

シンチレーションカウンタに関する一般的注意

Note on the Scintillation Counter

藤 岡 健 夫* 松 下 甫*
Takeo Fujioka Hajime Matsushita

内 容 梗 概

シンチレーションカウンタは広い用途を有する放射線測定器であるが、その性能はシンチレータとその取扱い方法、電気回路の構成、測定時のシンチレーションヘッドと試料の相対位置などによって大きく左右される。シンチレータの取付けと測定法は、測定者により個人差が出やすいから特に注意を要する。

本稿ではシンチレーションカウンタを取り扱うとき必要なこれらの注意につき述べる。

1. 緒 言

シンチレーションカウンタは 1944 年 Kurran Baker 氏によって、シンチレータに ZnS (硫化亜鉛) を使用したものが初めて作られた。その後シンチレータとして、 γ 線用の NaI (Tl) (タリウムで活性化した沃化ナトリウム) の大形単結晶や、そのほか β 線、 α 線、中性子線などそれぞれに適したシンチレータが作られるようになり、これと相まって感度のすぐれた光電子増倍管、電子管式計測回路の開発が行われ、シンチレーションカウンタは、急速に発達し普及されるに至った。

一般に γ 線用シンチレーションカウンタとして重要なことは次の4点である。

- (1) γ 線の計数効率、ことに完全吸収効率が高いこと。
- (2) γ 線のエネルギー分解能が高いこと。
- (3) γ 線のエネルギーを忠実に測定しうること。
- (4) 計数値が安定していること。

この(1)(2)項は、主としてプローブの NaI (Tl) と光電子増倍管の性能およびその取付方法によって決まり、(4)項は計数回路の性能によって大きく左右される。(3)項は両者にまたがる問題である。次に優秀なカウンタも測定法を誤ると十分な性能を望めない。この点シンチレーションカウンタは特に注意することが必要である。

2. シンチレータの計数効率

γ 線の計数効率と、エネルギー分解能は、シンチレータ NaI (Tl) の大きさによって大きく左右される。

一般に NaI (Tl) 中に入射した γ 線は次に示すような三つの過程のいずれかを経る。

- (a) NaI (Tl) に完全に吸収されて、その全エネルギーに相当した多数の光子を放出する。この間の過程^{(1)~(3)}は非常に複雑である。

- (b) 結晶中を素通りして NaI (Tl) に吸収されない。
- (c) 上記 (a), (b) の中間に相当するもので、エネルギーの一部が NaI (Tl) に吸収されて光子を放出し、残ったエネルギーをもって、結晶 (NaI (Tl)) 外に飛び出す。

吸収されたエネルギー (E') が 1 keV 以上の場合、放出される光子数 (N) (閃光の明るさ) と、それに比例する光電子増倍管の波高値 (P) との間には次の関係が成立する^{(4)~(6)}。

