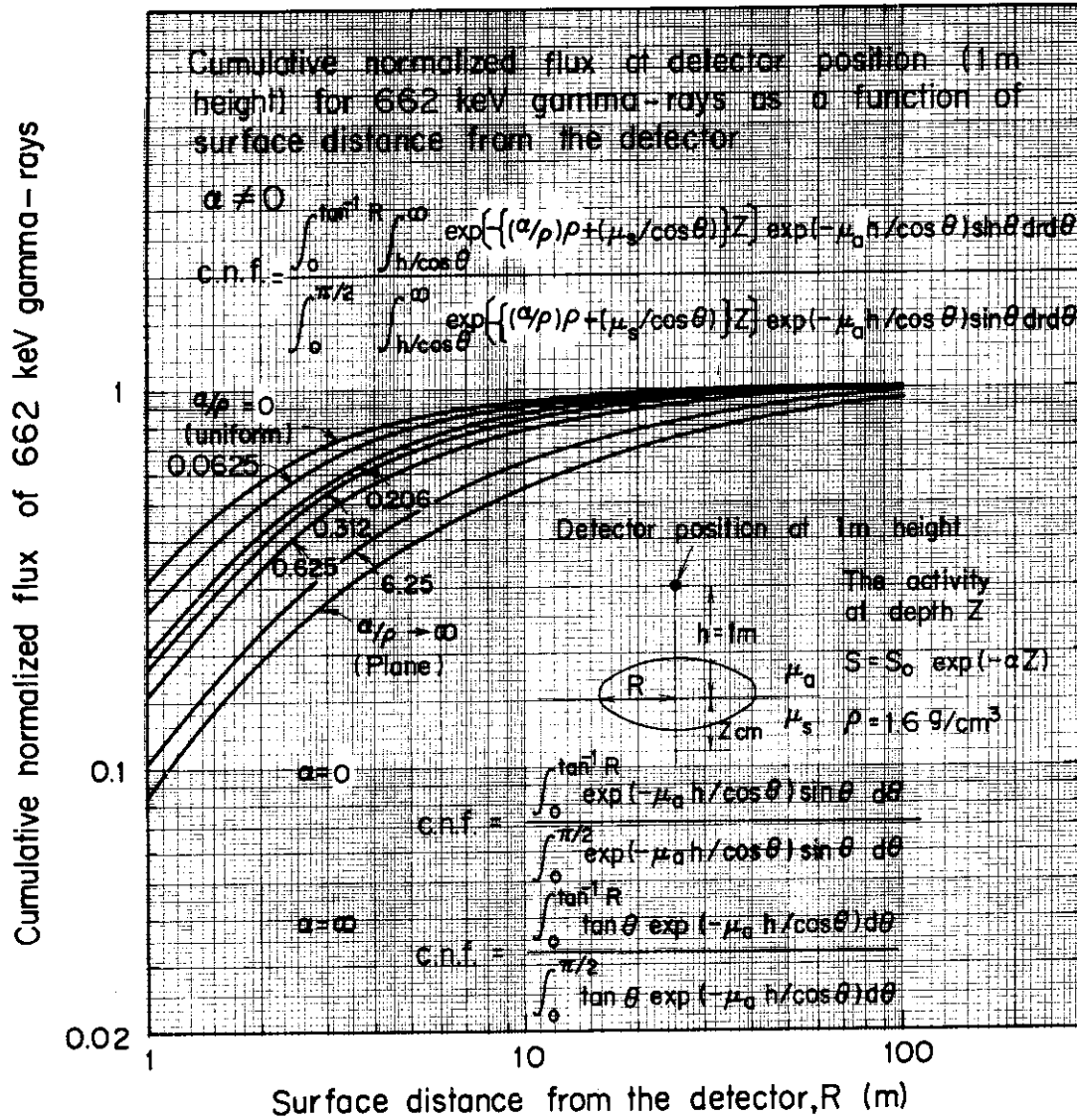


Fig.2.5 Cumulative normalized flux at 1 meter above ground for 662keV gamma-rays as a function of surface distance from the detector

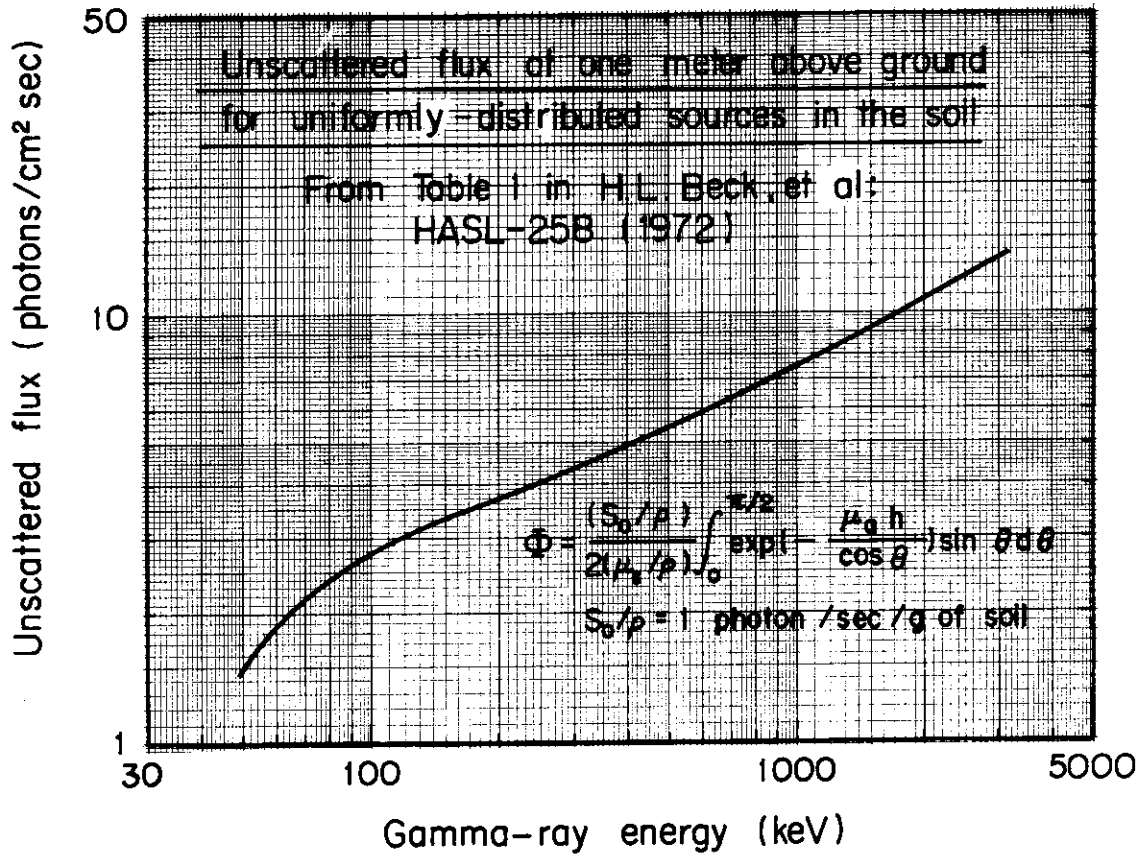


Fig.2.6 Unscattered flux at one meter above ground for uniformly-distributed sources in the soil

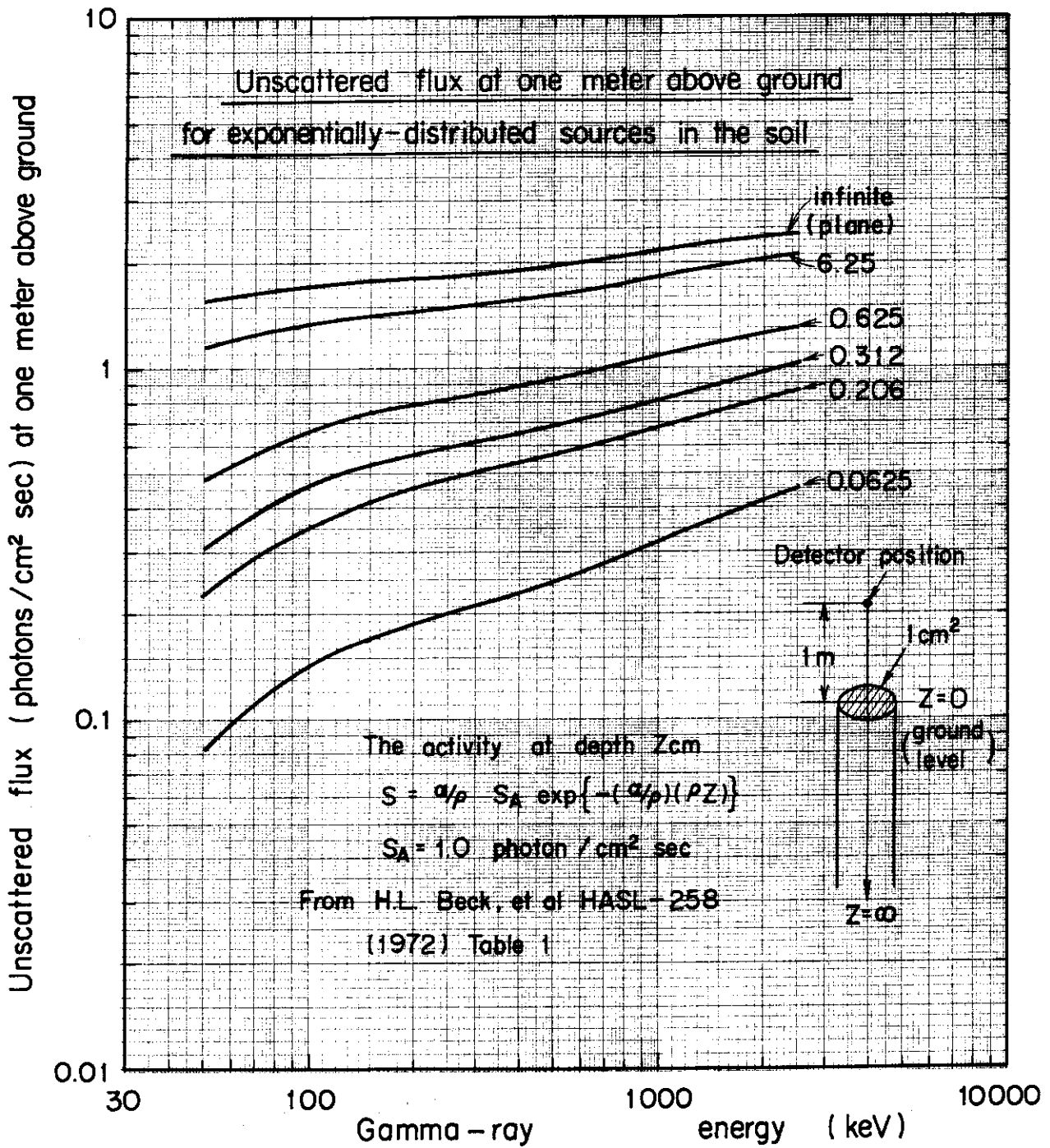


Fig.2.7 Unscattered flux at one meter above ground for exponentially-distributed sources in the soil

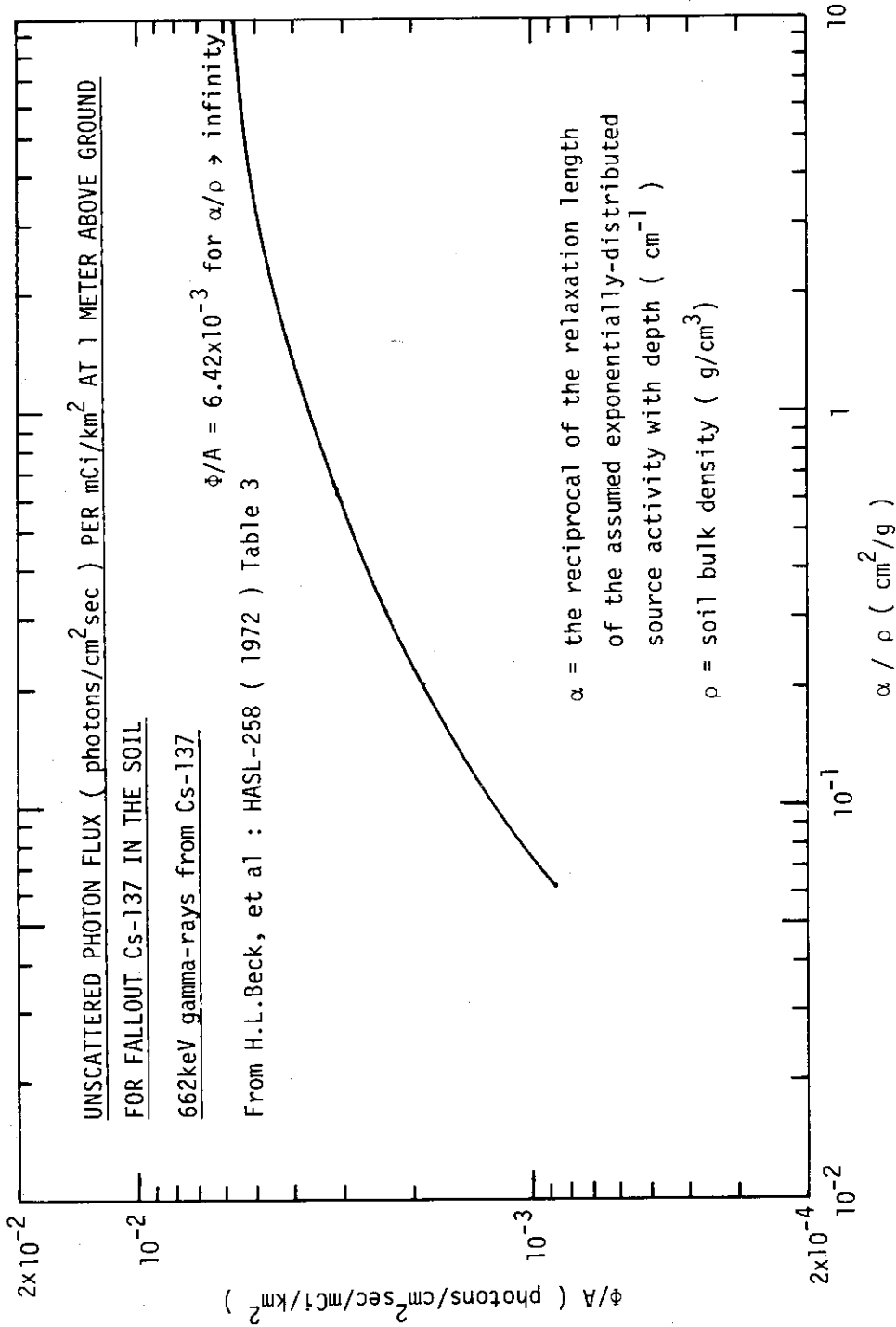


Fig.2.8 Unscattered photon flux per mCi/km² at 1 meter above ground for fallout Cs-137 in the soil

