

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 血液をはかる

July 1991 ■ No.3

ヨウ化セシウムを使った
放射線サーベイメーター (PA-100)

A Radiation Survey Meter Using Cesium
Iodide PA-100

板谷紀雄・青山剛士

Norio ITATANI, Takeshi AOYAMA

(Pages 91-99)

株式会社 堀場製作所

ヨウ化セシウムを使った放射線サーベイメーター (PA-100)

A Radiation Survey Meter Using Cesium Iodide PA-100

板谷紀雄・青山剛士

Norio Itatani, Takeshi Aoyama

要 旨

固体シンチレーターとして、ヨウ化セシウムを採用した放射線サーベイメーター (PA-100) について報告する。

従来のシンチレーション式サーベイメーターには、ヨウ化ナトリウムを固体シンチレーターとして使用していたが、光電子増倍管を必要とするため小型化が困難であった。このたび開発した PA-100 では、ヨウ化セシウムとフォトダイオードを組み合わせることにより、小型で高性能な放射線サーベイメーターを実現することができた。本稿では、PA-100 が開発された経緯と基本的な動作原理や機能などについて紹介する。

Abstract

This paper introduces the Model PA-100, a radiation survey meter that uses cesium iodide as a solid-state scintillator. Conventional scintillation-survey meters have used sodium iodide as the solid-state scintillator. However, since this requires a radiation-sensitive device in the photomultiplier tube, it had proven difficult to make the equipment compact. The new PA-100 has solved this problem with the use of cesium iodide in conjunction with a photodiode, resulting in a radiation survey meter that is compact, powerful, and efficient.

1. はじめに

サーベイメーター (Survey Meter) とは、何かを検知する計器という意味である。したがって、放射線サーベイメーターとは放射線検知器のことである。少し詳しくいえば、測定場所におけるいろいろな方向、あるいは限られた地点からやってくる放射線の数 (線量) や密度 (線量率: 単位時間当たりの線量) を計測して、その値を表示する計器である。

放射線サーベイメーターには、放射線を検知するための検出器が組み込まれており、一般に電離箱や GM 計数管、固体シンチレーターなどが使われている。

現在市販されている多くのシンチレーション式サーベイメーターには、固体シンチレーターとしてヨウ化ナトリウム (以後 NaI(Tl) と記述する) が使用されているが、このたび当社が開発した放射線サーベイメーター (PA-100) では、ヨウ化セシウム (以後 CsI(Tl) と記述する) を採用したことが大きな特長となっ

ている。しかも、JIS Z 4333規格にほぼ準拠しており、小型でかつ高性能と高い信頼性を誇っている。また、従来の放射線サーベイメーターは、専門分野の人達を対象としているのに対し、PA-100の取り扱いはいたって簡単で、一般の人達が誰でも手軽に放射線を測定することができる。

PA-100の測定範囲は0.000～9.999マイクロシーベルト/時 ($\mu\text{Sv/h}$) で、通常の自然放射線の100～200倍程度までを測定することができる。また、アナログの出力端子を設けているので、波高分析器に接続してエネルギースペクトルを観察することもでき、教育用、研究用としても利用することができる。

本稿では、PA-100が開発された経緯と基本的な動作原理や機能などについて紹介する。

2. よみがえったシンチレーター

シンチレーターに放射線が入射するとシンチレーション光が発生する。そのシンチレーション光を数えれば放射線サーベイメーターができるわけであるが、詳しい内容については後述する。ここでは、シンチレーターにCsI(Tl)が採用された経緯について述べる。

2.1 カロリメーターへの適用

CsI(Tl)は固体シンチレーターとして約40年前に発明されたが、高額なためにあまり普及しなかった。ところが、1982年頃から高エネルギー物理の研究における検出器(カロリメーター)として、CsI(Tl)が有効であることが指摘され始め、¹⁾1985年にセンセーショナルに「Properties of CsI(Tl)-Renaissance of an Old Scintillation Material」という論文が発表され、²⁾まさによみがえったシンチレーターとなったのである。