$$P = CNh\nu_0 = bE'$$

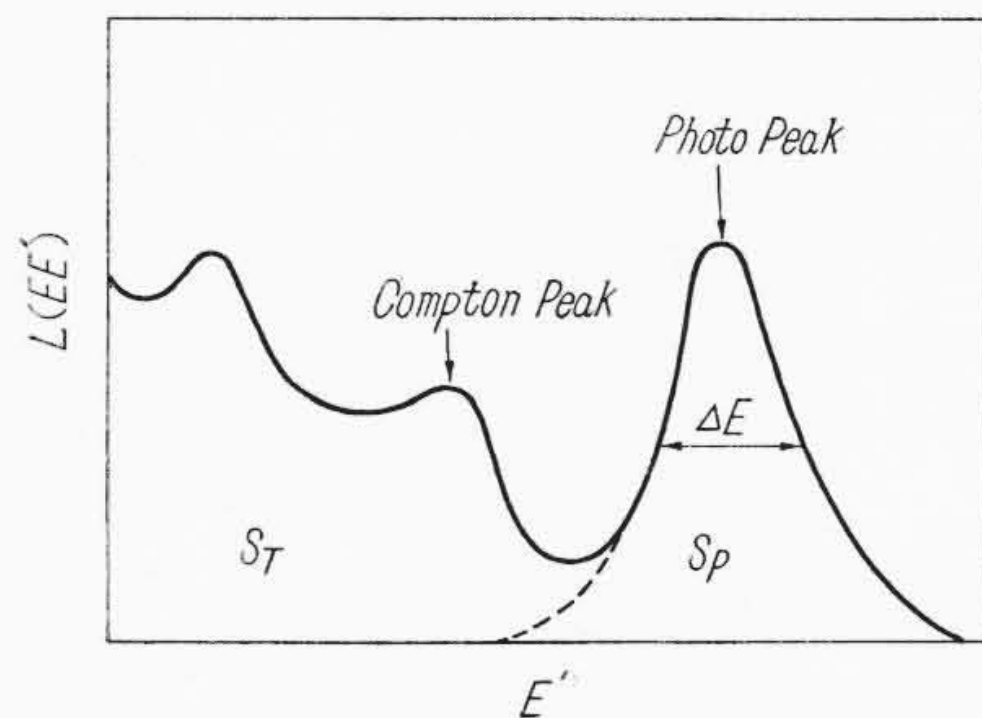
ここに $E' = h\nu' \gg h\nu_0$ (1)

ここで C は光電子増倍管の変換効率、 b は定数、 h はプランクの定数、 ν' と ν_0 はそれぞれ吸収された γ 線および放出される光子の振動数である。また 1.02 MeV 以下のエネルギー (E) をもった γ 線が結晶体内で E' のエネルギーを吸収される場合、その確率 $L(E, E')$ は第1図のような分布を示す。すなわち $E = E'$ の全吸収ピーク (Photo peak) が現われ、このピークが入射 γ 線のエネルギーを表わす。このピークが占める面積 (S_P) と全体の面積 (S_T) との比、すなわち

$$P(E) = S_P / S_T = L(E, E) \Delta E / \int_0^E L(E, E') dE' \quad \dots\dots\dots (2)$$