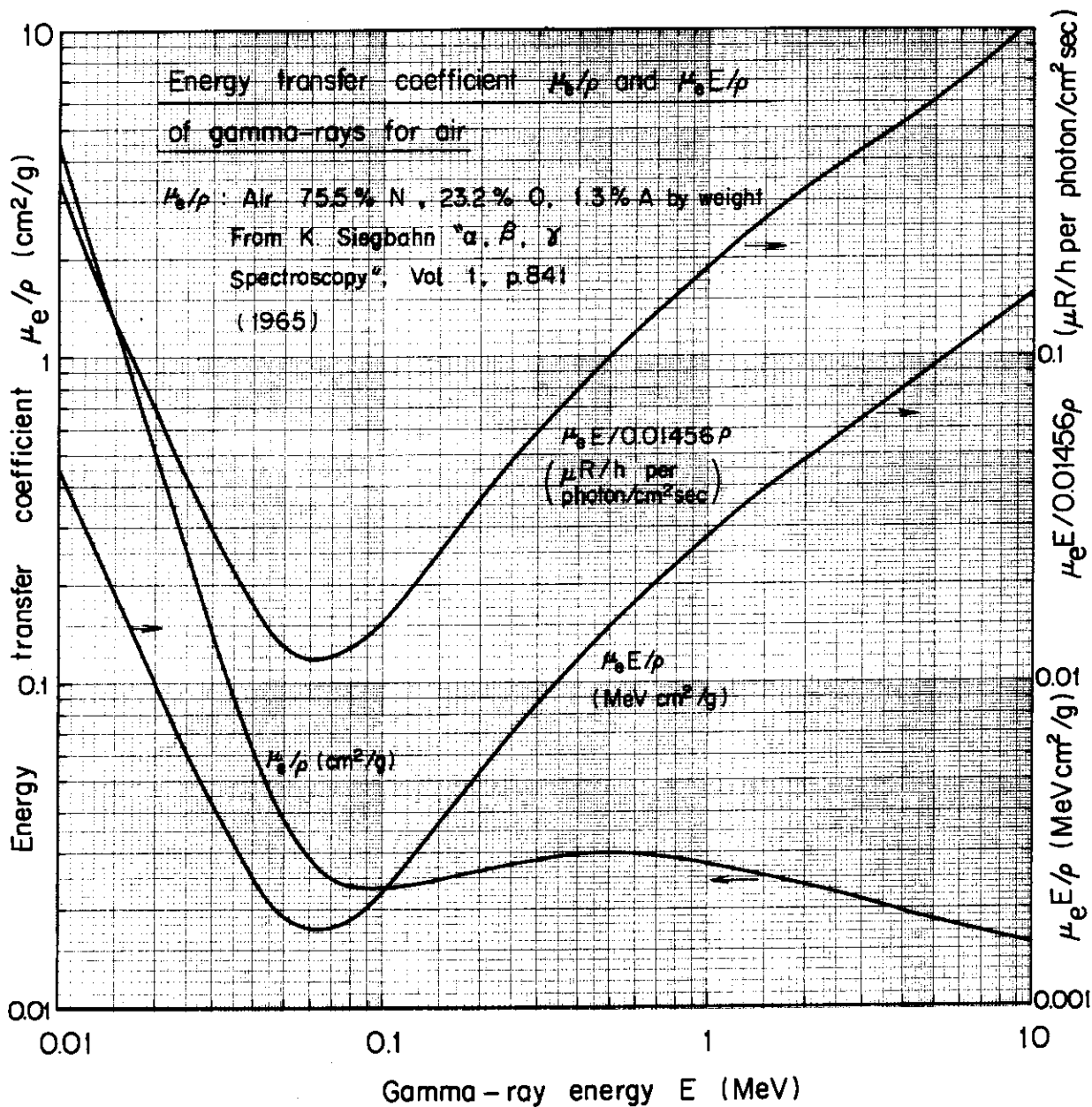


Fig.2.9 Energy transfer coefficient μ_e/ρ and $\mu_e E/\rho$ of gamma-rays for air

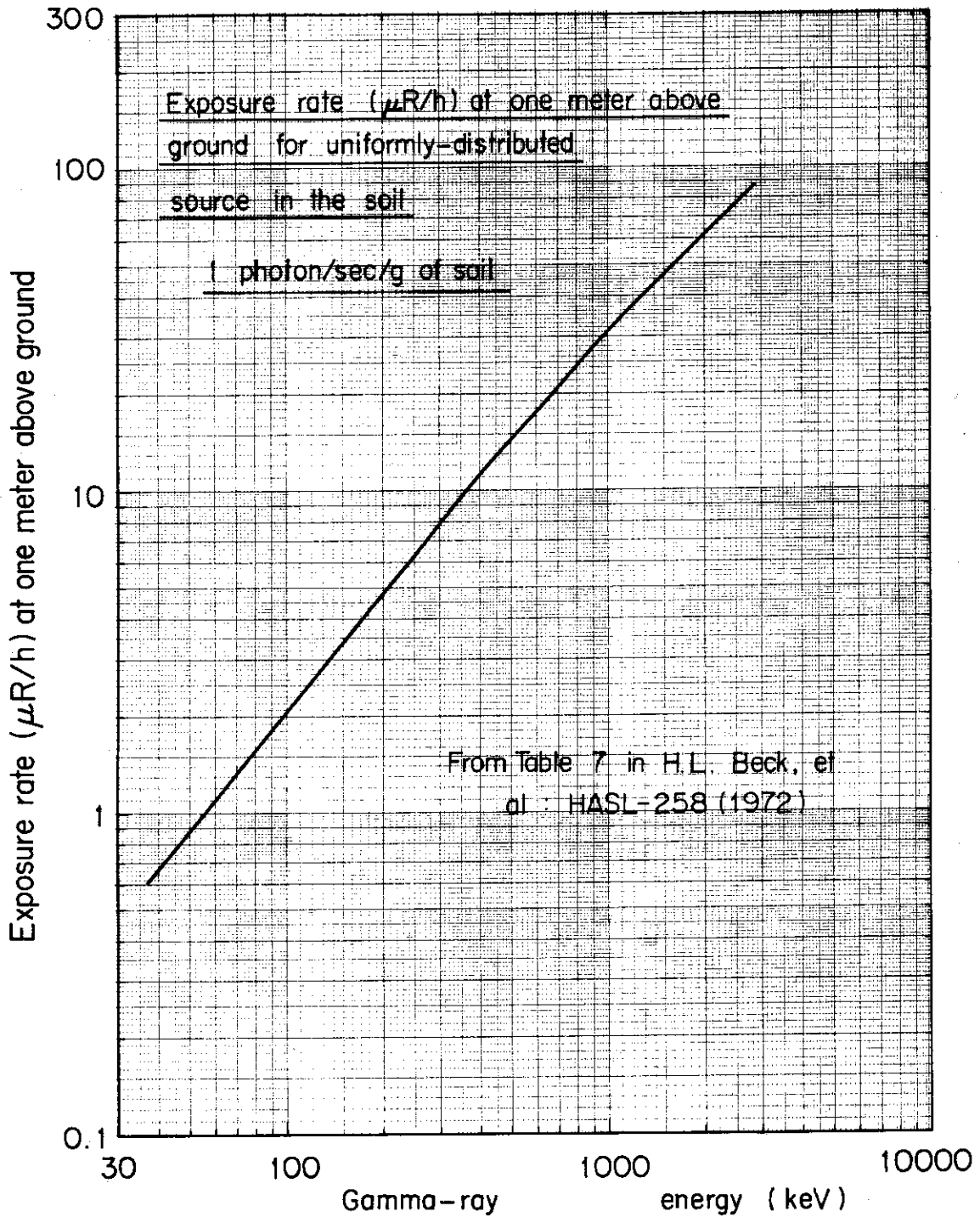


Fig.2.10 Exposure rate at one meter above ground for uniformly distributed source in the soil

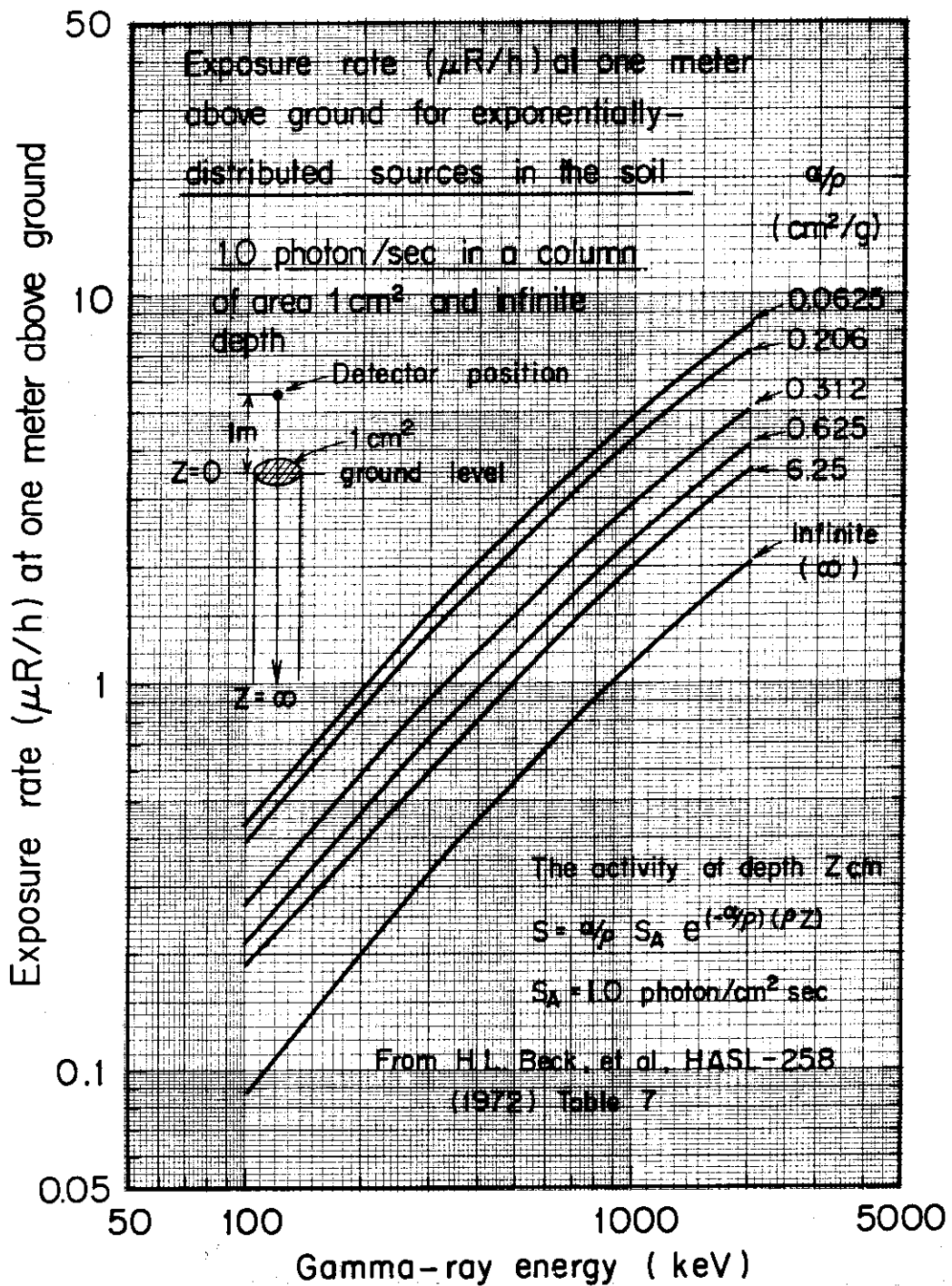


Fig.2.11 Exposure rate at one meter above ground for exponentially-distributed sources in the soil

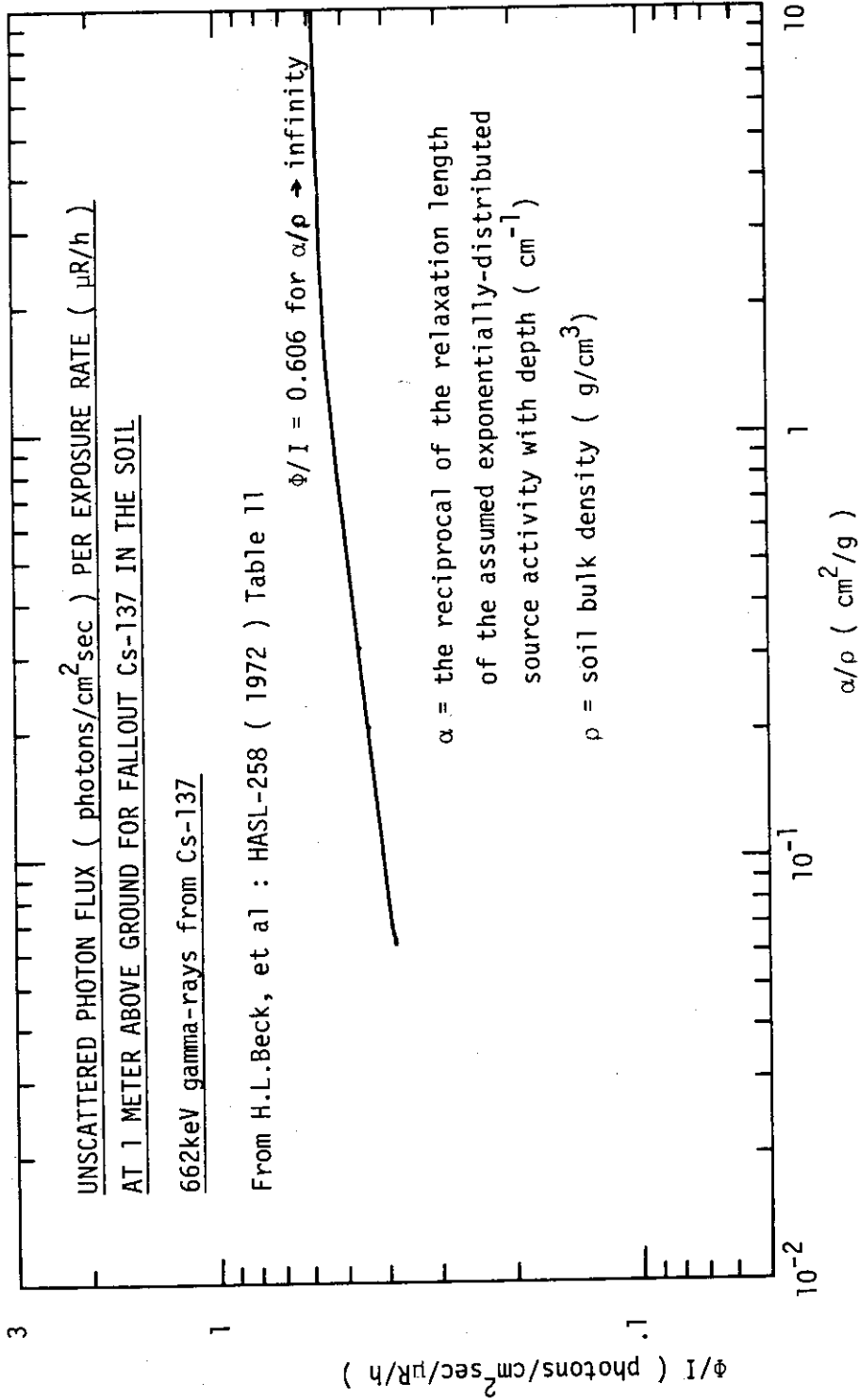


Fig.2.12 Unscattered photon flux per exposure rate ($\mu\text{R}/\text{h}$) at 1 meter above ground for fallout Cs-137 in the soil