当社にとってこの始まりは、コーネル大学との接触であった。1986年にコーネル大学からCsI(Tl)のカロリメーターへの適用の本格的なレポートが発表され³⁾、その中でCsI(Tl)で発生する光の受光素子としてフォトダイオードが採用されていた。それは、フォトダイオードが光電子倍增管と違って磁場の影響を受けないため、超伝導磁石の内側に設置することができ、測定の精度を極めて高くすることができたためであった。そして、その年の7月にコーネル大学から一辺が5～6cm、長さは25～30cmという大きなCsI(Tl)4000本を受注することになったのである。図1に、コーネル大学から受注したCsI(Tl)の外観を示す。



図1 コーネル大学向け大型CsI(Tl)シンチレーター
Large-scale CsI(Tl) scintillator at Cornell University

2.2 放射線サーベイメーターへの応用

私達がCsI(Tl)の実験を始めたのは1986年の9月頃からである。実験を始めてすぐに極めて注目すべき結果が得られた。図2に、そのときの測定結果を示す。それは100keV以下のエネルギーがノイズのために測定不能となることであった。この事実は、CsI(Tl)とフォトダイオードの組み合わせによる商品展開が、低エネルギー γ (X)線に対して極めて困難であることを示していた。

ところが、ここに一筋の光明がさしかけてきた。¹³⁷Cs(γ 線:662keV)が検出できればよいというニーズが出てきたのである。また、検出器の形状を可能な限り小さくし、測定器全体を小型化してほしいという要望も現れた。まさにCsI(Tl)とフォトダイオードの登場ということになるわけである。すなわち、100keV以下のエネルギーが測定できなくても、比較的エネルギーの高い自然

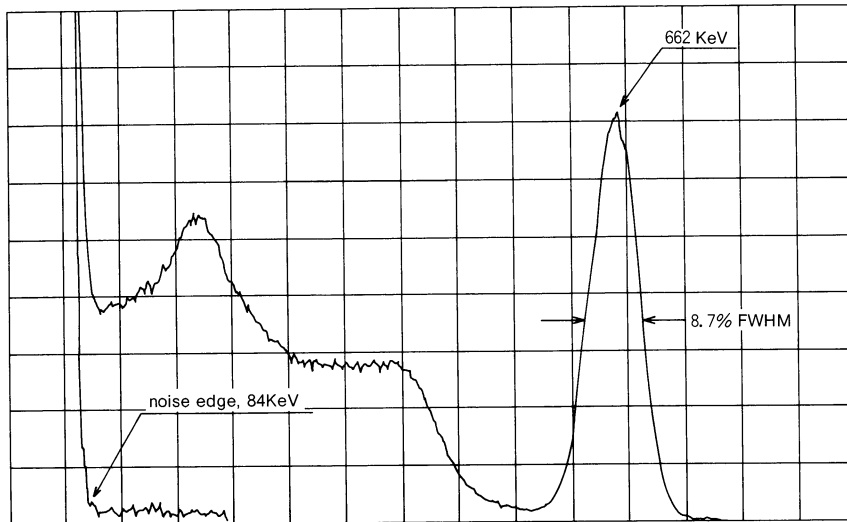


図2 フォトダイオードと組み合わせたCsI(Tl)シンチレータによる¹³⁷Csのエネルギースペクトルの測定結果の一例
Example of measurement results of ¹³⁷Cs energy spectrum using photodiode and CsI(Tl) scintillator

放射線や既知のエネルギーを測定する非破壊検査などに用途があるのではという希望が出てきたのである。

下記の英文は、当時私達がしばしば交信していたコーネル大学の Dr. Stone 氏にあてた手紙の一部である。私達が CsI(Tl) の応用についていろいろ考えをめぐらしていた様子がうかがえる。当時の検出器の構造を図3に示す。

Now we are pleased to inform you about our activities.

Challenge for the small CsI (Tl) detector of low energy and high energy resolution counter.

For example, a1/2" dia x 1"H CsI (Tl) coupled with first stage of preamplifier gave us the resolution less than 9 % for Cs-137 662 KeV gamma ray and it is used in nuclear plant to study radiation leakage or contamination.

Other applications are as follows : checking quality of water in soil, searching defective point on water pipe, geological survey, measuring underwater activity on the bottom of the sea.