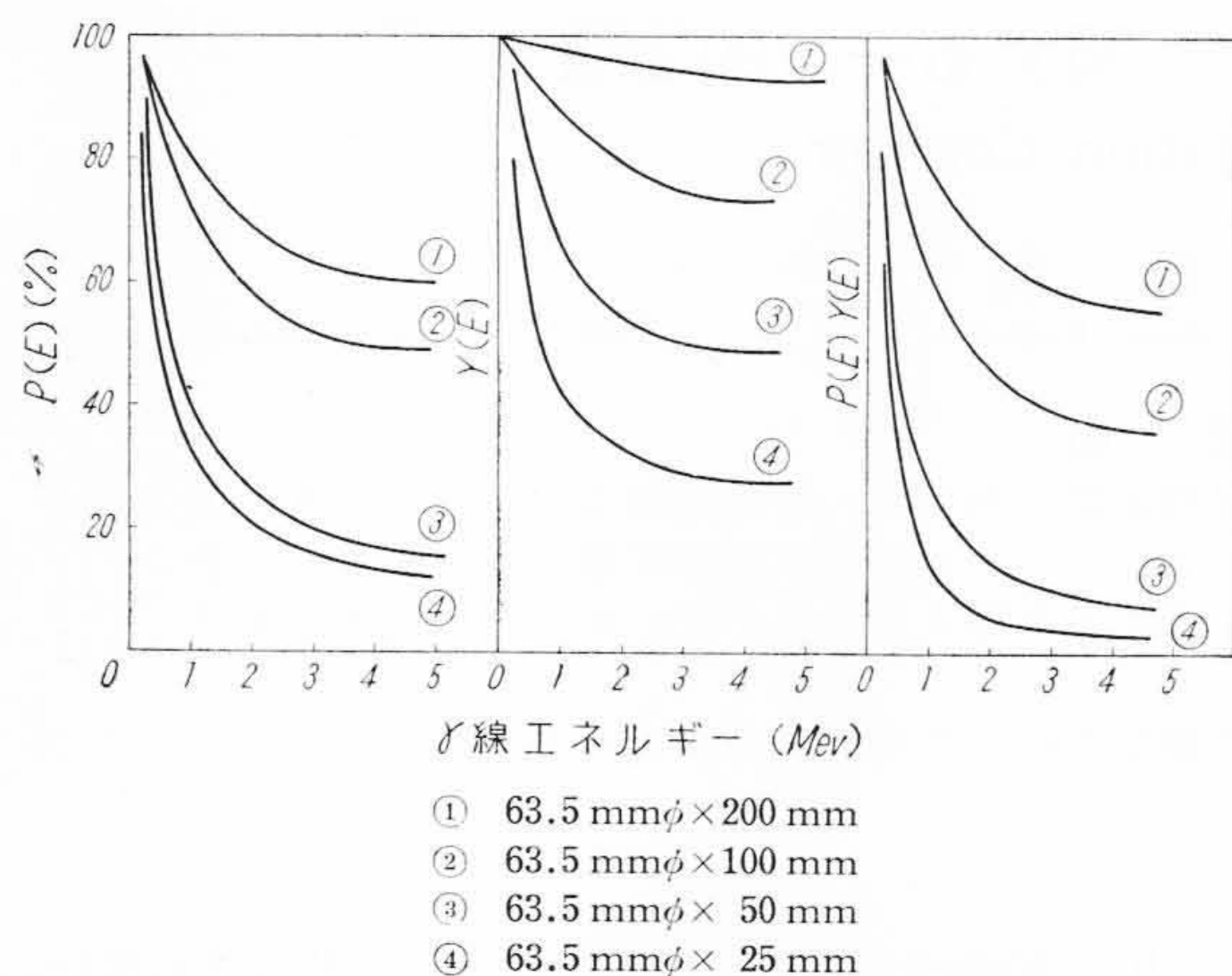
を Photo fraction という。

次に結晶の計数効率 $Y(E)$ と完全吸収効率 $Z(E)$ との間には次の関係がある。



第1図 エネルギー吸収確率

* 日立製作所多賀工場



第2図 種々の大きさの結晶体に関する関数

$$Z(E) = P(E) \cdot Y(E) = L(E, E) \Delta E Y(E) / \int_0^E L(E, E') dE' \quad (3)$$

式(2)(3)で与えられる $P(E)$, $Z(E)$, $Y(E)$ を γ 線に対する NaI (Tl) のレスポンス関数といい、これにより結晶体の良否が論じられる。第2図に種々の大きさの結晶体に関する3関数^{(7)~(9)}を示す。第3図は $38.1\phi \times 38.1$ ($1\frac{1}{2}''\phi \times 1\frac{1}{2}''$) および $101.6\phi \times 101.6$ ($4''\phi \times 4''$) の結晶体について、Zn-65, Co-60, の γ 線スペクトルを測定したときのもので、大きい結晶ではコンプトンエッジが消えて全吸収ピークが非常に大きくなっている。この場合 $P(E)$ の実験値が計算値よりわずかに小さいのは、第一にバックグラウンドの影響が大きいこと、第二に二次電子のエスケープによるエネルギー損失の影響が出ているためと考えられる。