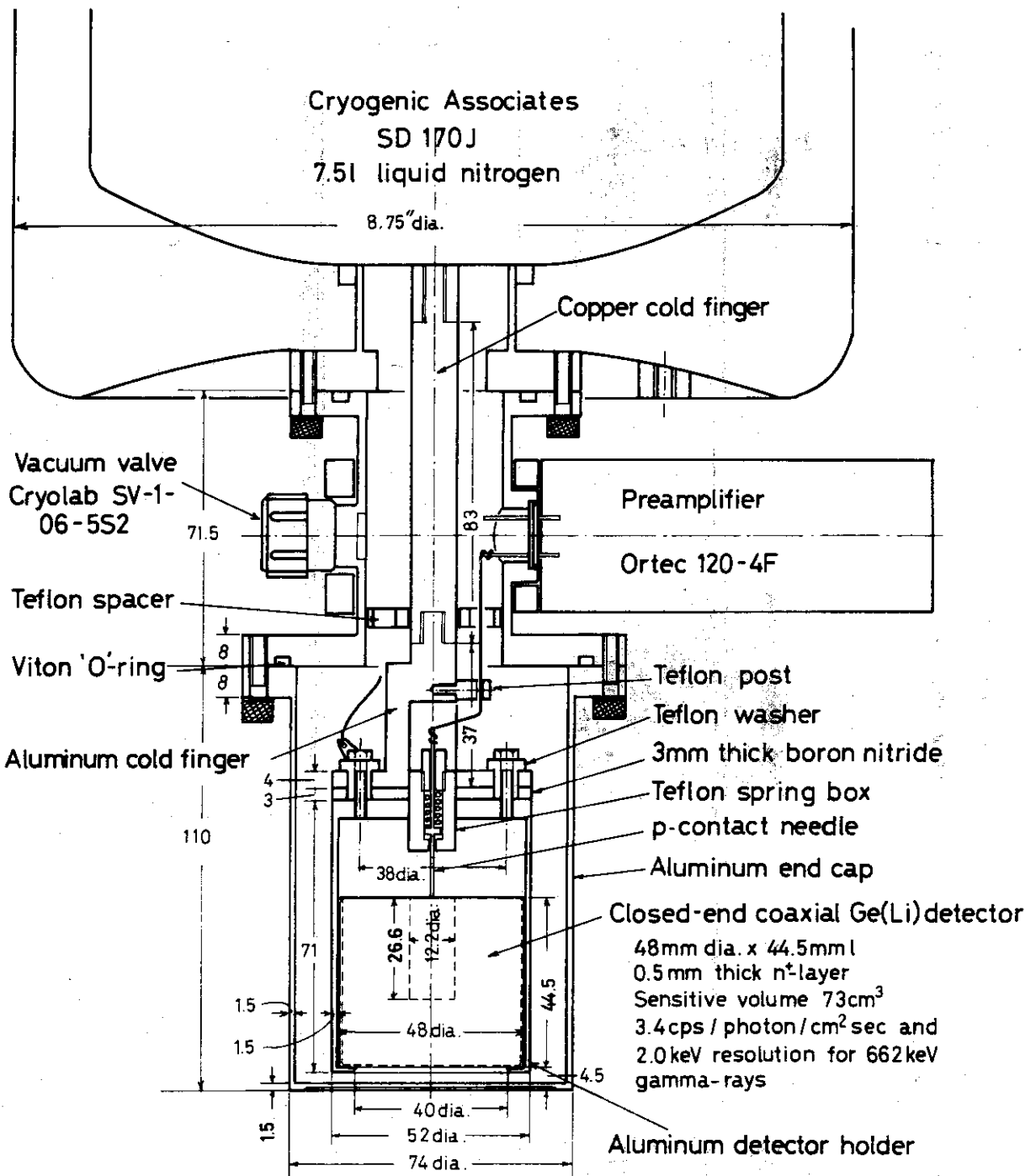


Fig.3.1.1 Mounting detail of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector for in-situ gamma-ray measurement

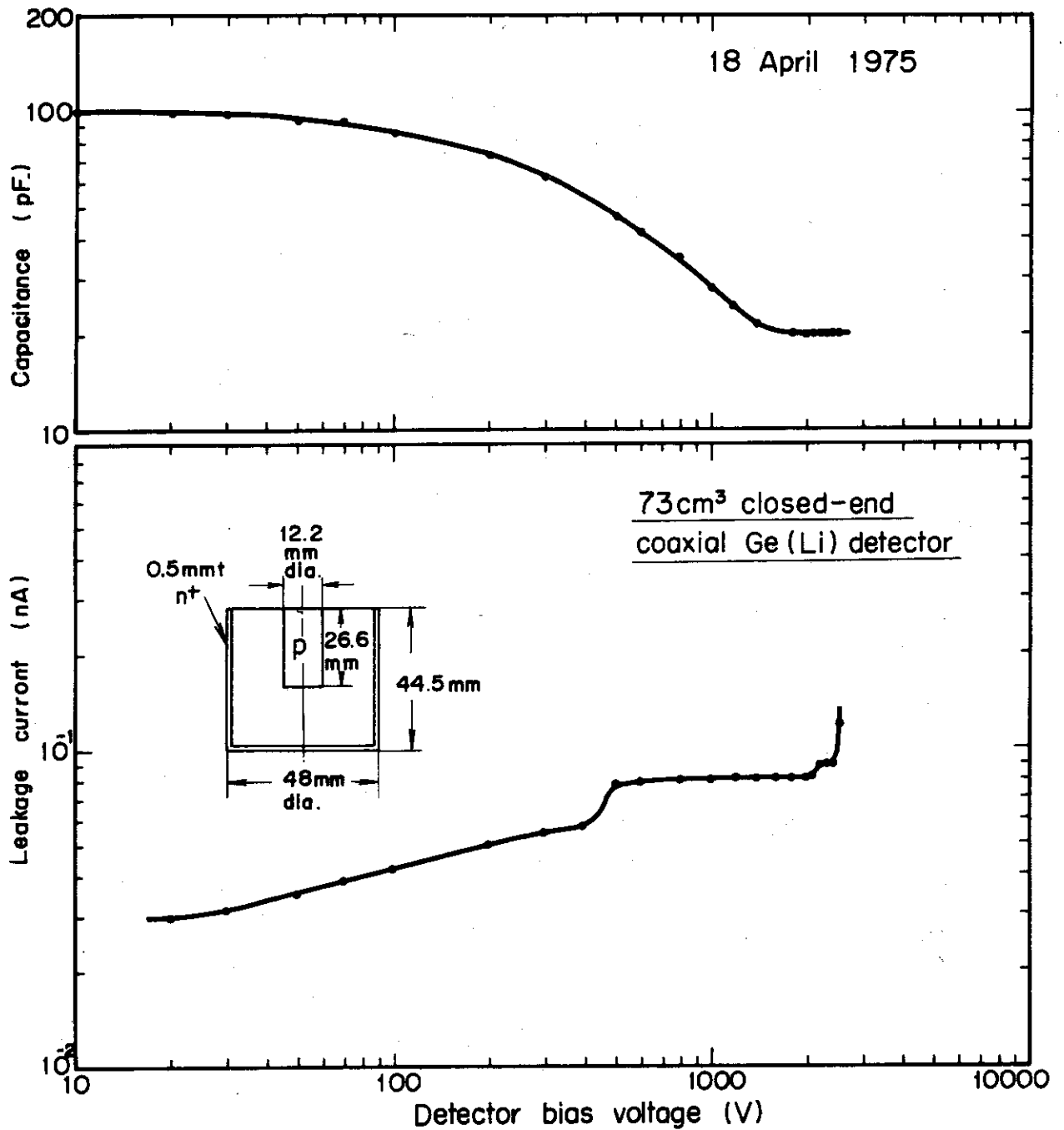


Fig.3.1.2 Capacitance and leakage current vs. bias voltage characteristics of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector

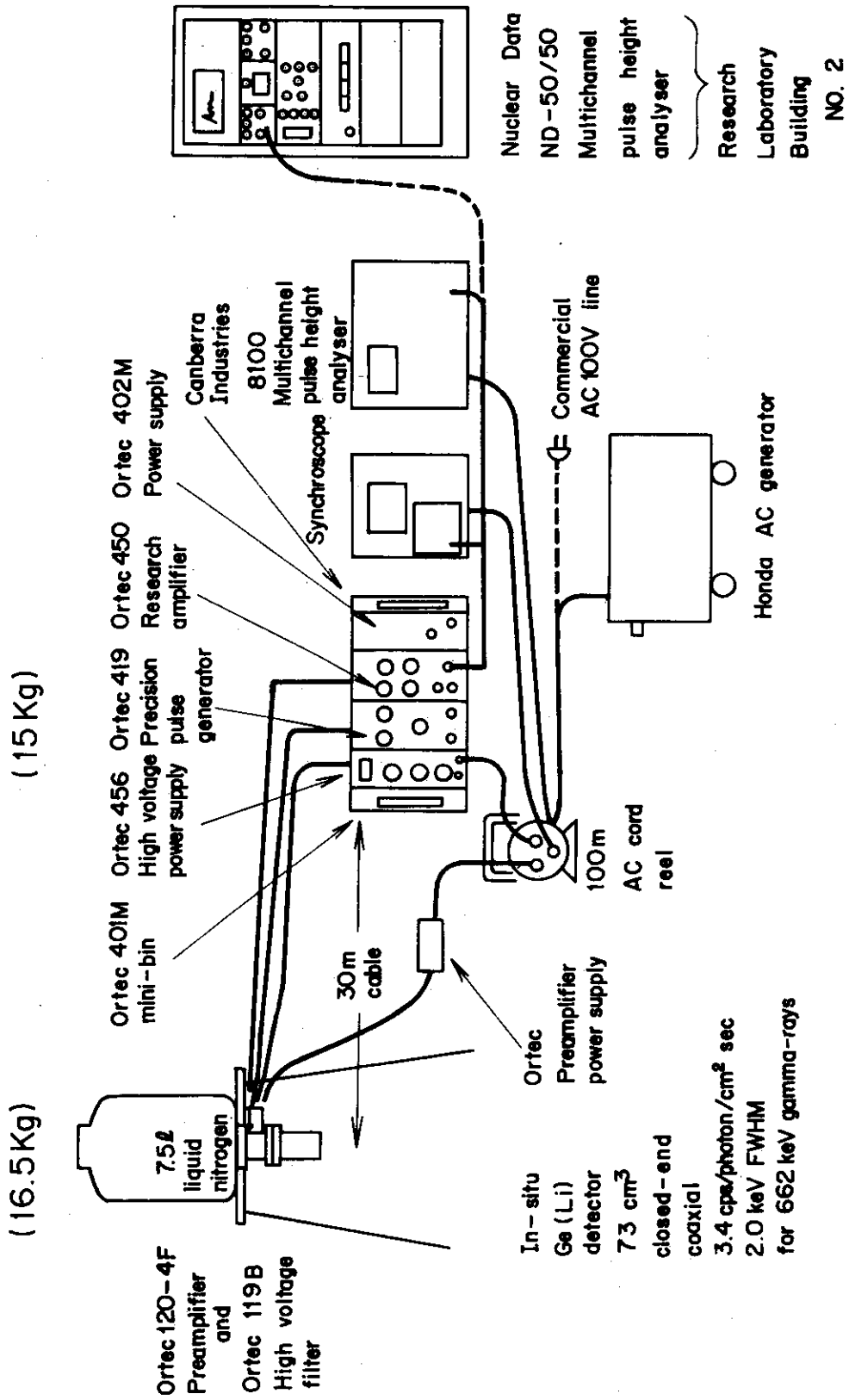


Fig.3.1.3 Schematic diagram of in-situ Ge(Li) detector system for environmental gamma-ray spectrometry