1988年に入ると商品化への動きが活発になり、自然放射線の測定に的を絞って回路の検討やフォトダイオードの選定などを開始した。そして、翌年の1989年の5月に放射線サーベイメーターの試作器と簡易型の波高分析器の試作器が完成した。図4に放射線サーベイメーターの試作器の外観を示す。しかし、試作器の放射線サーベイメーターとしての機能は、放射線を計数して数を表示するというもので、まだ1 cm線量当量(率)への単位換算などはしていないものだった。そして、1990年12月に機能を追加・改良した、現在のPA-100が完成したのである。図5に、PA-100の外観を示す。

3. フォトダイオードとの名コンビ

シンチレーション式サーベイメーターの検出器は、シンチレーターとシンチレーターからの光(シンチレーション光)を電気信号に変換する変換器で構成されている。

現在市販されている多くのシンチレーション式サーベイメーターは、シンチ

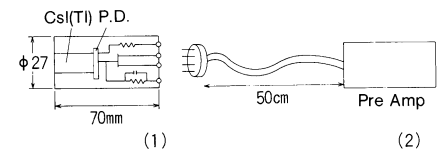


図3 CsI(Tl)シンチレータ+フォトダイオードおよび電荷増幅器の初段部を組み込んだセンサー部と、前置増幅器部とを分離したサーベイメーターヘッド
(1) Sensor portion, incorporating a CsI (Tl) scintillator, a photodiode, and a first stage of the charge sensitive amplifier, and (2) the preamplifier portion, with a separate survey meter head.

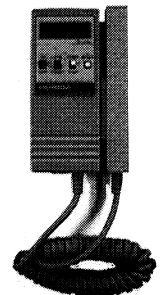


図4 試作した分離型放射線サーベイメーター
Experimental free-standing radiation survey meter



図5 放射線サーベイメーター (PA-100)
The PA-100 radiation survey meter

レーターに NaI(Tl), 変換器に光電子増倍管を使用しているが, PA-100はシンチレーターに CsI(Tl), 変換器にフォトダイオードを採用したのは前述した通りである. 図6にそれぞれの検出器の構成を示す.

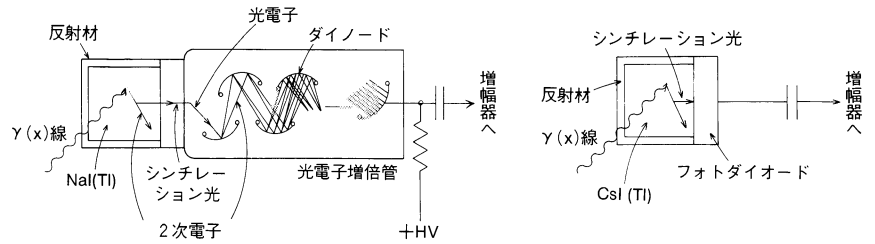


図6(A) NaI(Tl)と光電子増倍管を組み合わせた検出器
Sensor using NaI(Tl) and a photomultiplier tube
図6(B) CsI(Tl)とフォトダイオードを組み合わせた検出器
Sensor using CsI(Tl) and a photodiode

図6 シンチレーターを使った放射線検出器の基本構成
Basic configuration of a radiation detector using a scintillator

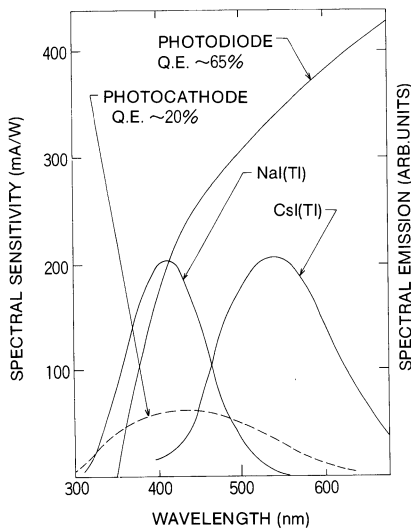


図7 シンチレーターの発光強度スペクトルと光検出器の感度スペクトル
Emission spectral of the scintillators and spectral sensitivity of the light sensor

3.1 光電子増倍管とフォトダイオードの違い

図6から両者を構造的に比較すると, 光電子増倍管よりフォトダイオードの形状が圧倒的に小さいこと, またフォトダイオードには高圧電源が不要で, 小型化に有利なことがわかる. しかし, 本質的かつ重要な違いはシンチレーターと, 光電子増倍管またはフォトダイオードとの特性の違いにある.