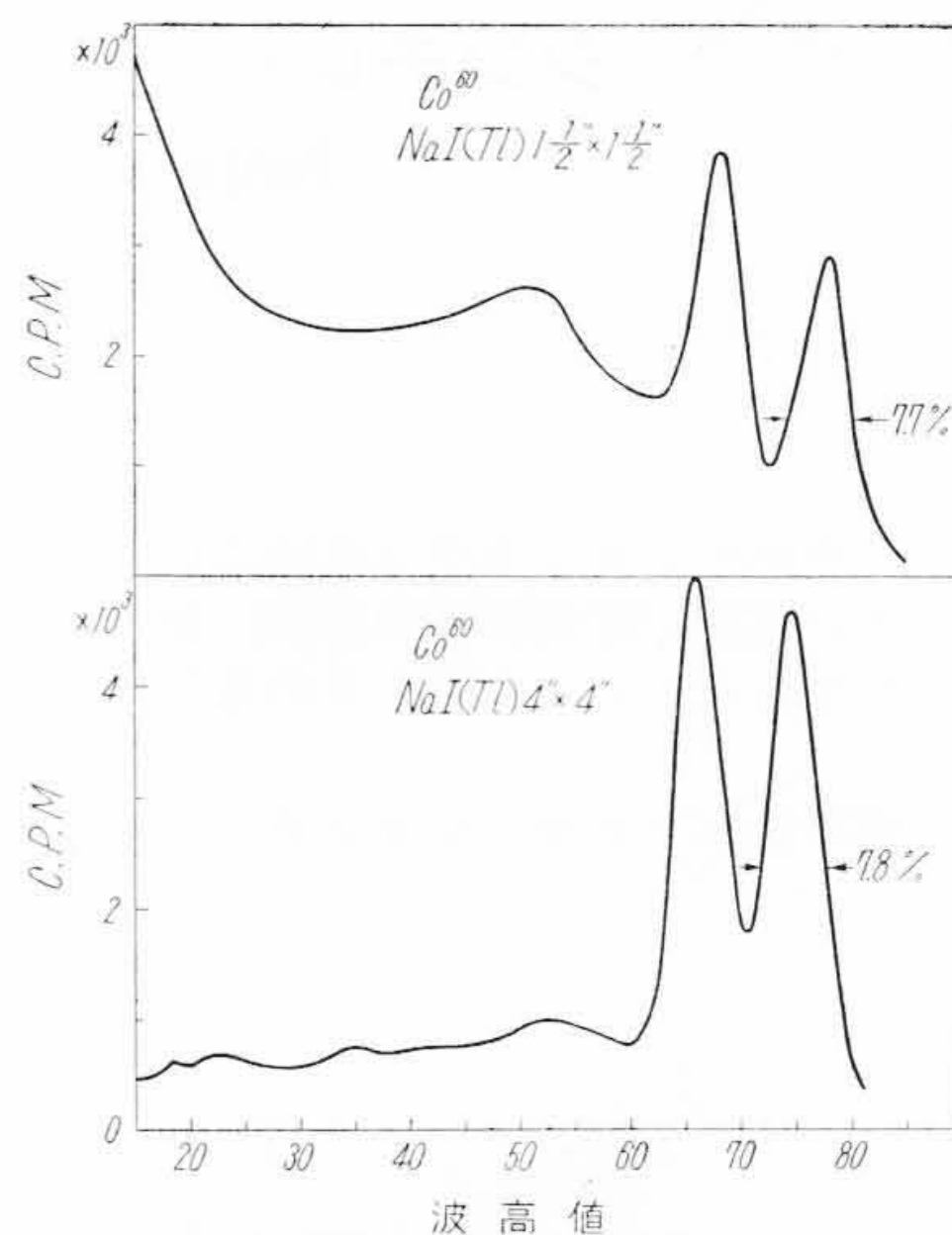
高エネルギーの γ 線で鮮明なスペクトルをえたい場合は、なるべく大きい結晶を使用してコンプトンエッジを除く必要がある。しかしあまり大きい結晶になると、結晶面の窓ガラス中に含まれる放射性同位元素 K-40 によるバックグラウンドの影響が出てくる。

3. シンチレータのエネルギー分解能

NaI (Tl) のエネルギー分解能は、結晶の大きさや γ 線のエネルギーにより異なる。これらについては R. S. Foote, H. W. Koch 氏の詳しい報告がある。このほか次に述べる結晶体の取付方法や、結晶の吸湿による着色、ライトパイプ、光電子増倍管の特性などが大きく影響する。ことに取付方法や、ライトパイプはその方法いかんによってシンチレーションカウンタの性能を大きく左右する。