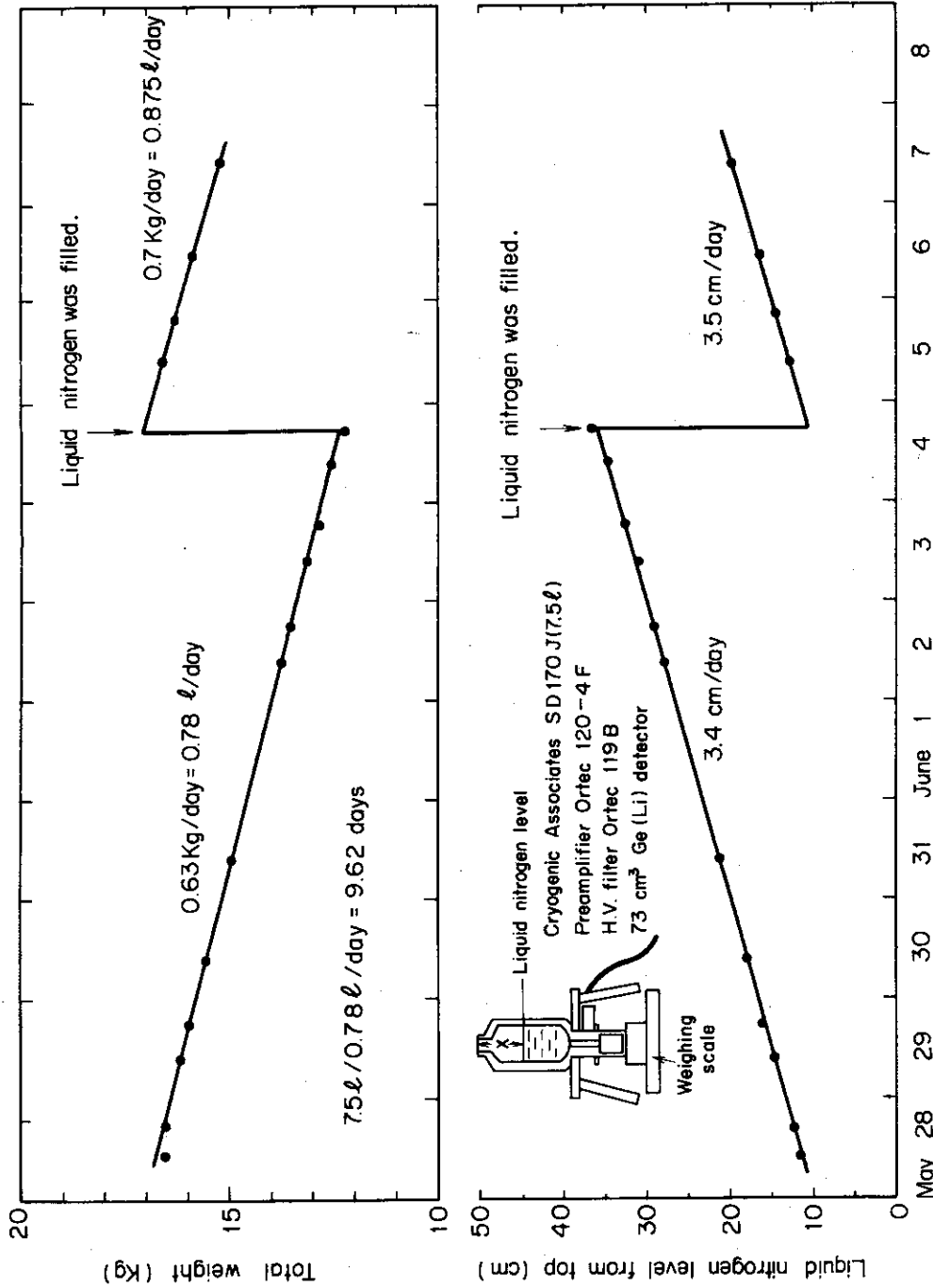


Fig.3.1.4 Liquid nitrogen consumption of cryostat with 73cm³ Ge(Li)detector

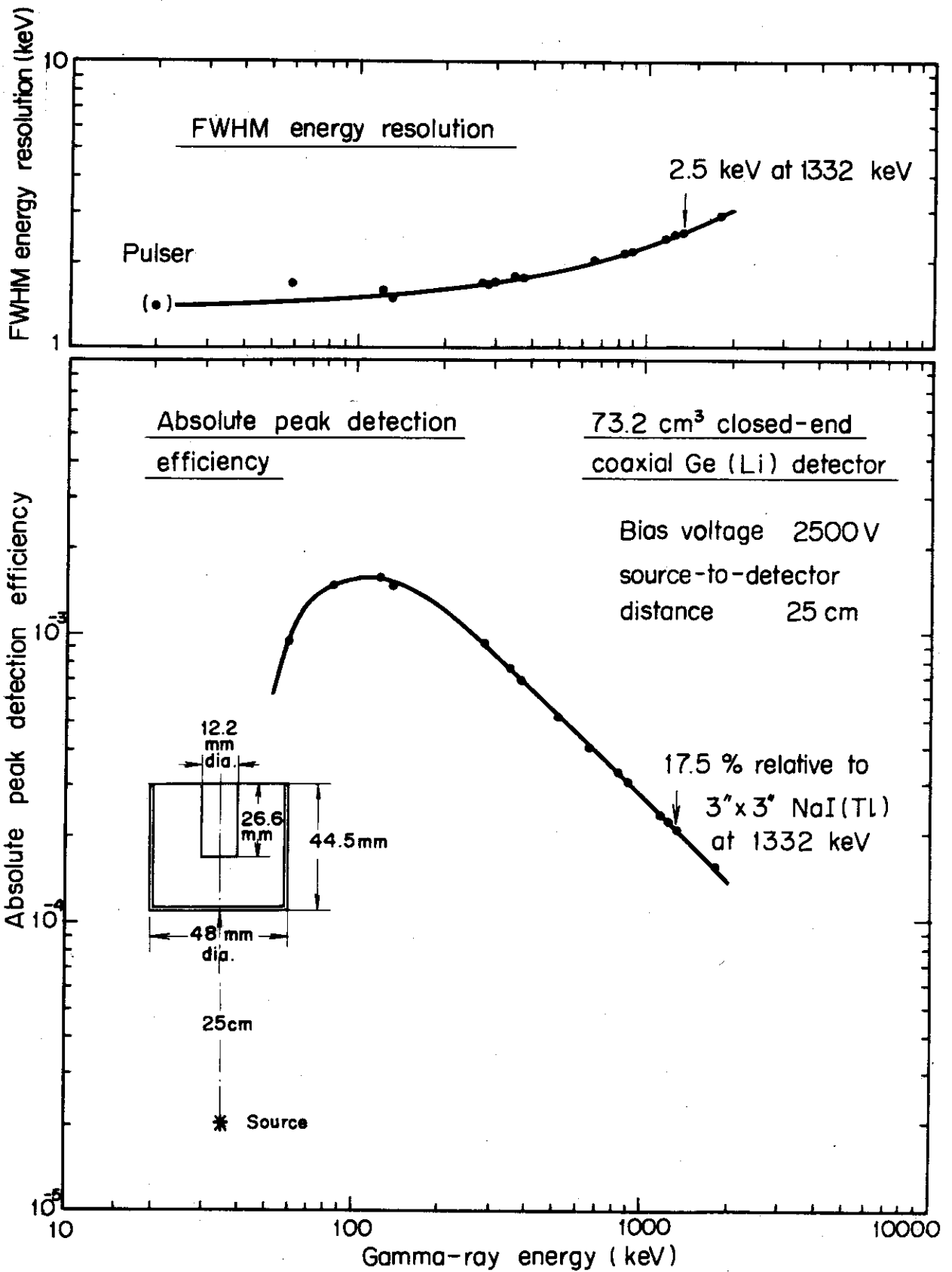


Fig.3.1.5 Performance of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li)detector measured at source-to-detector distance 25cm

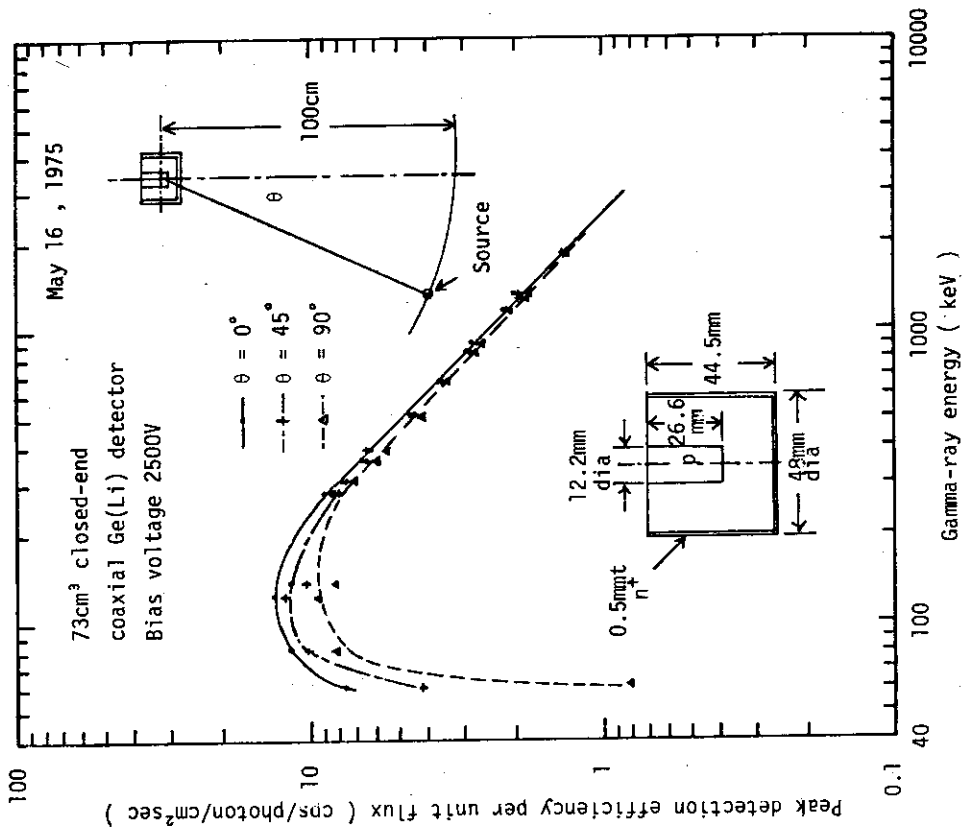


Fig.3.2.1 Peak detection efficiency per unit flux of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) gamma-ray spectrometer measured at source-to-detector distance 100cm

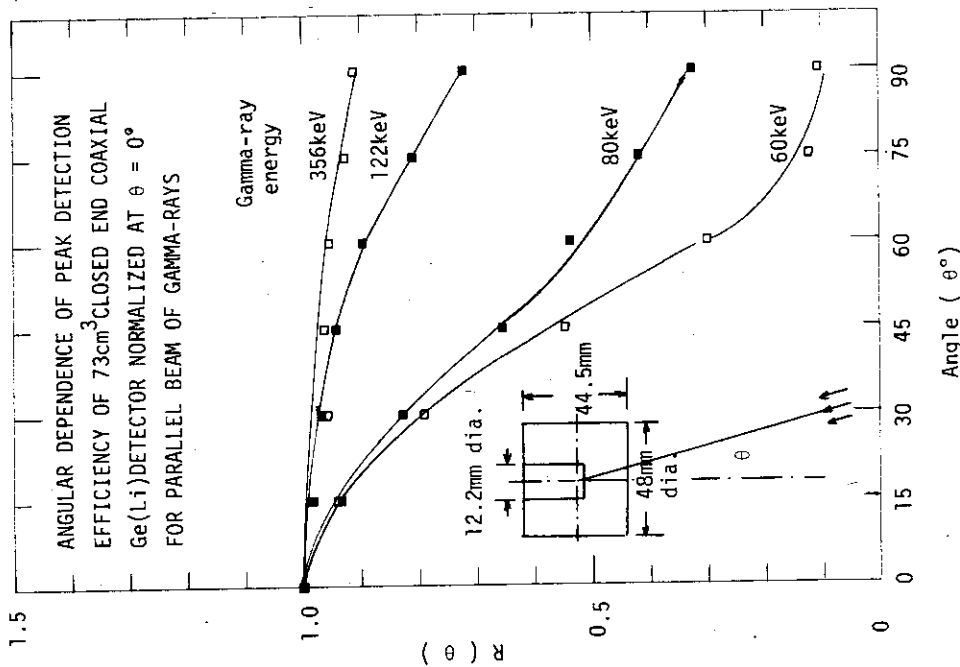


Fig.3.2.2 Angular dependence of peak detection efficiency of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector normalized at $\theta=0^\circ$ for parallel beam of gamma-rays of 60, 80, 122, and 356keV

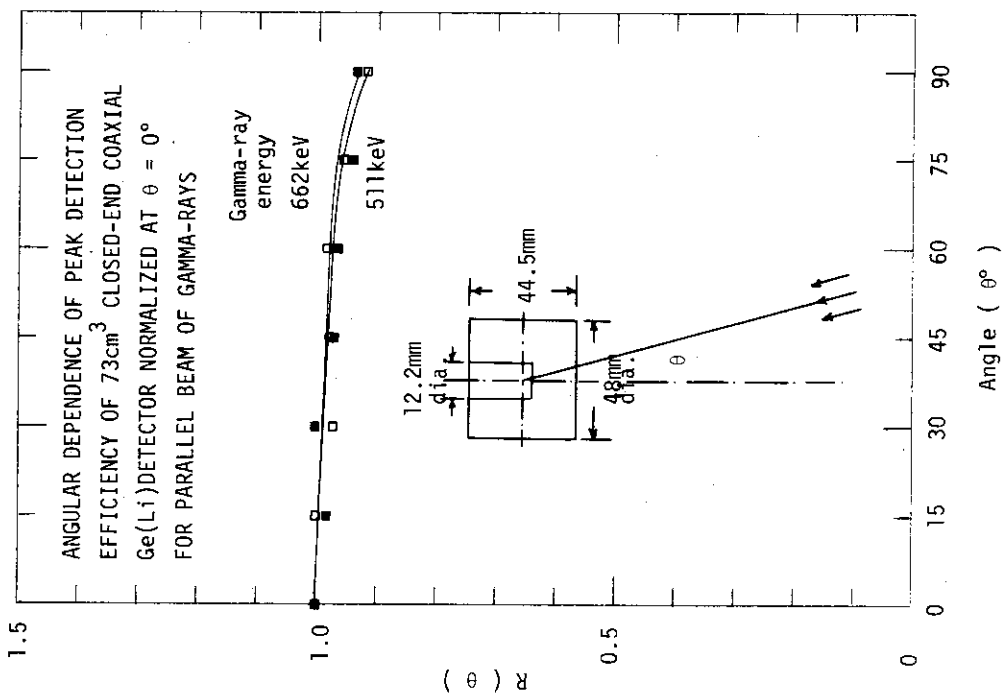


Fig.3.2.3 Angular dependence of peak detection efficiency of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector normalized at $\theta=0^\circ$ for parallel beam of gamma-rays of 511keV and 662keV

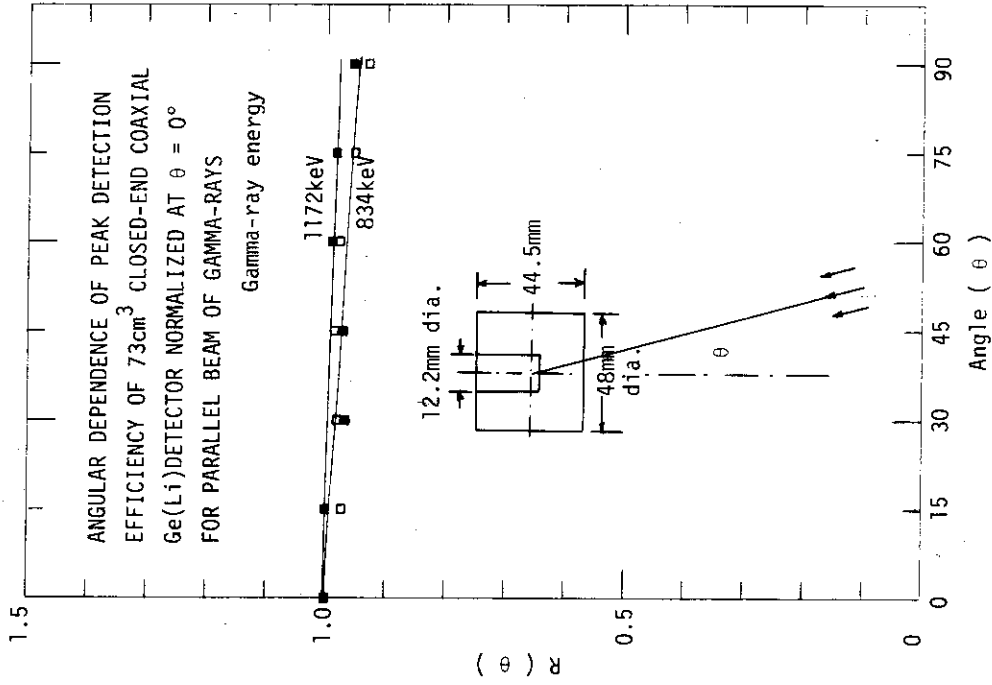


Fig.3.2.4 Angular dependence of peak detection efficiency of 73cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector normalized at $\theta=0^\circ$ for parallel beam of gamma-rays of 834 and 1173keV

