

# 野外における $\gamma$ 線スペクトルの携帯型連続測定システムの開発

高橋春男\*・細野米市\*\*

## A Prototype of Portable System for Continuous Measurement of $\gamma$ -ray Spectra in the Field

Haruo TAKAHASHI\* and Yoneichi HOSONO\*\*

### はじめに

ラドン (Rn) は、不活性気体であり、天然にはアクチニウム系列の  $^{219}\text{Rn}$  (慣用名はアクチノン, 半減期  $T^{1/2}$ ; 3.96 秒), トリウム系列の  $^{220}\text{Rn}$  (慣用名はトロン,  $T^{1/2}$ ; 55.6 秒), ウラン系列の  $^{222}\text{Rn}$  (慣用名はラドン,  $T^{1/2}$ ; 3.82 日) の 3 種の同位体が存在し, いずれも  $\alpha$  線を放出して崩壊する. これらの同位体のうち,  $^{219}\text{Rn}$  は, 出発核種である  $^{235}\text{U}$  の天然における存在率が 0.72% と小さいため, 通常その存在率は極めて小さい.

火山活動に伴う現象に対して,  $^{220}\text{Rn}$  および  $^{222}\text{Rn}$  を用いてなされたこれまでの研究としては, 噴火活動によって放出された噴石や溶岩の脱ガス率の推定 (例えば, 佐藤ほか, 1992; 高橋ほか, 1993), あるいは地熱地帯における噴気ガスや温泉ガスによる地熱流体の挙動の推定についての研究 (Yoshikawa *et al.*, 1990; 吉川ほか, 1992) などがある.

$^{220}\text{Rn}$  および  $^{222}\text{Rn}$  の半減期が大きく異なることを利用した研究は, 地球科学的諸現象の解明に対し寄与することが期待される. 例えば, 噴気や噴煙中の  $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$  比は, 火山活動の推移やマグマの上昇率などを推定する手がかりになりえる. また, 土中空気や地下水中の  $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$  比は, 応力変化に伴う地下深部の状態変化に起因する物質移動の速度やその変化などを反映することが予想され, その結果地下深部の状態変化の程度を知る一助になると考える.

このような変化を捉えるためには,  $^{220}\text{Rn}$  および  $^{222}\text{Rn}$  の野外における長期連続測定が不可欠である. しかしなが

ら,  $^{220}\text{Rn}$  および  $^{222}\text{Rn}$  の  $\alpha$  線は, 空気に対しても 8 cm 程度の透過力しかなく, 極く薄いカバーで簡単に止められてしまう. そのため, 防塵や降雨対策を施す必要のある野外において, 検出器での直接測定は事実上不可能である. 一方,  $^{220}\text{Rn}$  は半減期が 0.158 秒の  $^{216}\text{Po}$  から同 10.64 時間の  $^{212}\text{Pb}$ , 同 60.55 分の  $^{212}\text{Bi}$ , 同 3.05 分の  $^{208}\text{Tl}$  へと壊変する. また,  $^{222}\text{Rn}$  は, 主として半減期 3.10 分の  $^{218}\text{Po}$  から同 26.8 分の  $^{214}\text{Pb}$ , 同 19.9 分の  $^{214}\text{Bi}$  へと壊変して行く.

これらの娘核種のうち,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  は, 測定が比較的容易な強さの  $\gamma$  線を放出する. 透過力の大きい  $\gamma$  線を測定することは, 検出器をアルミニウムケースなどで密封することが可能であり, 計数誤差や故障の要因である土埃や雨水あるいは結露などを防ぐことができる. ただし,  $\gamma$  線の測定では, 娘核種が半減期を待ったため, ラドンの直接測定に比べて多少時間的なずれは生じるが,  $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$  比の相対的な変化を観察する目的に対しては, 大きな障害にはならないと考える.

現在, 野外での連続測定が可能とされている  $\gamma$  線測定装置の多くは, 商用電源を利用するものか, あるいはバッテリーで駆動するものである. しかし, バッテリー駆動であっても装置の消費電力が大きく, 測定時間はせいぜい数時間ないしは十数時間であるものがほとんどである.