3.1 結晶体の取付方法

結晶体は一面を平らなガラス板でおおってある。結晶体は一般に屈折率がガラスに等しい合成樹脂、たとえば

第3図 結晶体の大きさによる γ 線スペクトルの違い

ルサイトを通して光電子増倍管に接着する。これをライトパイプと称し、光電子増倍管の曲面にぴったり合わせるために一面を凹形に加工したり、あるいは結晶体を磁場の中において光電子増倍管をこれより遠ざける必要のある場合などに使用される。結晶体、ライトパイプ、光電子増倍管は単に密着させるだけでは光学的境界が残るので、光の一部がここで反射してしまう。これを防ぐためにガラスに近い屈折率をもつシリコン油を塗って密着させるが、このとき油の中に気泡がはいりやすいから注意しなければならない。ライトパイプの材質ももちろん均質無色透明で、内部に気泡などが無いものを使用せねばならない。また側面は入射する光に対して全反射を起させるような形状にすべきである⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

3.2 光電面の感度の一様性⁽¹⁴⁾

光電面に一様に光が入射しても、陰極から放射される光電子の密度は場所により異なる。この感度の相異はパルス波高値の違いとなって現われ、分解能を低下させる。いま N 個の光子が P なるパルス波高値を生ぜしめる確率を $G(P, N)$ とすると、前述の式(1)より

$$N = aE', (a = b / Ch\nu_0) \quad (4)$$

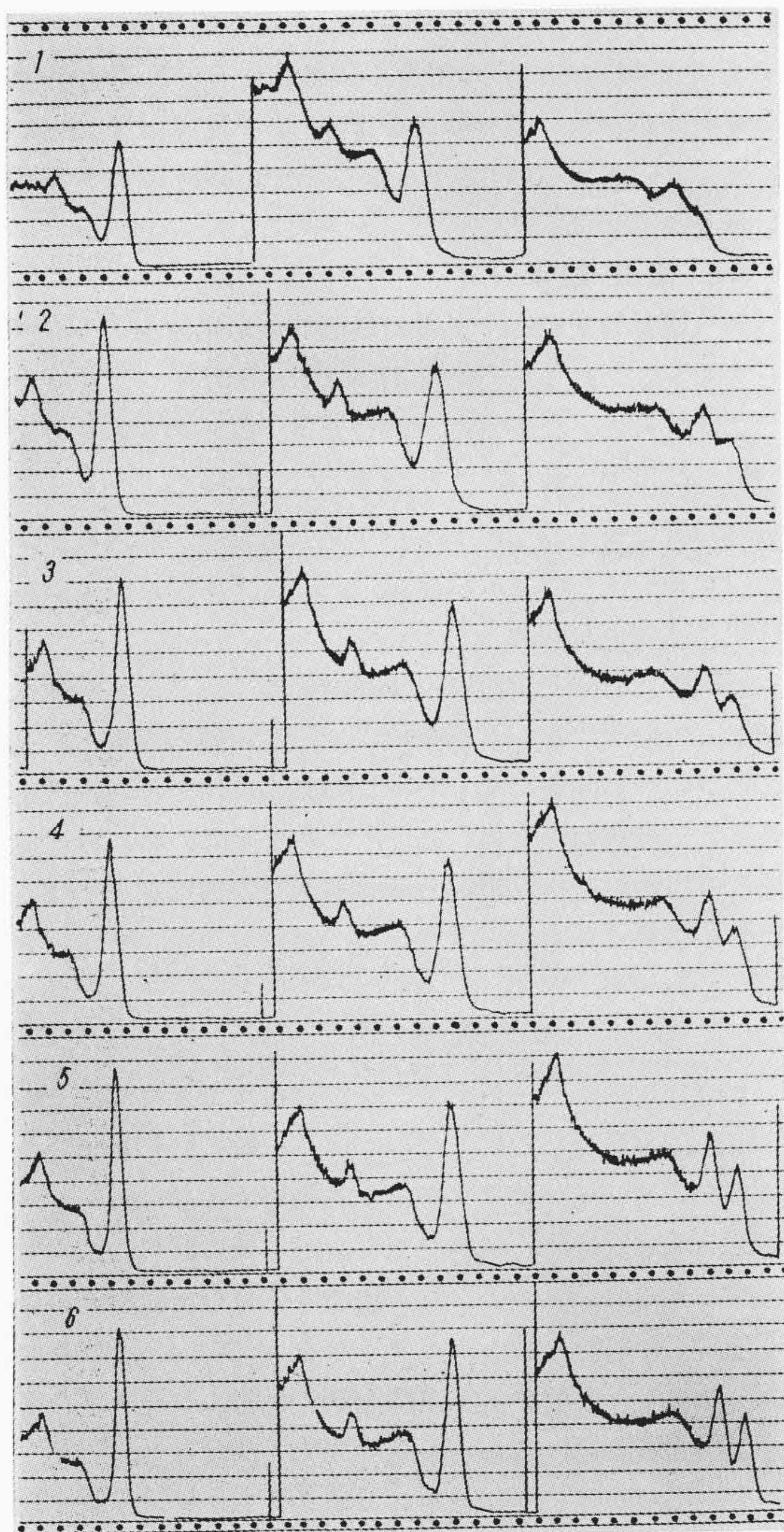
であるから、エネルギー E の γ 線が P のパルス波高値を生ぜしめる確率 $H(P, E)$ は