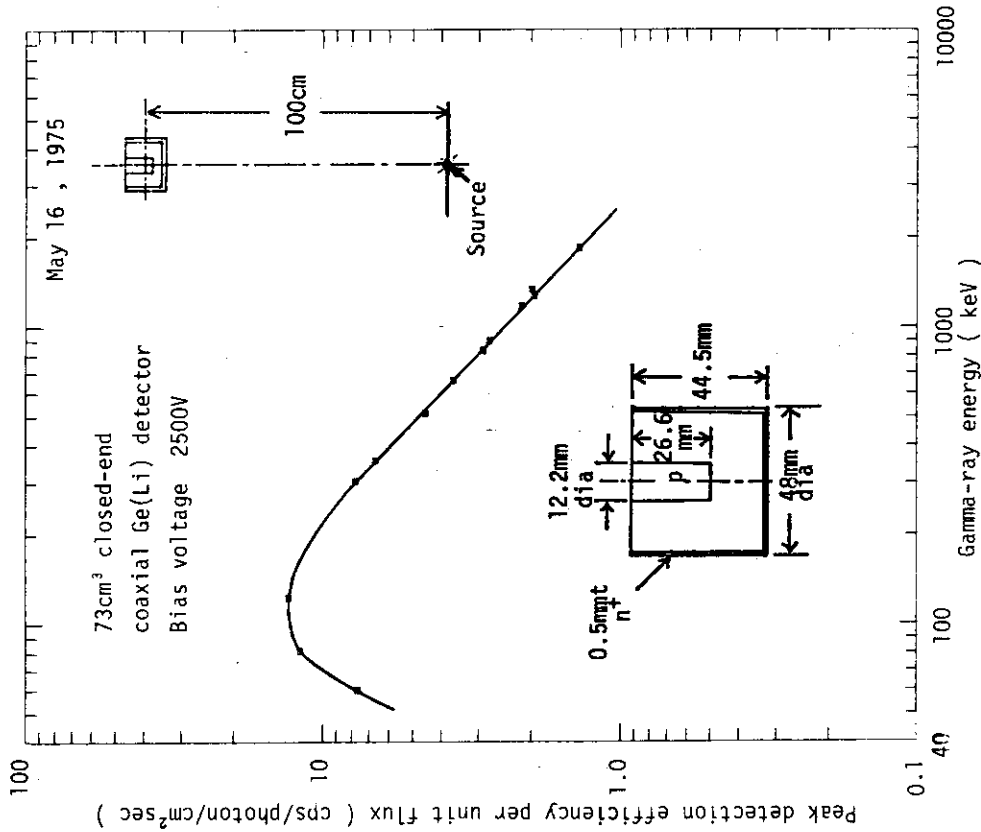


Fig.3.2.6 Least square fitted peak detection efficiency of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li)detector measured at source-to-detector distance 100cm

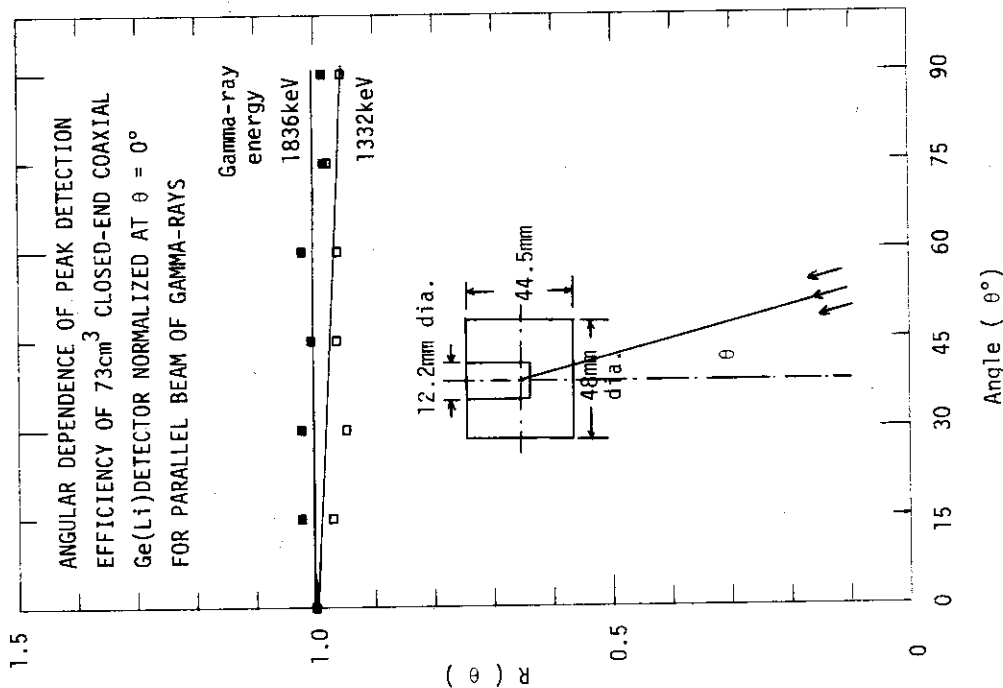


Fig.3.2.5 Angular dependence of peak detection efficiency of 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li)detector normalized at $\theta = 0^\circ$ for parallel beam of gamma-rays of 1333 and 1836keV

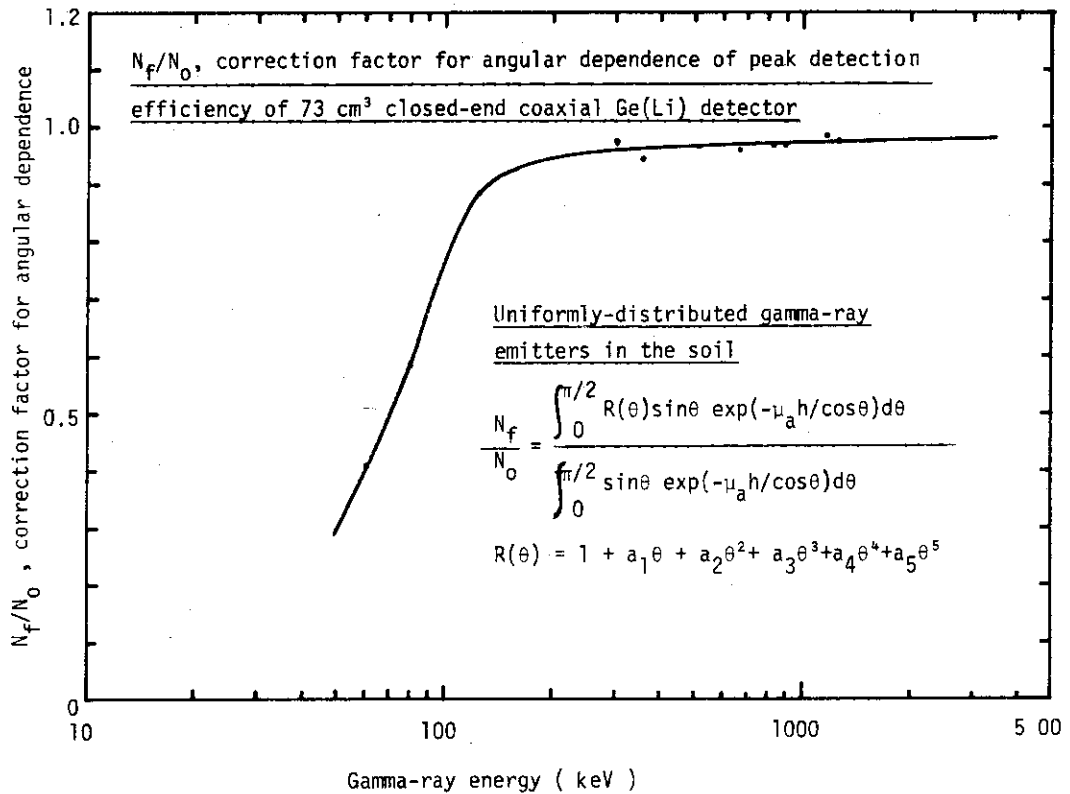


Fig.3.3.1 Correction factor N_f/N_0 for angular dependence of peak detection efficiency of 73 cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector for uniformly-distributed emitters in the soil

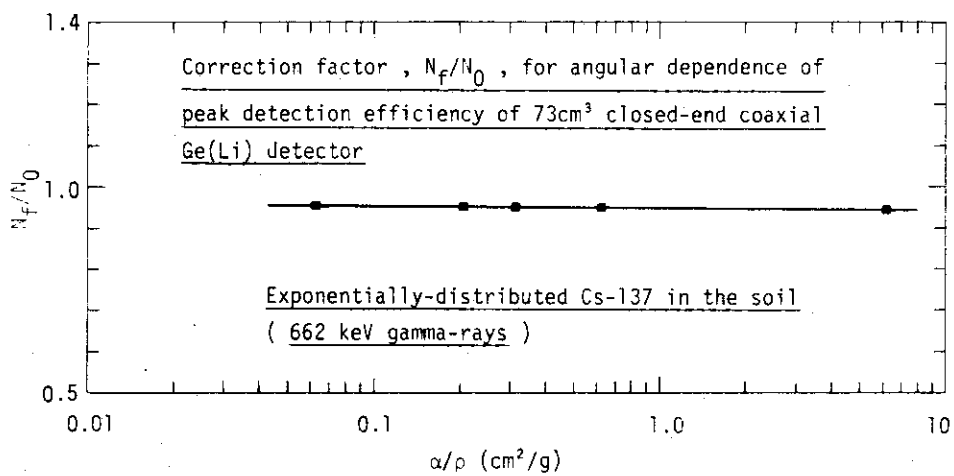


Fig.3.3.2 Correction factor, N_f/N_0 , for angular dependence of peak detection efficiency of 73 cm^3 closed-end coaxial Ge(Li) detector

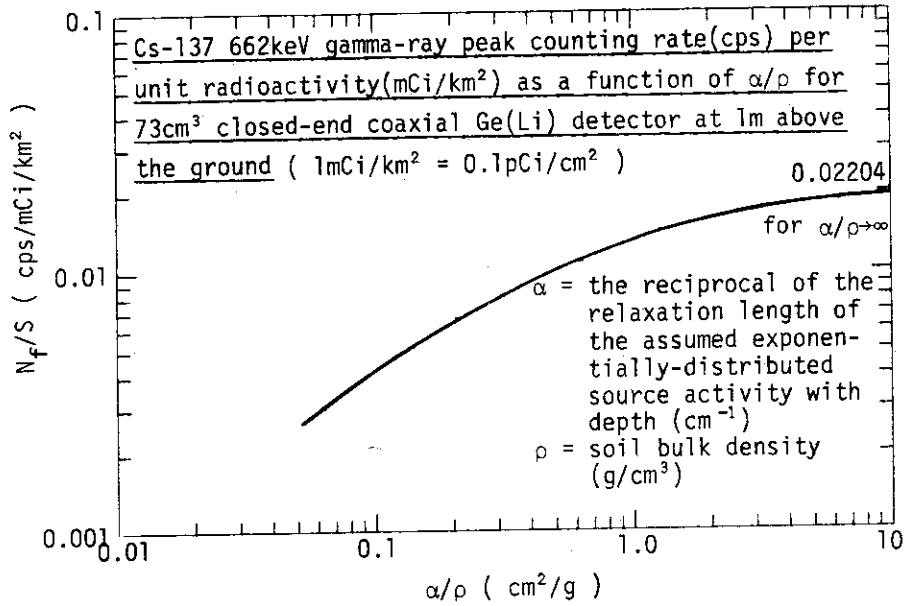


Fig.3.3.3 Cs-137 662keV gamma-ray peak counting rate (cps) per unit radioactivity (mCi/km²) as a function of α/ρ for 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector at 1 m above the ground

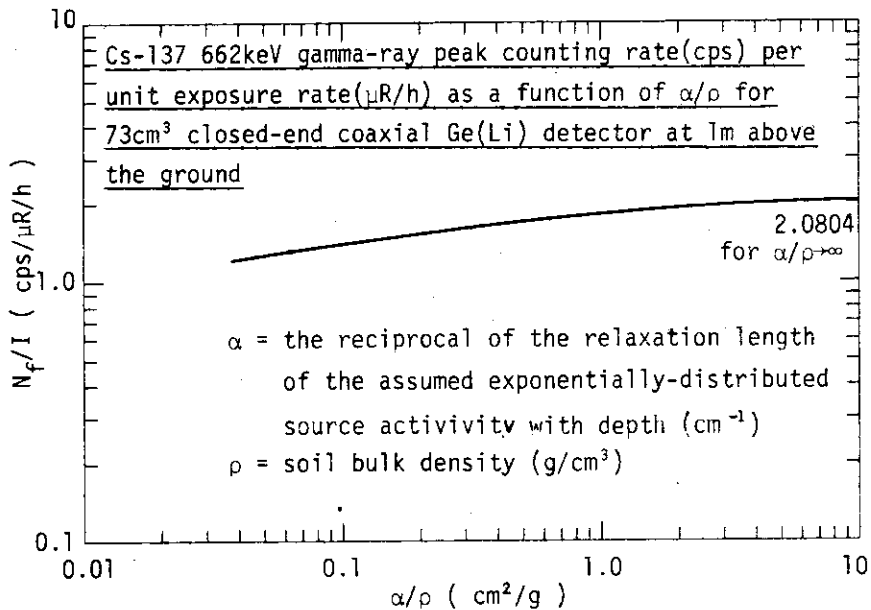


Fig.3.3.4 Cs-137 662keV gamma-ray peak counting rate (cps) per unit exposure rate (μR/h) as a function of α/ρ for 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector at one meter above the ground

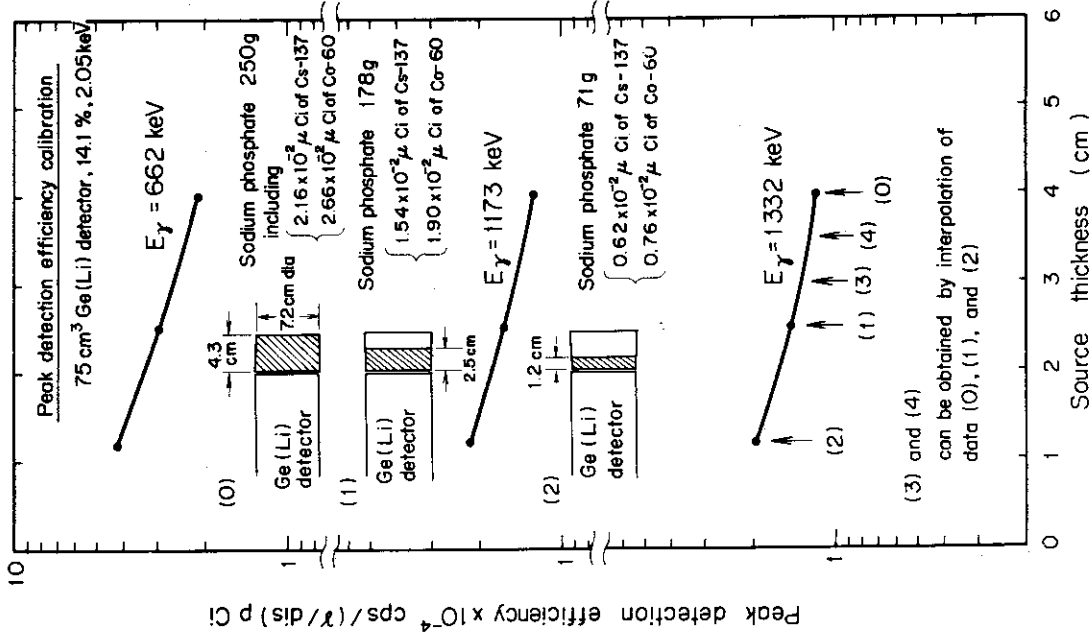


Fig. 4.3.1 Peak detection efficiency of 75cm³ Ge(Li) detector as a function of source thickness of sodium phosphate