表1は, よく用いられる無機シンチレーターの特性を比較したものである.⁴⁾ 表1より, CsI(Tl)とNaI(Tl)のシンチレーション効率はほぼ同等であることがわかる. CsI(Tl)を光電子増倍管と組み合わせた場合のパルス波高は, NaI(Tl)と光電子増倍管の組み合わせによるパルス波高の1/2程度しか得られない. しかし, CsI(Tl)とフォトダイオードを組み合わせると逆にNaI(Tl)とフォトダイオードの組み合わせに比べて, 2倍以上大きくなる特長をもっている. これは, 図7で示すように光電子増倍管の受光感度の最大波長が400nm付近で, NaI(Tl)の最大放出(発光)波長の415nmと整合しているのに対し, CsI(Tl)の最大放出(発光)波長は540nm付近で, 光電子増倍管の受光感度よりもフォトダイオードの受光感度が高いためである.³⁾ これこそが, フォトダイオードとCsI(Tl)が名コンビであるといわれる所以である.

物質	比重	最大放出波長 λ_{max} (nm)	λ_{max} での屈折率	主減衰定数 (μs)	立ち上がり時間 (10-90%) (μs)	全光収率 (光子) (MeV)	高速電子に対する絶対シンチレーション効率	バイアルカリ光電子増倍管による相対的ガンマ線パルス波高
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	0.5	38000	11.3%	1.00
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	1.0	4	52000	11.9	0.49
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.63	4	39000	11.4	1.11
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	—	11000	2.8	0.23
BGO	7.13	505	2.15	0.30	0.8	8200	2.1	0.13
BaF ₂ slow component	4.89	310	1.49	0.62	3	10000	4.5	0.13
BaF ₂ fast component	4.89	220	—	0.0006	—	—	—	0.03 ^a
Zns(Ag)(polycrystalline)	4.09	450	2.36	0.2	—	—	—	1.30 ^b
CaF ₂ (Eu)	3.19	435	1.44	0.9	4	24000	6.7	0.78
CsF	4.11	390	1.48	0.004	—	—	—	0.05
Li glass ^c	2.5	395	1.55	0.075	—	—	1.5	0.10
比較のため典型的なプラスチックシンチレーターの値を示す.								
NE102A	1.03	423	1.58	0.002	—	10000	3.0	0.25

表1 よく用いられる無機シンチレーターの特性
Characteristics of a commonly-used inorganic scintillator

a: 紫外線に感じる光電子増倍管
b: アルファ粒子に対する値
c: 特性に変化あり

3.2 CsI (Tl) とフォトダイオードの特長

CsI (Tl) とフォトダイオードの特長をまとめてみると、

<CsI(Tl)>

- ①吸湿性が少ない。
- ②機械的衝撃や温度衝撃に強く、加工しやすい。
- ③密度が大きく、単位長当たりの γ (X) 線の吸収も大きい。
- ④発光量が多い。(1 MeV 当たり約50,000個のシンチレーション光が発生する)
- ⑤放出 (発光) 波長がフォトダイオードと整合する。

<フォトダイオード>

- ①高圧電源が不要 (数10V 程度でよい)。
- ②磁気遮蔽が不要。
- ③形状が小さい。
- ④光電子増倍管に比べて低価格。

などが挙げられる。これらを総合すると CsI(Tl)とフォトダイオードの組み合わせは、加工・組立のしやすさと小型化が可能な点に最大の特長があるといえる。

一方、CsI(Tl)とフォトダイオードにはそれぞれ問題点もある。① CsI(Tl)のシンチレーション光は、ほかの固体シンチレーターに比べて減衰時間が長いこと、高計数率の測定には不向きであること。②フォトダイオードは常温でのリーク電流が数 nA あり、しかもリーク電流は熱的に生成される電荷キャリアのため強い温度依存性を持つ。さらに、70pF 程度の接合容量を持つため光電子増倍管に比べると S/N 比が悪く、100keV 以下のエネルギー領域での測定が困難なことである。