$$H(P, E) = \int_0^E G(P, aE') L(E, E') dE' \quad (5)$$

で与えられ、実際のスペクトルは式(5)で示される分布をもつことになる。

4. シンチレータの透明度の影響

NaI (Tl) は強い潮解性を有し、水分を吸収して淡黄色に着色する。これを防ぐために結晶体を薄いアルミ板で包み、その内部に光を反射するための酸化マグネシウム



第4図 結晶体、光電子増倍管および取付けの良否と γ 線スペクトルの精度

粉をつめ、一面のみをガラス窓とし、全体として完全な気密にしてある。また NaI (Tl) は、強い紫外線やX線、 γ 線を受けたり加熱された場合にも、結晶中の汚度を遊離して同様に着色する。結晶体はわずかに着色しても光の吸収や散乱を起し、分解能に大きな影響を与える。

以上述べたほかに問題となるものは、NaI (Tl) 中の Tl 分布の一様性、結晶内のクラックの影響などである。

次に Cs-137, Zn-65, Co-60 の γ 線スペクトルを測定したとき、取付方法、光電子増倍管、および結晶体の良否によって、スペクトルの精度がいかに変わるかを第4図に示す6個の測定結果によって説明する。

第4図の上段1は、ルサイト 38.1 ϕ ×20.3 (11 $\frac{1}{2}$ " ϕ ×0.8") のライトパイプを使用し、接着面に塗ったシリコン油の中に大きな気泡がはいった場合である。第4図2は

気泡を除いたもので、両者の間には分解能で約3%の差がある。第4図3はライトパイプを除いたときで、分解能はさらに向上している。これは、ルサイトの中に多くの微小気泡があり、これによって光の散乱を起していたためと考えられる。使用した光電子増倍管の光電面は、結晶を密着するのに都合が良いように、特に平面に仕上げてある。第4図4は、特性良好な光電子増倍管を用いた場合で、分解能は一段と向上している。

以上第4図1～4までは結晶体が肉眼でようやく見分けうる程度にわずかに着色している場合で、次の第4図5, 6は、無色で良好な結晶体を使用した場合である。ここでは Co-60 の2個のピーク (1.17 MeV, 1.33 MeV) もはっきり分解されている。