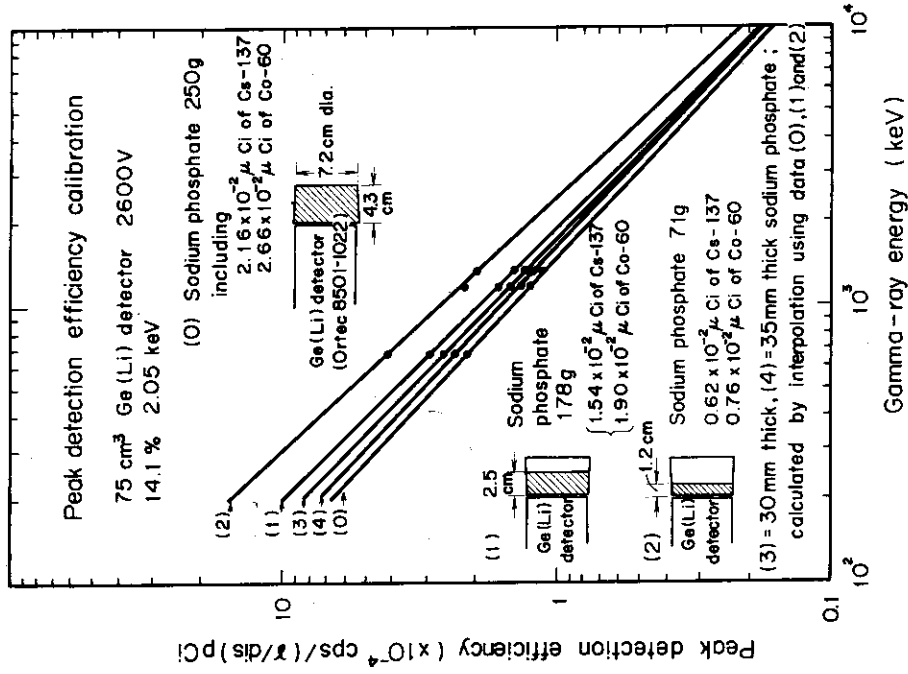


Fig. 4.3.2 Peak detection efficiency of 75cm³ Ge(Li) detector for soil sample measurement

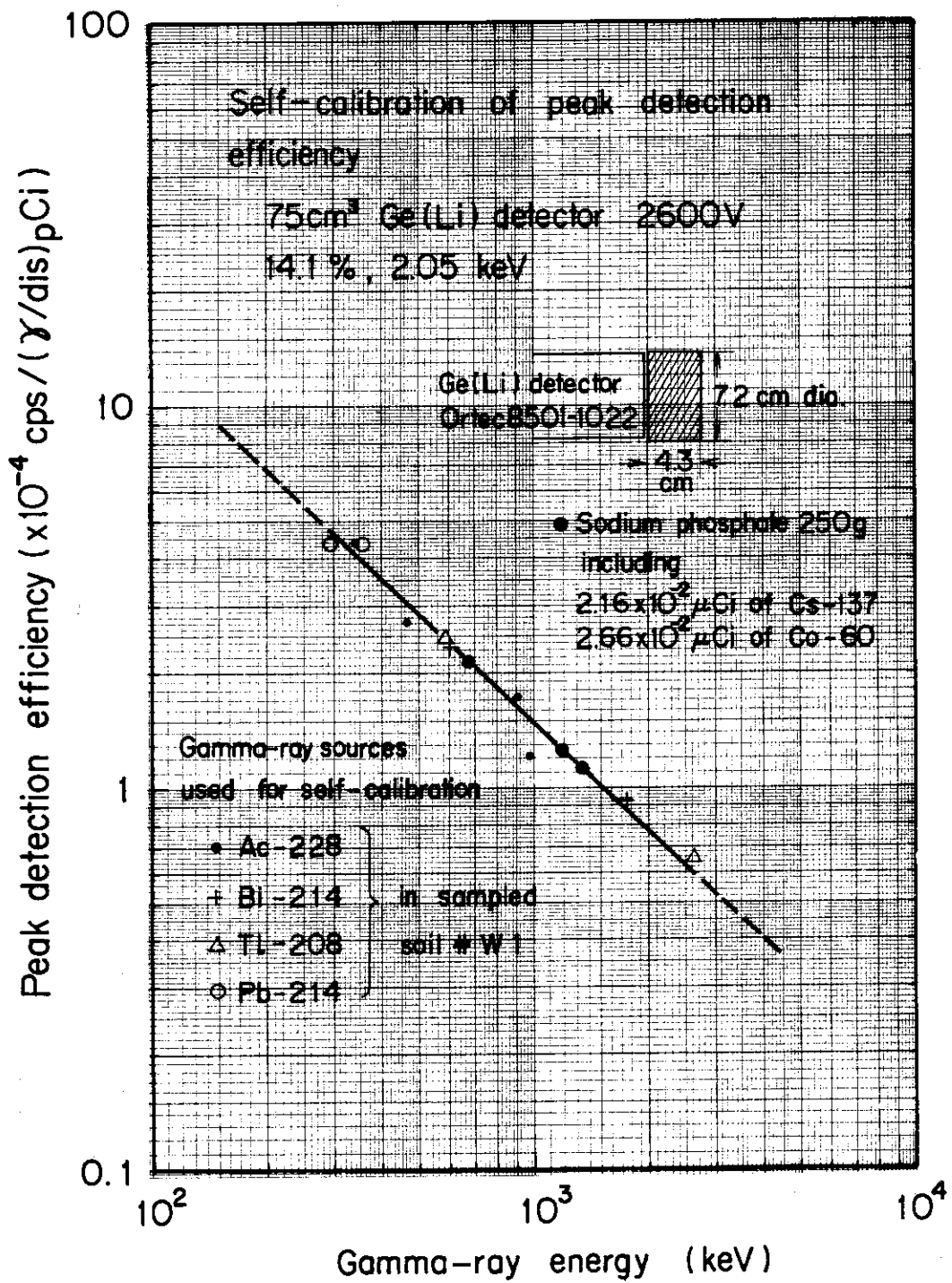


Fig.4.3.3 Self-calibrated peak detection efficiency of 75cm³Ge(Li) detector for soil sample measurement

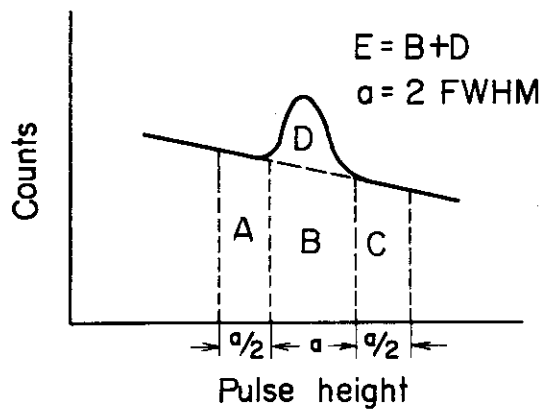


Fig.4.3.4 Typical pulse height distribution for calculating detection limit of gamma-ray spectrometer

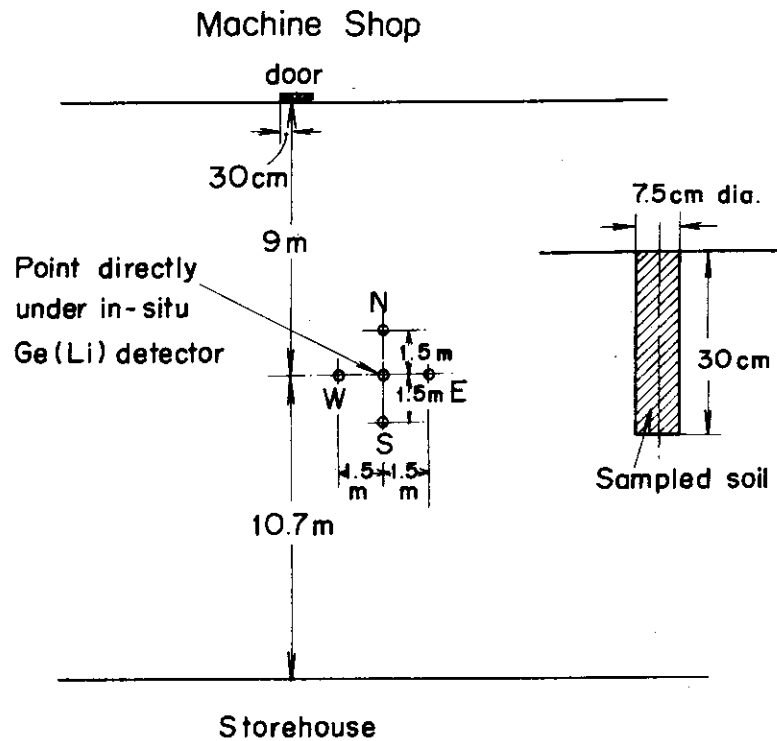


Fig.5.1.1 In-situ Ge(Li) detector measurement point and soil-sampled points

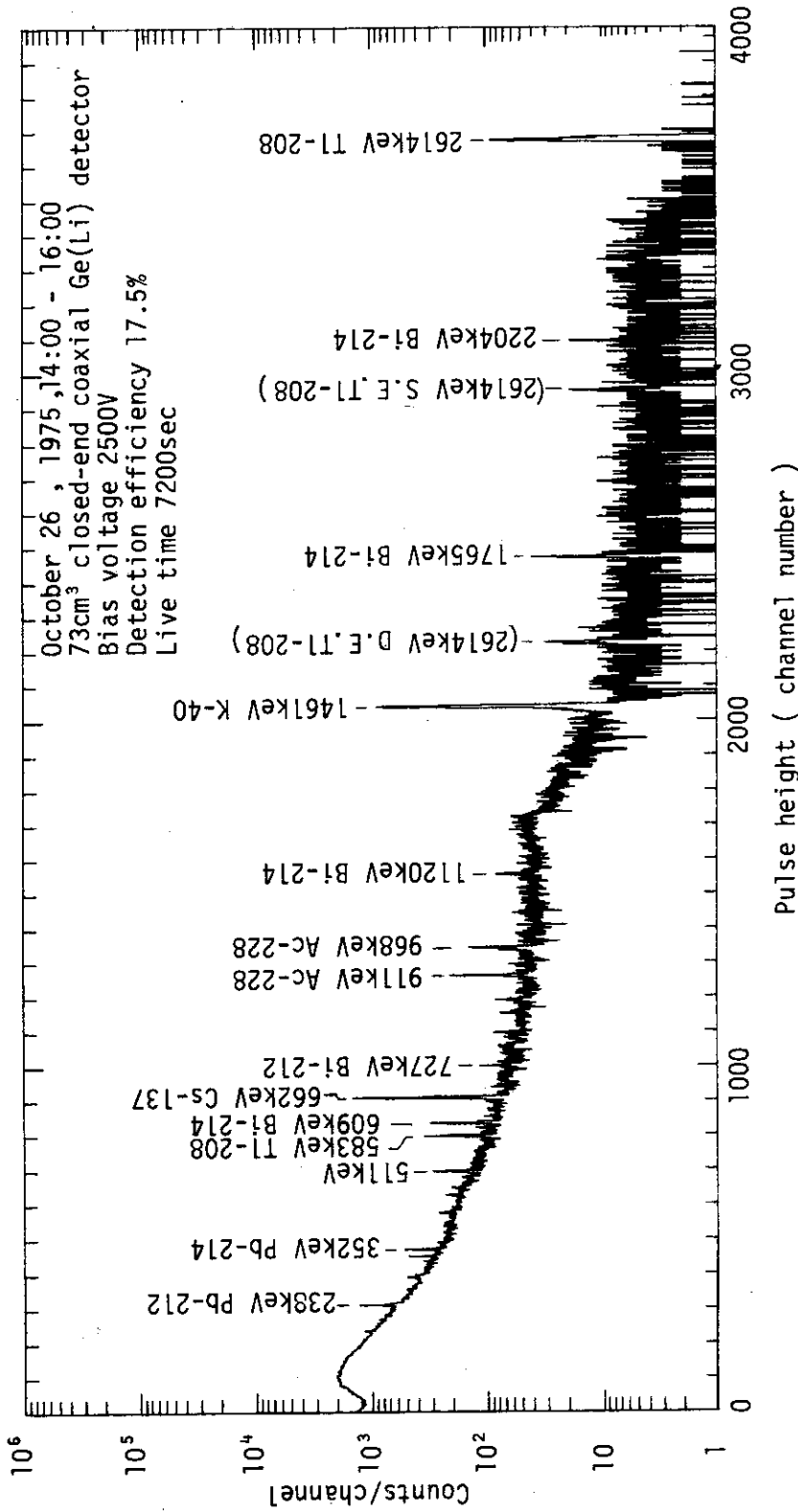


Fig.5.2.1 In-situ gamma-ray pulse height distribution measured on the lawn between Machine Shop and Storehouse in Japan Atomic Energy Research Institute on October 26, 1975

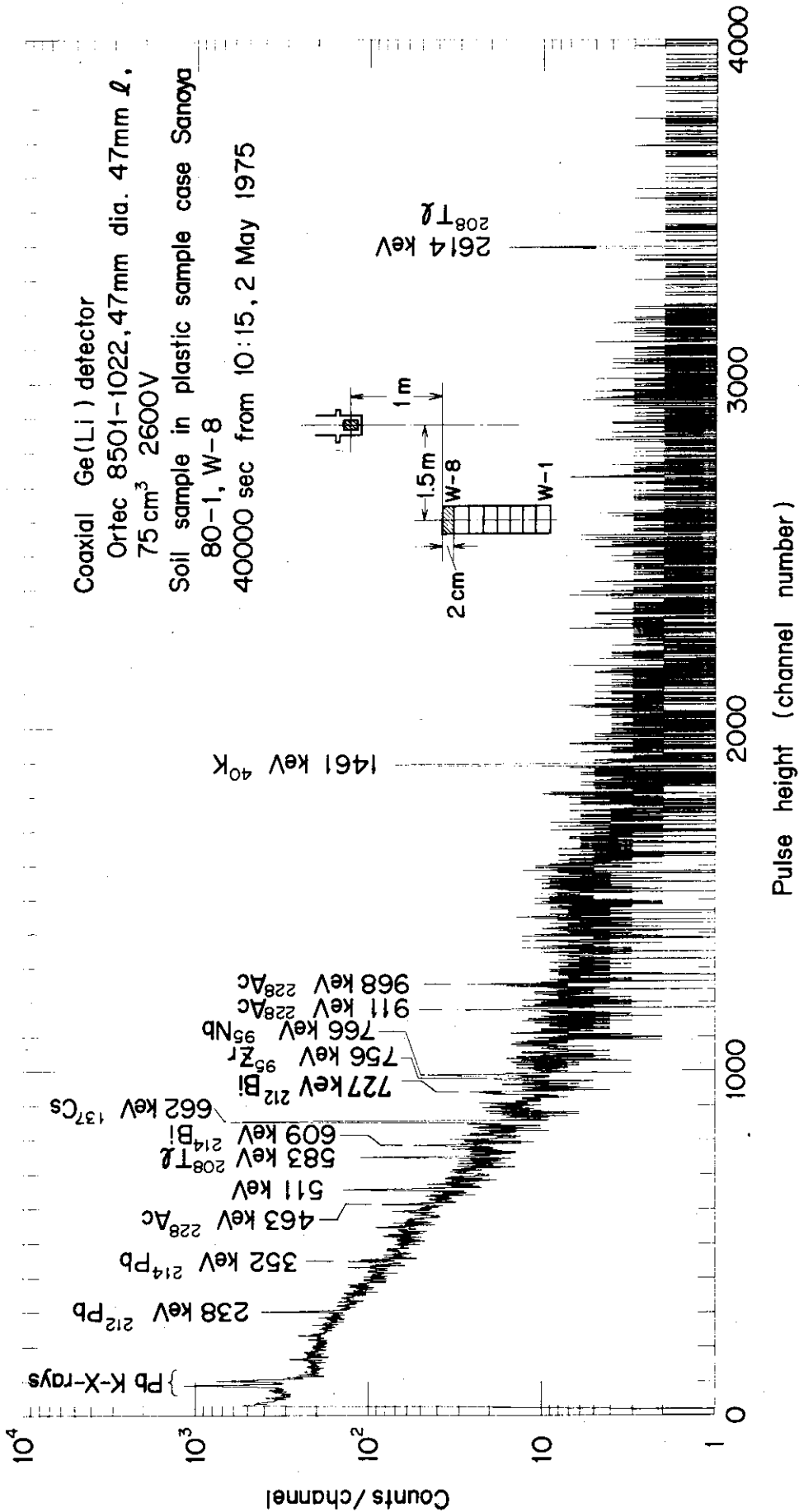


Fig.5.3.1.1 Gamma-ray spectrum of the soil sample (No.W-8) which was sampled in the soil surface