そこで, これらの点を改善した  $\gamma$  線の野外長期連続観測システムを製作するために, そのプロトタイプを作り基本的な性能について検討を加えた. 本報ではその検討結果について報告する.

### システムの概要と特徴

測定核種としては,  $\gamma$  線エネルギーが近接しており, 計数効率や自己吸収率が大きく異なる  $^{214}\text{Bi}$  の 609 keV,  $^{208}\text{Tl}$  の 583 keV の  $\gamma$  線を対象とした.

硫化亜鉛-銀 (ZnS (Ag)) やヨウ化ナトリウム-タリウム (NaI (Tl)) などは, 放射線が入射すると発光 (シンチレー

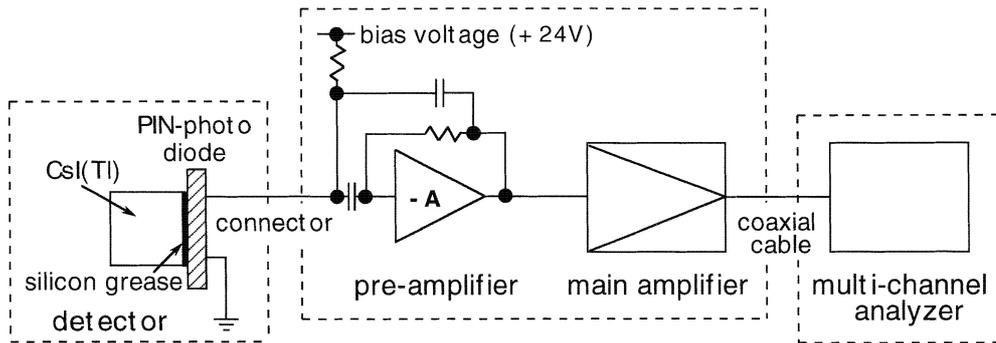
2000 年 9 月 28 日受付, 2000 年 10 月 14 日受理.

\* 東京大学地震研究所地球ダイナミクス部門,

\*\* 東京大学大学院工学系研究科.

\* Division of Global Dynamics, Earthquake Research Institute,

\*\* Graduate School of Engineering, University of Tokyo.



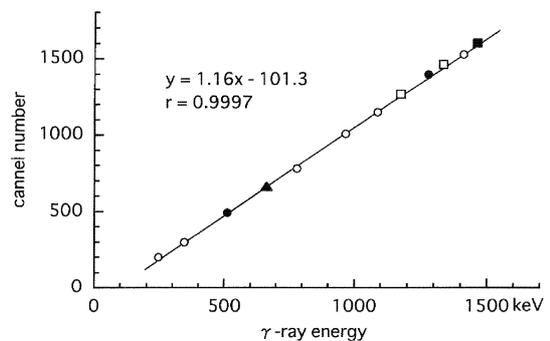
**Fig. 1** The block diagram of the present system. Each part, shown by square of dotted line, is independently enclosed in a case. When the system is used, those parts are connected with connector or coaxial cable. The detector consists of a CsI(Tl) scintillator (10 mm×10 mm×10 mm) and a PIN-photo diode (10 mm×10 mm). The pre-amplifier and the main amplifier are designed for this system, and the multi-channel analyzer is type 8000 A, Amptek CO., LTD..

ション)する。そのため、これらの化合物は、一般に放射線計測用固体シンチレータとして用いられている。

試作した検出器には、ヨウ化セシウム-タリウム (CsI (Tl)) シンチレータと小型で高圧電源を必要としない光電素子である PIN 型フォトダイオード (以下 PD と略す) とを組み合わせて用いた。