減衰時間については、CsI(Tl)の特性であり避けることができないが、フォトダイオードのリーク電流については、フォトダイオードを冷却することで大幅に低減できる。しかし実際には、フォトダイオードを冷却すると同時に CsI(Tl)も冷却されるため、CsI(Tl)のシンチレーション効率が低下する。結局、総合的な特性は図 8 で示すように、常温付近の特性が最良となるため、リーク電流の対策も難しいのが現状である。³⁾

しかしながら、自然放射線のように低計数率で、比較的高いエネルギーの放射線を測定する用途においては、これらの問題点よりも逆に小型化できるメリットの方が大きく、CsI(Tl)とフォトダイオードは自然放射線の測定に適した組み合わせだといえる。

4. PA-100の基本構成と特長

放射線サーベイメーターには、シンチレーション式のほかに電離箱式や GM 計数管式などのいろいろな種類がある。形状も一体型と分離型があり、用途によりそれぞれの特長に応じた使い分けがされている。しかし、現在市販されている多くの放射線サーベイメーターは、全体的に大型で取り扱いが少し難しく、専門的な知識も要求されるため、誰でも手軽に操作でき小型で高性能な放射線サーベイメーターが要望されていた。PA-100は、これらの要望を満足させるために、CsI(Tl)とフォトダイオードの組み合わせによるメリットを生かして、小型で操作性が良く、多機能な放射線サーベイメーターを実現した。

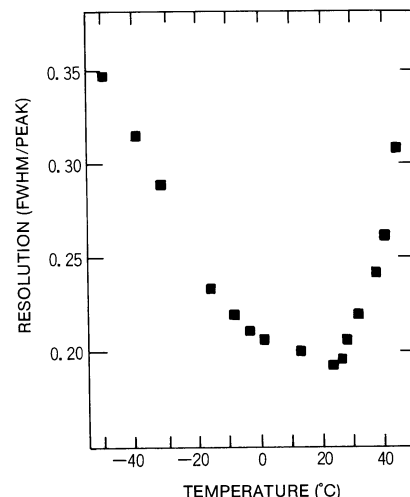


図 8 CsI(Tl)とフォトダイオードを組み合わせた検出器のエネルギー分解能の温度特性
Temperature characteristics of the energy resolution of a CsI(Tl)+photo-diode

4.1 PA-100の基本構成

図9にPA-100のブロック図を示す。γ(X)線がCsI(Tl)に入射するとシンチレーション光が発生し、そのシンチレーション光をフォトダイオードで電気信号に変換する。変換された信号はプリアンプとリニアアンプで増幅・波形整形され、γ(X)線のエネルギーに比例したパルス波高となる。ここで、あるエネルギーレベル以上のパルス波高のみカウンターでカウントし、ワンチップマイコンに単位時間当たりのカウント数が入力される。最後にワンチップマイコンで平均値の計算や感度差の補正などを処理し、単位を1cm線量当量(率)に換算してμSv(/h)の単位で測定値を液晶表示器に表示している。