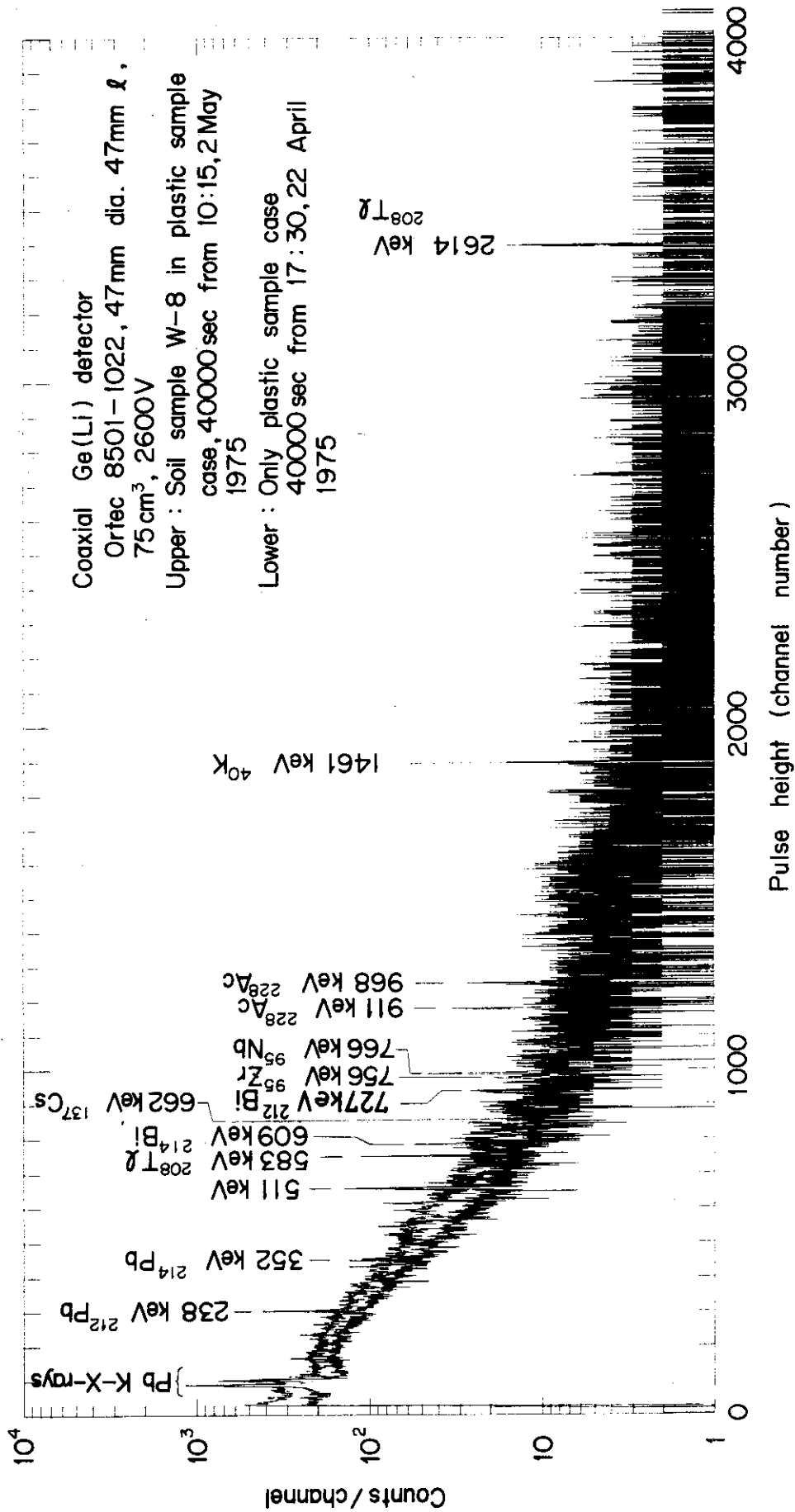


Fig.5.3.2 Gamma-ray pulse height distributions from soil sample (W-8) and from background

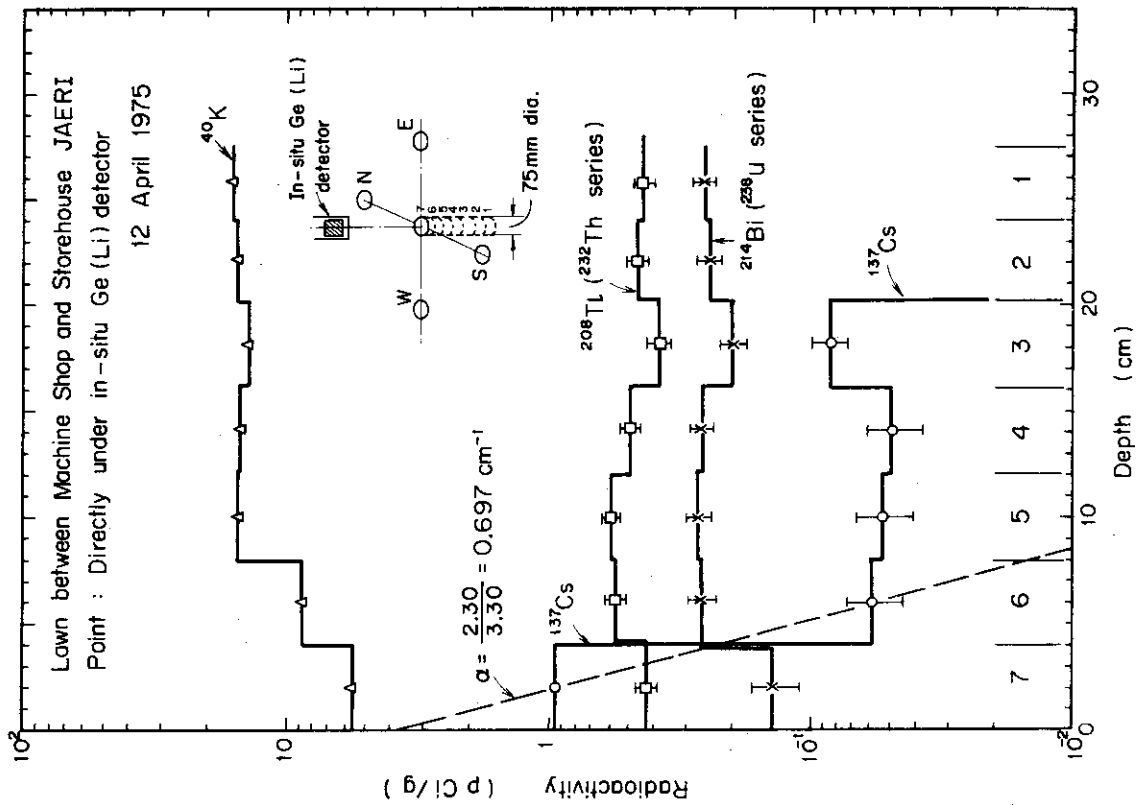


Fig.5.3.3 Depth distribution of radioactivities in soil directly under in-situ Ge(Li) detector