CsI (Tl) シンチレータの大きさは、縦・横・高さとも 10 mm×10 mm×10 mm である。PD に接する 1 面は、光の透過率を上げるため透明になるまで研磨してある。他の 3 面は、光の反射をよくするためヤスリをかけて不透明にしてある。CsI (Tl) シンチレータと PD とは、少量のシリコングリスを用いて接着させ光の損失をも少なくしている。また、シンチレータ内で発光した光をより効率よく反射させ、同時に CsI (Tl) シンチレータと PD とを固定するため、全体を反射効率の高い白色テフロンテープで幾重にも巻いてある。固定された CsI (Tl) シンチレータと PD とは、外部からの光による影響を避けるためにアルミニウム製の円筒ケースに入れて完全に遮光してある。アルミニウムケースは、CsI (Tl) シンチレータが極くわずかではあるが潮解性があるため、O リングを用いて完全に密封できるようにしてある。CsI (Tl) シンチレータを取り付けた PD は、コネクターで直接プリアンプに接続される。湿度や気温の影響を少なくするため、プリアンプ、メインアンプおよびマルチチャンネルアナライザーは、使用に際して断熱材で内張したそれぞれの保護ケースに乾燥剤とともに納められる。

PD からの出力は、プリアンプで電圧信号に変換される。使用したプリアンプは、細野・中沢 (1989) による試作器をもとに、このシステムのために改良されたものである。プリアンプには、feed back に 1 pF (pico-farad) のコンデンサーを用いている。チャージアンプの場合の S/N 比として用いられる等価雑音電荷 (ENC) の値は、PD 接続時で最高  $1 \times 10^{-16}$  C (coulomb) であり、S/N 比が極めて



**Fig. 2** The relation between  $\gamma$ -ray energy of measured nuclides and channel number of the multi-channel analyzer corresponding to the energy. It gives essentially straight line. This result shows the present system has enough detection efficiency. Measured nuclides are  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  and  $^{40}\text{K}$ , which are shown as  $\bullet$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\square$ ,  $\circ$  and  $\blacksquare$ , respectively.

良好であることを示している。

プリアンプの電圧信号は、メインアンプに組み込まれている試作された波形整形回路および増幅器で波形整形・増幅される。その信号は、電池駆動の Amptek 社製 8000 A 型ポケット・マルチチャンネルアナライザーにより波高分析され、内蔵メモリーに記録される。

システムへの電力は、太陽発電モジュールで充電している小型バッテリーから供給される。

Fig. 1 にシステムの概略図を示す。点線で囲まれている部分は、それぞれ独立しており、使用に際してはコネクターあるいは同軸ケーブルを用いて互いに接続される。

検出部のケースの大きさは、CsI (Tl) シンチレータと PD の入る部分が直径 29 mm、高さ 25 mm、肉厚 0.5 mm、コネクターを取り付ける部分が直径 42 mm、高さ 8 mm で、二つの円筒を重ねた形状である。プリアンプとメインアンプは、それぞれ 100 mm×100 mm×50 mm のアルミニウムケースに収められている。ただし、プリアンプおよびメインアンプの大きさは、回路構成を改良することに