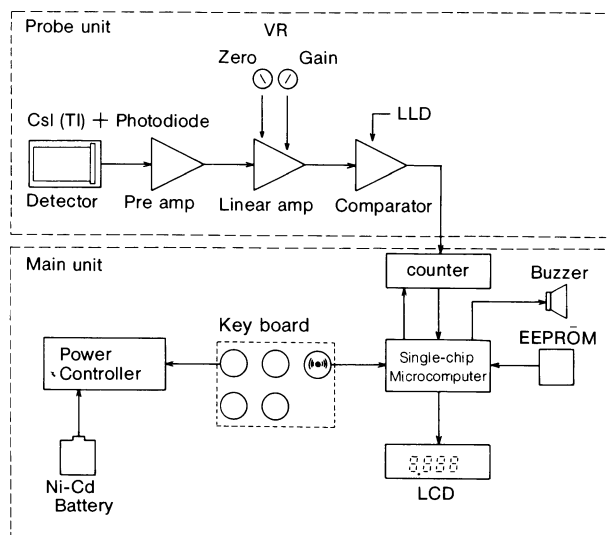


図9 PA-100の全体構成
Block diagram

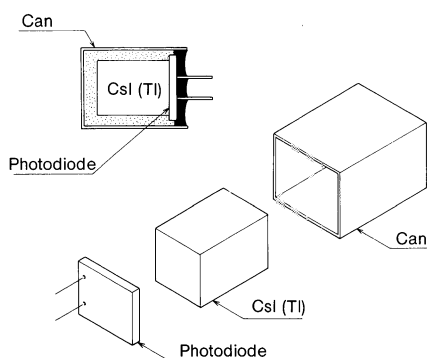


図10 PA-100のセンサー部の構造
The PA-100 sensor

4.2 本体部の構成

本体部は、ワンチップマイコンを中心としたデジタル回路と電源回路で構成されている。ワンチップマイコンは演算処理のほかに液晶表示器やキー入力、ブザーの制御などを行っている。設定値や補正係数などのデータは電氣的消去・書き込み可能な読み出し専用のメモリー（EEPROM: Electrically Erasable and Programable ROM）に書き込まれており、電池の有無にかかわらず保持され、簡単に変更することも可能である。

本体裏側には単3型のNi-Cd電池が4本挿入でき、外部に取り出して専用充電器で充電することができる。

4.3 プローブ部の構成

プローブ部は、検出器、プリアンプ、リニアアンプで構成され、アナログ回路の全てがプローブ内に組み込まれている。

図10に検出器の構造を示す。検出器はCsI(Tl)で発生したシンチレーション光を効率よくフォトダイオードに集光するため、CsI(Tl)の回りに反射材を巻いている。

プリアンプの等価回路を図11に示す。プリアンプは電荷増幅型とし、相互コンダクタンス(g_m)の大きい電界効果型トランジスタを採用している。これは、フォトダイオードのように接合容量が大きく、リーク電流も大きい素子でS/N比を高くするために、初段でできる限りの増幅度をもたせるためである。

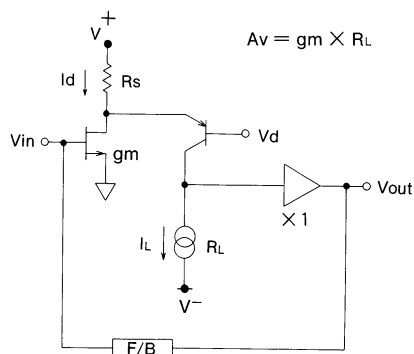


図11 PA-100の前増幅器の等価回路
Equivalence circuit of the PA-100 preamplifier

リニアアンプは、ポールゼロ消去回路、波形整形回路、ベースライン再生回路、下限弁別器などで構成されている。低計数率の放射線サーベイメーターとしてだけの用途であれば、ポールゼロ消去回路やベースライン再生回路はとくに必要ないが、外部にリニアアンプの出力信号を取り出すことを考慮して搭載している。したがって、リニアアンプの出力信号を波高分析器に接続すればエネルギースペクトルを観察することも可能である。

4.4 PA-100の機能及び仕様

PA-100には、ワンタッチで誰でも手軽に測定できる各種の機能がある。

図12に操作部と表示部の外観を示す。

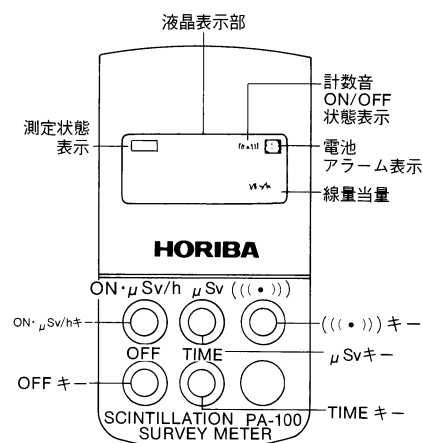


図12 PA-100の操作部と表示部
The PA-100 control panel and readout

(1) 1 cm 線量当量率の表示 ($\mu\text{Sv/h}$)