5. 電気回路⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾

5.1 プリアンプ

光電子増倍管は非常に高いインピーダンスを持っているから、えられたパルスをケーブルによって次の増幅器に導くときは減衰が著しい。これを防ぐため光電子増倍管にプリアンプを直結し、カソードフォロア形増幅回路によってパルスインピーダンスを数百オーム以下に下げる。ケーブルには同軸ケーブルを使用するが、それでも長さが数十メートル以上に及ぶときはパルス波形のひずみが避けにくい。カップリングコンデンサは特に耐圧が高く絶縁性の良いものを使用する必要がある。光電子増倍管の各プレートに電圧を供給する分圧用抵抗には温度係数の小さいものを使用する。そうしないと光電子増倍管の増幅度が大きく変動する。

5.2 リニヤアンプ

リニヤアンプはプリアンプから送られる数十ミリボルトのパルスを数十ボルトにまで増幅し、次段の波高分析器あるいはスケラ、レートメータなどに送るもので、この間にパルスの波形をくずさず、かつ増幅度を正しく一定に保って増幅しなくてはならない。

一般にリニヤアンプには負帰還形増幅器2組を有する A-1 形増幅器と、増幅器3組を有する DD-2 形増幅器とがある。A-1 形増幅器は増幅度を変えることが容易でクリッピングタイムが短く、シンチレーションカウンタ用に適しているほか、フローカウンタのパルス増幅用などに広い用途を持っている。DD-2 形増幅器は A-1 形増幅器に比べて増幅度が高く、パルスの大小にかかわらず零レベルが一定している。したがって γ 線のスペクトルを測定する場合には DD-2 増幅器のほうがすぐれている。

日立 SL-2 形リニヤアンプには A-1 形、日立 SL-3 形リニヤアンプには DD-2 形を採用している。

リニヤアンプの結合コンデンサの取付位置とその容量

には特に注意が必要である。

5.3 波高選別器と波高分析器

波高選別器(ディスクリミネータ)はリニヤアンプの出力パルスを受けて、一定のディスクリレベル(選別電圧)以上のパルスのみを通す。波高分析器(パルスハイトアナライザ)は上下に定めたディスクリレベルの間にはいるパルスのみを通す。パルスの高さはすなわち γ 線のエネルギーに相当する。波高分析器はディスクリレベルを電動器で変化させ、これと記録計を連動させて γ 線のスペクトルを記録する。両者とも要点は選別電圧の値が変動せぬことであり、ここでも抵抗類の温度変化に注意する必要がある。

5.4 レートメータ

レートメータは、変化する計数率を一目で読むことができ、放射線測定器として広く使用される。またこれからの出力を自動記録計に入れて、 γ 線のスペクトルを同時にうることもできる。レートメータはパルスを高さと幅が一定の矩形波に変え、これをポンプ回路によって直流電圧に変換して測定する。測定レンジは時定数を決めるCR回路中のRを切り換えて変えることができるが、低レンジでは抵抗値が大きくなり、また計数の統計的誤差も大きくなるから、測定可能な計数率は数百C. P. M. に制約される。

5.5 スケーラ

ここでスケーラの分解能について少し説明する。

スケーラに2個のパルスが短い時間 t を隔ててはいつてくる場合を考える。時間 t をしないで小さくして行くと、スケーラはついに2個のパルスをはっきり2個と区別して計数することが不可能となり、1個のパルスとして計数してしまうようになる。この限界の時間を分解能という。たとえば分解能 $10\mu\text{s}$ というのは、パルスの間隔が $10\mu\text{s}$ まで正しく計数できるということである。1秒間では100,000 C.P.S., 1分間では6,000,000 C.P.M.となる。シンチレーションカウンタの特長はほかのカウンタや線量計などに比べて微量の放射性同位元素を測定しうることであり、多量の同位元素を扱うことはない。

しかし放射性同位元素から出るパルスは一様でないから、最短のところで $10\mu\text{s}$ というのであれば、平均では一けた下げて $100\mu\text{s}$ あれば十分であろう。 $100\mu\text{s}$ としてもなお計数率は600,000 C. P. M.となる。近時スケーラの分解能は $1\mu\text{s}$, $0.5\mu\text{s}$ と短少の一途をたどっている。それ自体は大いに意味のあることだが、シンチレーションカウンタにおいては、分解能の極度に短い必要はないのが普通である。