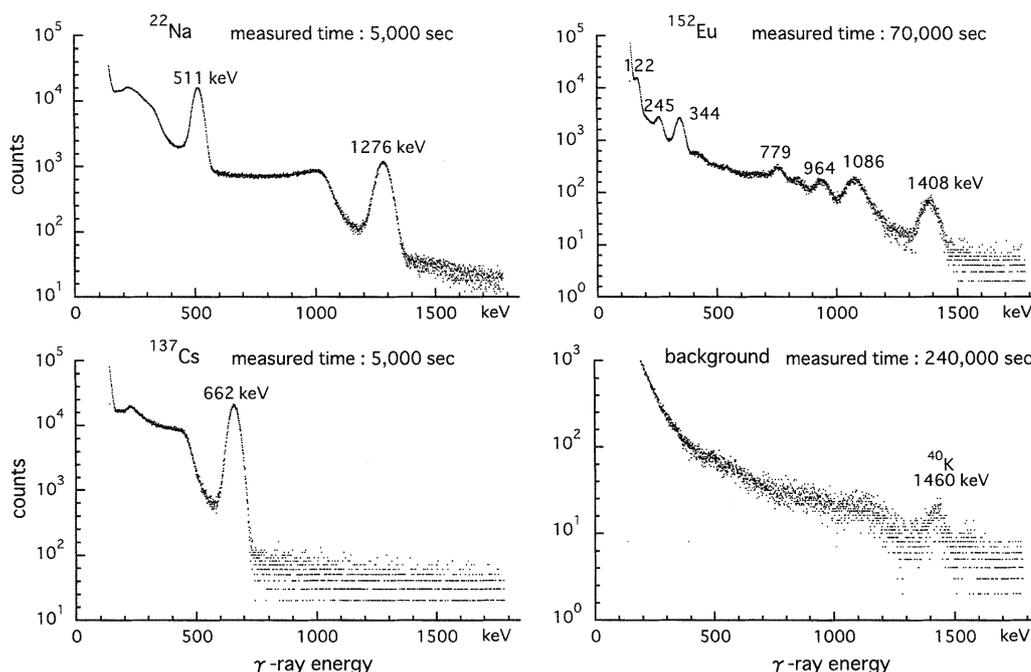


Fig. 3 Pulse height spectra for  $\gamma$ -ray of  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  and of background. Measured time depends on intensity of radioactivity. The peak of 1460 keV in the spectrum of background has influence of  $^{40}\text{K}$  contained in surrounding concrete.

よってさらに小型化することが可能である。マルチチャンネルアナライザは、68 mm×163 mm×20 mm である。

データは、ノート型パソコンに取り込んだ後、それぞれの核種についてピーク解析をする。

### 測定結果と考察

システムの消費電力の総量は、1 W 以下（電流値は 0.1 A 以下）であり、12 V 24 Ah の密閉式小型バッテリーを縦・横 35 cm×38 cm の太陽電池モジュールで充電しながら使用することにより、1 ヶ月以上の連続測定が可能である。

Fig. 2 は、標準線源  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  および KCl 中の  $^{40}\text{K}$  の測定結果から求めたチャンネル数と  $\gamma$  線エネルギーとの相関図である。得られた回帰直線および相関係数は、十分な直線性を示している。この結果は、システムの安定性が高いことを示している。

Fig. 3 は、本システムによって測定した  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  およびバックグラウンドのガンマ線スペクトルである。測定時間は、試料の放射能強度によって決められたものであり、参考のために示してある。 $^{22}\text{Na}$  の 511 keV と  $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV のピークおよび  $^{152}\text{Eu}$  の 245 keV と 344 keV のピークは、それぞれよく分離している。バックグラウンドには  $^{40}\text{K}$  の 1,460 keV を除いて顕著なピークはみられない。 $^{40}\text{K}$  のピークは、周囲のコンクリートに含まれているカリウムの影響である。

Table 1 は、エネルギー分解能を FWHM (full width at

Table 1. The measured values of FWHM (full width at half maximum). Those values shows energy resolution of the present system.

nuclide	$\gamma$ -ray energy	energy resolution
$^{152}\text{Eu}$	245 keV	28.4 %
	344	19.5
$^{22}\text{Na}$	511	10.9
	1276	5.09
$^{137}\text{Cs}$	662	8.20
	1173	5.80
$^{60}\text{Co}$	1332	4.56
	1460	3.70

half maximum) で表した値である。なお、エネルギー分解能 FWHM の値は百分率で表してある。 $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  にはそれぞれ標準線源を用い、 $^{40}\text{K}$  には KCl を用いた。低エネルギー部には適当な線源がないため、 $^{152}\text{Eu}$  の 245 keV および 344 keV を用いた。得られた分解能と Fig. 3 の結果とを合わせて検討した結果、測定対象とする  $^{208}\text{Tl}$  583 keV と  $^{214}\text{Bi}$  609 keV とのピークを分離するために大きな支障は認められない。

Fig. 4 は、 $\gamma$  線エネルギーと表 1 のエネルギー分解能 (FWHM) の値との関係を図示したものであり、測定したエネルギーの範囲では、ほぼ直線関係にある。この結果か

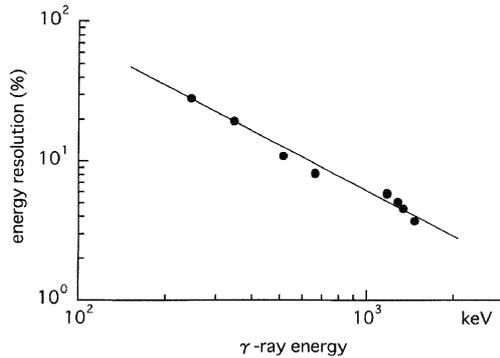


Fig. 4 Energy resolution (FWHM (%)) for  $\gamma$ -ray. The energy resolution of the present system shows the straight line in figure.