放射線の統計的変動を抑えて読みとりやすい表示にするため、移動平均値を求めて表示している。また、オプションで電源を入れてからの平均値を表示することもできる。

(2) 1 cm 線量当量の表示 (μSv)

電源を入れてからの1 cm 線量当量の積算値を表示することができる。

(3) 測定時間の表示

電源を入れてからの測定時間を「時：分」で表示することができる。

(4) 放射線の計数音

放射線を計数する毎に“ピッ”という計数音を出すことができる。

(5) アナログ出力端子

リニアアンプの信号を出力している。波高分析器に接続すれば、放射線のスペクトルを観察することができる。

表2にPA-100の仕様を、図13に方向特性とエネルギー特性をそれぞれ示す。

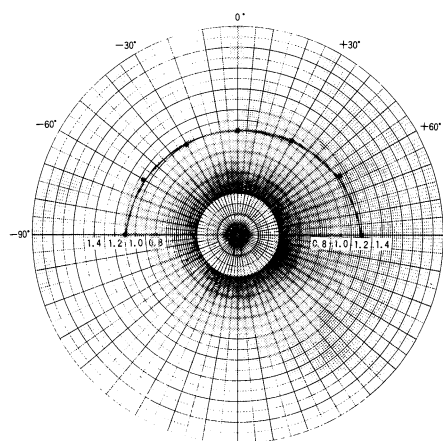


図13(A) 垂直方向特性
Vertical characteristics

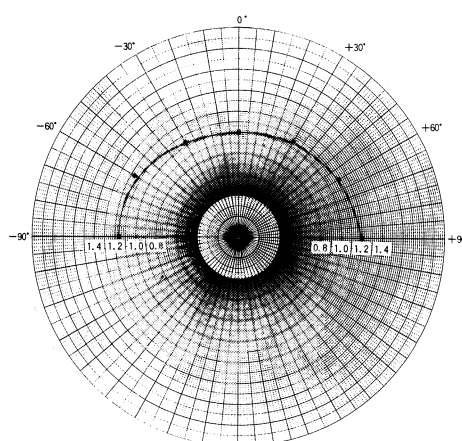


図13(B) 水平方向特性
Horizontal characteristics

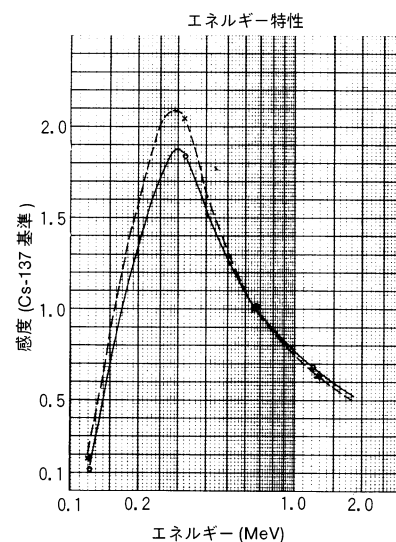


図13(C) エネルギー特性
Energy characteristics

図13 PA-100の方向特性とエネルギー特性
Characteristics of the PA-100 radiation survey meter

型 式	PA-100
種 類	シンチレーション式
測定放射線	γ線
検出素子	CsI(Tl)+Pin フォトダイオード
感 度	0.01 μSv/hに対して10cpm以上
エネルギー特性	0.5~3 (150KeV~1.5MeV)
方向特性	±25%(プローブの中心軸に対し、縦横方向ともに±90°の範囲)
測定範囲	0.000~9.999 μSv/h (線量当量率)
表示方式	デジタル式
応答時間	30秒
指示誤差	±20%
指示値変動	10%以下
周囲温度範囲	-5~40°C
保管温度範囲	-20~55°C (但し、結露なきこと)
電 源	単3型 Ni-Cd 電池×4 (連続24 h)
寸 法	本体部 140(D)×72(W)×34(H)mm プローブ部 140(D)×30(W)×30(H)mm
重 さ	約500g
付加機能	線量当量、測定時間表示、計数音、電池アラーム、オーバーフロー表示