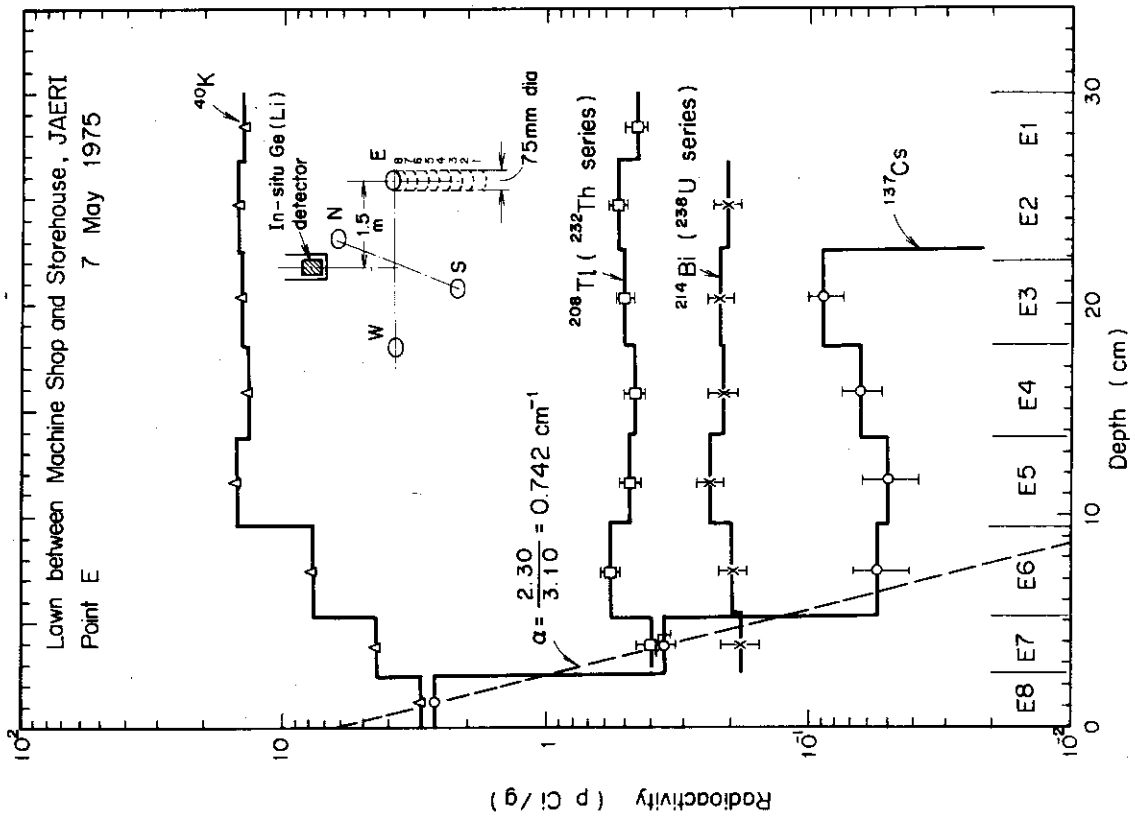


Fig.5.3.4 Depth distribution of radioactivities in soil at point E

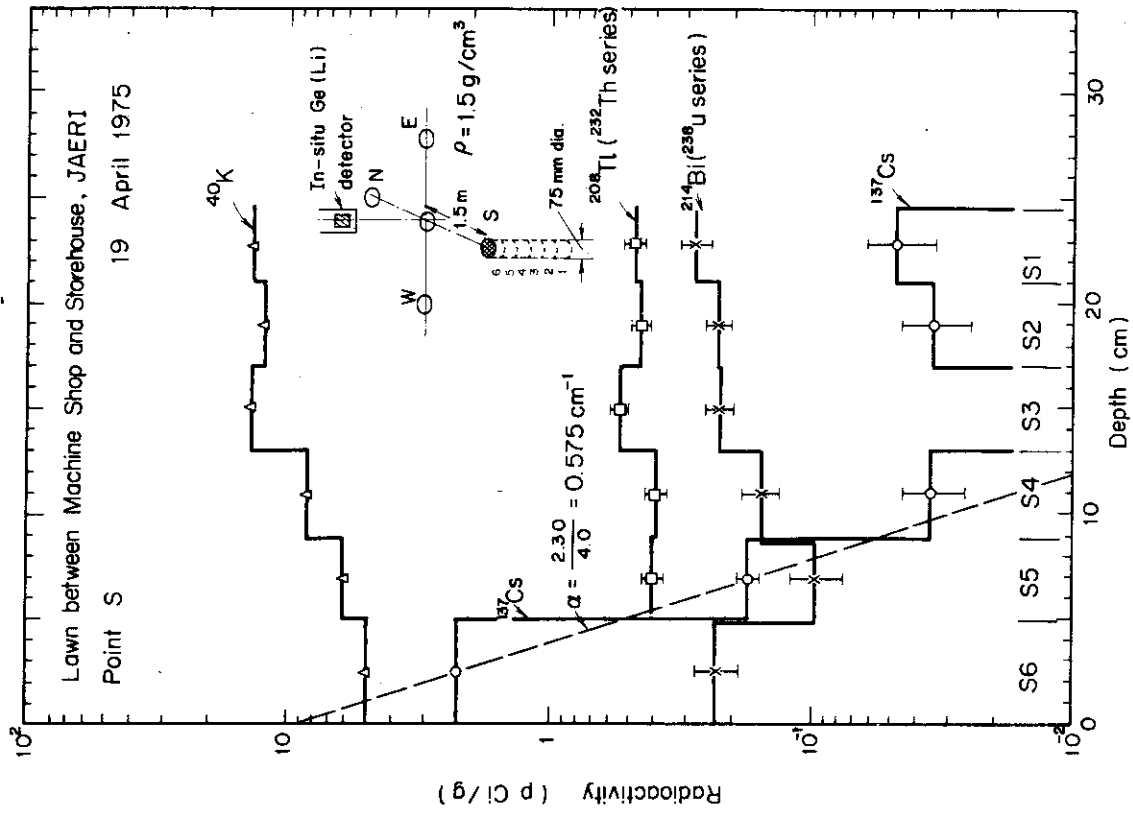


Fig.5.3.6 Depth distribution of radioactivities in soil at point S

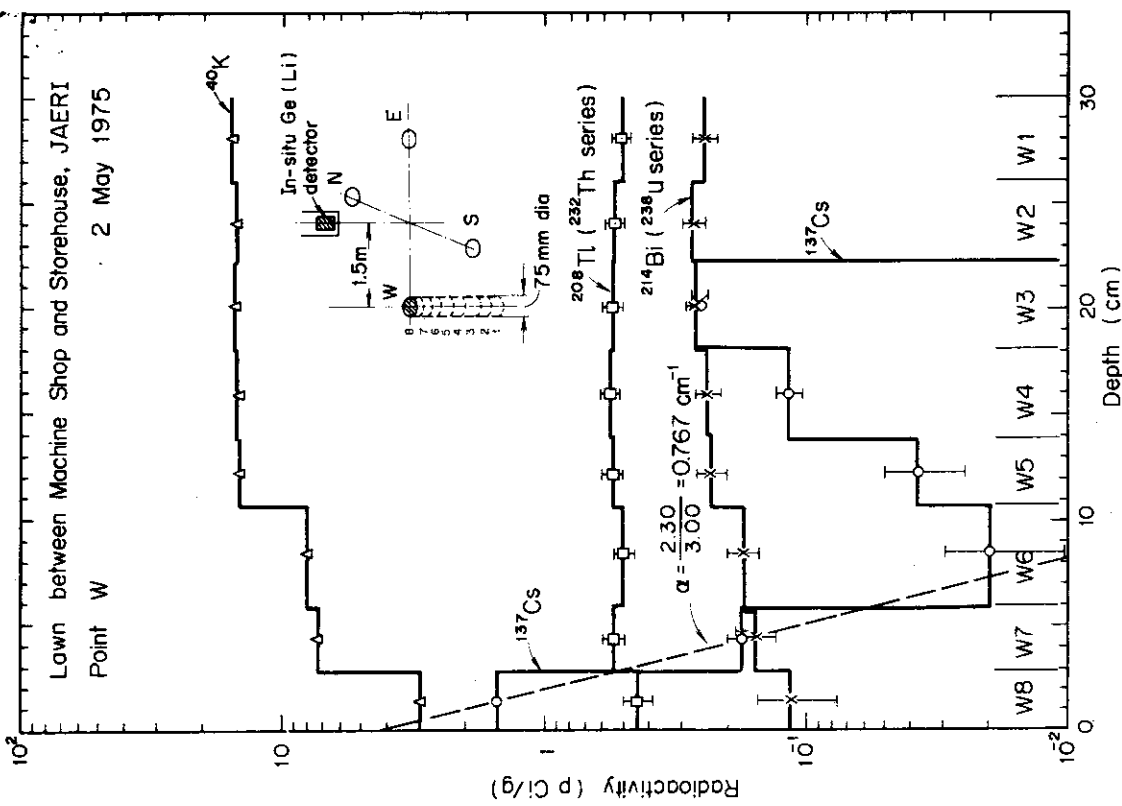


Fig.5.3.5 Depth distribution of radioactivities in soil at point W

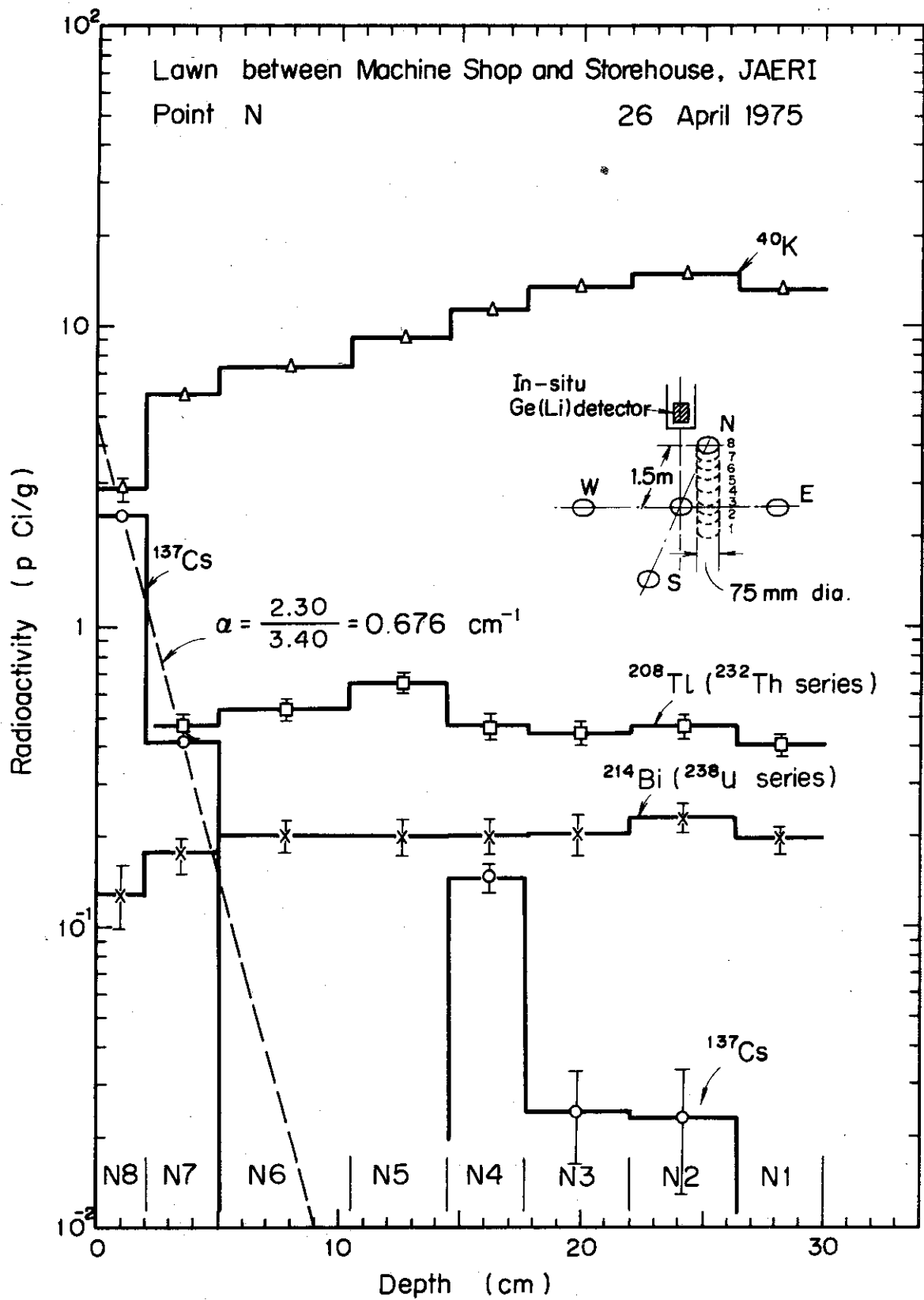


Fig.5.3.7 Depth distribution of radioactivities in soil at point N

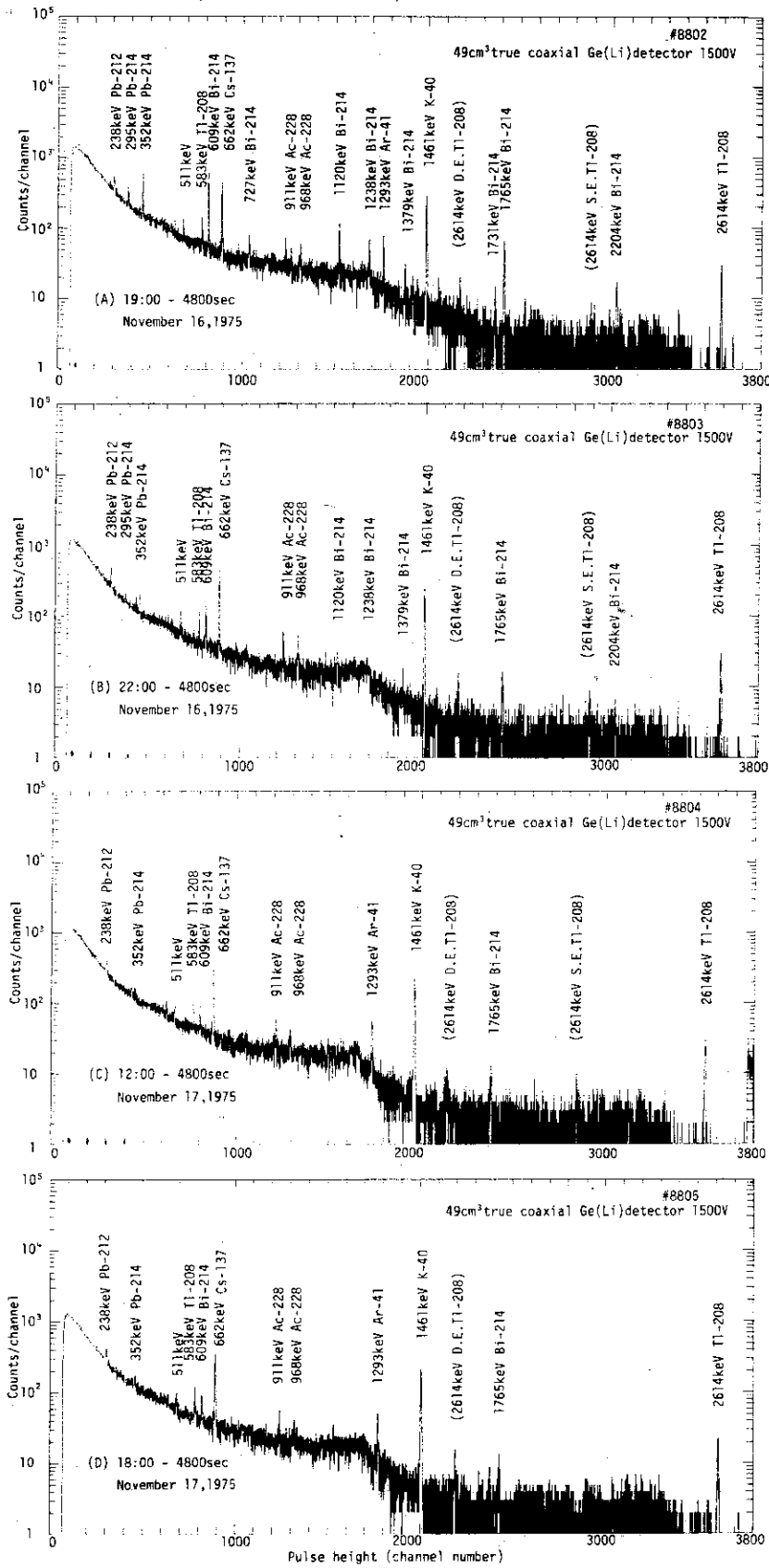


Fig.6.1.1 Change in pulse height distributions of environmental gamma-rays measured by 49cm³ true coaxial Ge(Li)detector placed on the lawn between Machine Shop and Storehouse in JAERI

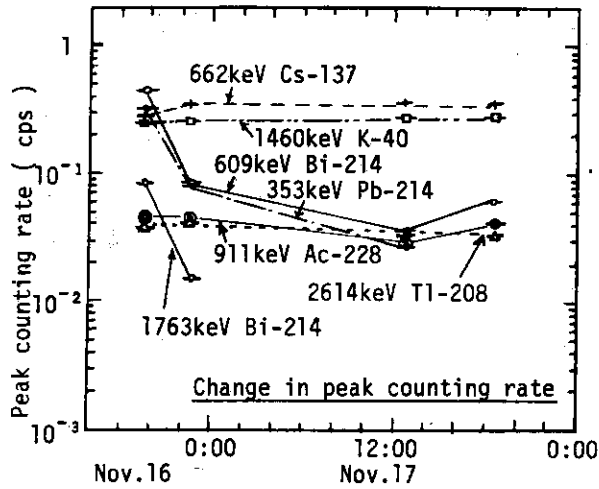


Fig.6.1.2 Change in counting rates of various peaks of environmental gamma-rays measured by 49cm³ Ge(Li) detector

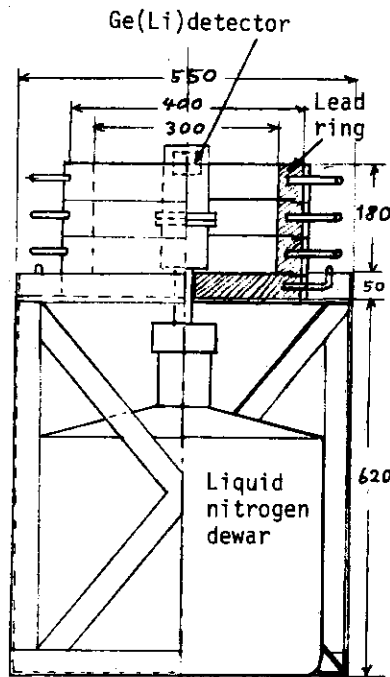


Fig.6.2.1 49cm³ coaxial Ge(Li) detector with lead shield to discriminate gamma-rays from radionuclides in the soil and to distinguish gamma-rays from plumes

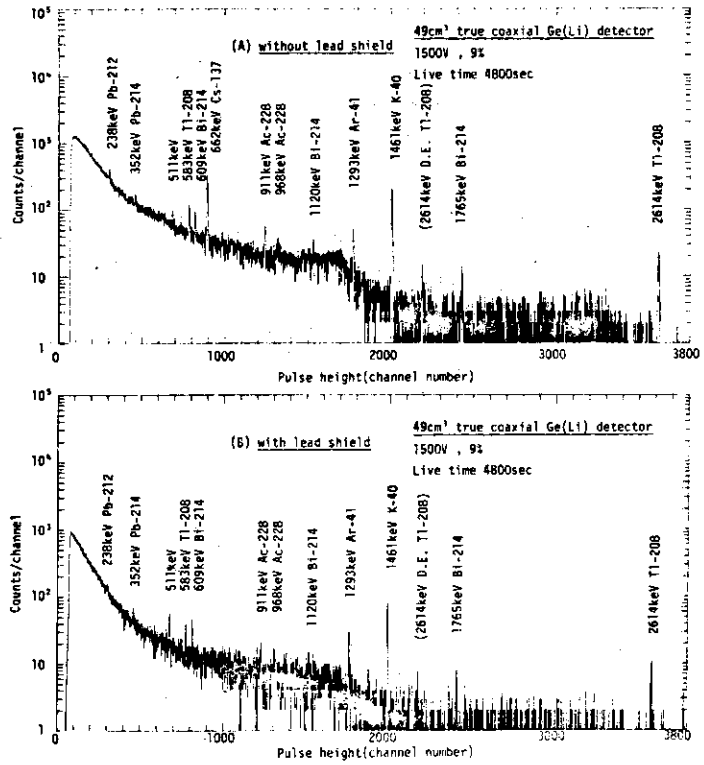


Fig.6.2.2 Pulse height distributions of in-situ environmental gamma-rays obtained by 49cm³ coaxial Ge(Li) detector without and with a lead shield to suppress gamma-rays from the soil

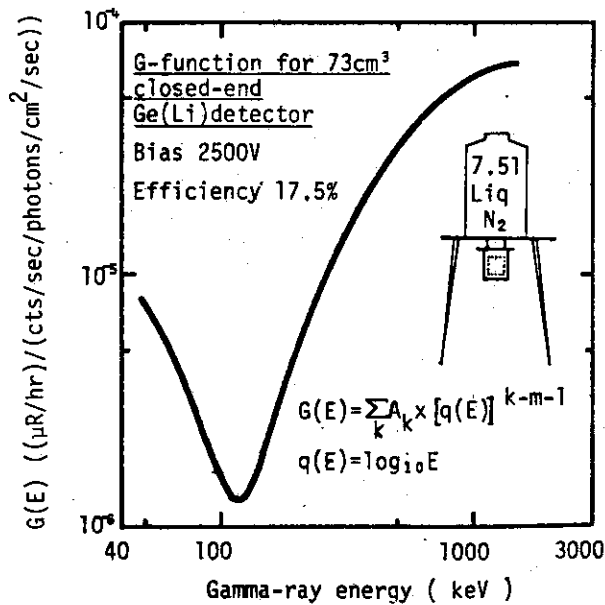


Fig.6.3.1 Spectrum-to-dose rate conversion operator value function G(E) for 73cm³ closed-end coaxial Ge(Li) detector