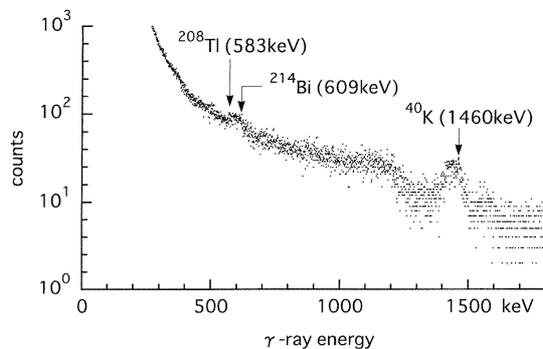


Fig. 5 Pulse height spectrum for  $\gamma$ -ray of cinder from Mt. Fugen-dake at Unzen in 1991. The counting rate is very low, because volume of the CsI (Tl) scintillator and size of the PIN-photo diode are small. However, peaks of  $^{208}\text{Tl}$  (583 keV) and  $^{214}\text{Bi}$  (609 keV) can be recognized slightly except that of  $^{40}\text{K}$ .

ら計算される測定対象核種のエネルギー分解能は、 $^{208}\text{Tl}$  583 keV では 10.7%,  $^{214}\text{Bi}$  609 keV では 10.2% である。

Fig. 5 は、1991 年雲仙普賢岳の噴火の際に採取された噴石試料を試作システムで測定して得られた  $\gamma$  線スペクトルである。今回検出器として用いた CsI (Tl) シンチレータおよび PD の大きさが小さいため計数効率が低く、必ずしも十分な測定結果とはいえないが、この点は、CsI (Tl) シンチレータおよび PD を大きくすることにより解決できる

ものとする。ちなみに、現在比較的容易に入手できる 28 mm  $\times$  28 mm  $\times$  28 mm の CsI (Tl) シンチレータと 28 mm  $\times$  28 mm の PD とを組み合わせてもちいるならば、計数効率は単純計算で約 22 倍となり、十分実用に供することができるものとする。

## ま と め

試験的に製作された本システムは、総消費電力・装置の安定性・大きさなど、野外における  $\gamma$  線スペクトルの連続測定装置として一応の性能が得られている。今回は費用の関係で用いなかったが、低い放射能強度に対し精度のよい測定を行うためには、CsI (Tl) シンチレータおよびフォトダイオードを可能な限り大きくする必要がある。ただし、フォトダイオードが大きくなるとバイアス電圧が高くなり、暗電流や浮遊容量の増加によって、S/N 比（等価雑音電荷）が悪化する可能性がある。そのため、プリアンプの設計を変更する必要がある。それに付随する技術的な問題を解決する必要がある。さらに、精度が特に高く、温度の影響を受けにくい電子部品を使用することにより、分解能を向上させることが可能であるとする。

謝 辞：検出器のケースを作成するにあたっては、地震研究所技術開発室および同室の内田正之氏のお世話になった。測定の一部は、東京大学アイソトープ総合センターで行った。記して謝意を表します。

## 文 献

- 細野米市・中沢正治, 1989, Photodiode を用いたシンチレーション検出器用低ノイズプリアンプの開発とその応用, *RADIOISOTOPES*, **38**, 117-122.
- 佐藤 純・高橋春男・佐藤和郎, 1992, マグマからのラドンの脱ガス, 『環境ラドン』, 電子科学研究所, 124-131.
- 高橋春男・松本和康・佐藤 純, 1993, 雲仙普賢岳噴出物のラドン脱ガス率, *火山*, **38**, 135-137.
- Yoshikawa, H., Endo, K. and Nakahara, H., 1990,  $^{220}\text{Rn}$  and  $^{222}\text{Rn}$  in volcanic gas, In: *Geochemistry of gaseous elements and compounds*, Durrance, B. M. (ed.): Theophrastus Publications, S. A., Greece, 149-161.
- 吉川秀樹・小林利夫・末松啓介・中原弘道, 1992, 噴気ガス中の  $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$ , 『環境ラドン』, 電子科学研究所, 132-139.