表2 PA-100の仕様
PA-100 specifications

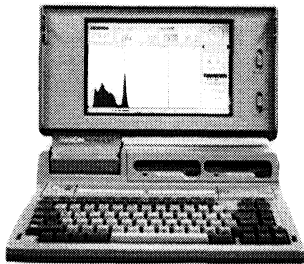


図14(A) 本体部
Main unit

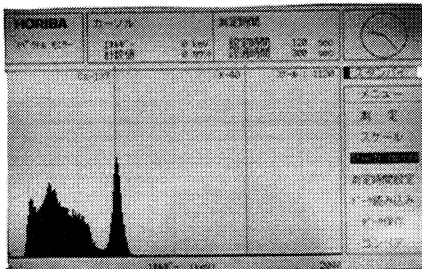


図14(B) ¹³⁷Csのエネルギースペクトルの表示の一例
Example of readout of ¹³⁷Cs energy spectrum

図14 PA-100とパソコンとを組み合わせた波高分析器の試作器
Experimental multichannel pulse height analyzer using a PA-100 and a microcomputer

4.5 PA-100の応用例

PA-100は、誰でも手軽に放射線を測定できることから、教育用や研究用としてだけでなく、一般の人達が使用するのに適している。また、持ち運びに便利なためいろいろな場所での測定ができ、分離型である点を生かして荷搬できる簡易型の波高分析器と組み合わせたり、非破壊検査的な用途にも応用することができる。図14に試作した簡易型の波高分析器の外観とPA-100で測定したときの¹³⁷Csのエネルギースペクトルを示す。

5. まとめ

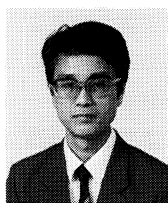
自然放射線は宇宙や大地からのほかに、建材（コンクリートや木材）や食物などの、私達の周辺のあらゆる物に含まれる微量な放射性物質から放出されている。したがって、私達は24時間中放射線を受けていることになる。またその強さは、地理的にも異なっている。たとえばブラジルのある地域のある自然放射線は、原子力発電所の境界における目標線量値の約10倍に相当するところもある。このようなことは、ほとんどの一般の人達には知られていないと思われる。

このように科学技術が進歩し、教育普及率の高さを誇る日本においても、放射線に対する認識は一般的に見てあまり高くはないといえるのではないだろうか。この理由は、放射線というものがわかりにくいものであり、また教えるくいものであることに起因していると考えられる。事実、放射線を国民に理解してもらおうと多くの努力がなされているが、その困難さが指摘されている。⁵⁾

このような状況の中で、私達メーカーがやるべき事は何であろうか。それは、今まで述べてきた中からピックアップすることができる。すなわち、放射線をより多くの人々に認識してもらうために、誰でも簡単に操作でき、信頼性が高く、小型で低価格な放射線サーベイメーターを作ることであろうと考える。

参考文献

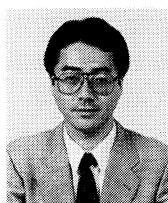
- 1) H.Grassmann, E.Lorenz, H.G.moser and H.Vogel "Results from a CsI(Tl) Test Calorimeter with Photodiode Readout Between 1 and 20 GeV" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A235, P. 319-325 (1985)
- 2) H.Grassmann, E.Lorenz and H.-G.Moser "Properties of CsI (Tl) - Renaissance of an Old Scintillation Material" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 228, P. 323-326 (1985)
- 3) E.Blucher, B.Gittelman, B.K.Heltsley, J.Kandaswamy, R.Kowalewski, Y.Kubota, N,Mistry, and S.Stone "Tests of Cesium Iodide Crystals for an Electromagnetic Calorimeter" CLNS-86/721, P.1-72 (1986)
- 4) Glenn F. Knoll "Radiation Detection and Measurement Second Edition : 放射線計測ハンドブック 第2版 "日刊工業新聞社. (1991) P.227-358
- 5) 谷 弘 "放射線を理解してもらおうことの難しさ" 放計協ニュース, No.7, P.1-6 (1990)



板谷紀雄

Norio Itatani

製造1部 課長
1943年2月11日生
立命館大学大学院
理工学研究所物理学専攻



青山剛士

Takeshi Aoyama

開発4部 主任
1961年11月30日生
岡山理科大学理学部
電子理学科