計数方式には、ネオン球表示による2進式、10進式、およびデカトロン、E1Tを用いた10進式がある。2進式は動作量も安定で分解能も高いが、読みにくいのが欠

点である。デカトロン、E1Tは、分解能が $30\mu\text{s}$ くらいであるが読みやすいので多く利用される。E1Tは特別な電気回路を用いて分解能を $1\mu\text{s}$ 以下短くすることができる。日立SS-3形スケーラはE1Tを用いて分解能 $1\mu\text{s}$ をえている。

5.6 高圧電源

高圧電源の変動は、光電子増倍管の増幅度を大きく左右する。したがってその変動は $0.01\sim 0.02\%$ におさえなくてはならない。安定回路は普通出力電圧の変動を3段増幅し、出力と並列に入れた制御管2C53のグリッドを制御している。高周波を用いたものもあるが商用周波数そのままのほうが事故は少ない。ここでも温度による抵抗変化は大きな問題である。

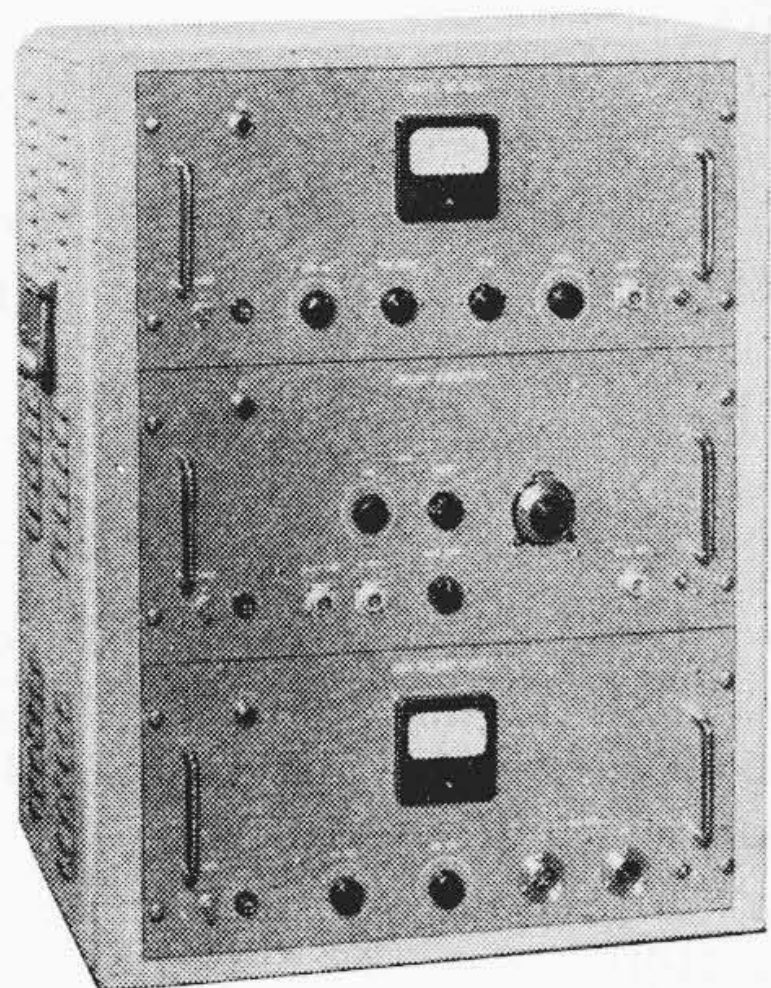
一般に放射線測定器はパルス増幅器であり、長時間にわたって使用することが多いので、測定値の浮動ということがいつも問題になるが、この原因はほとんど温度上昇による抵抗値の変化に基く。これを除くためには温度係数の小さい抵抗を用い、測定器回路の通風をよくすることが必要である。

6. 測定法

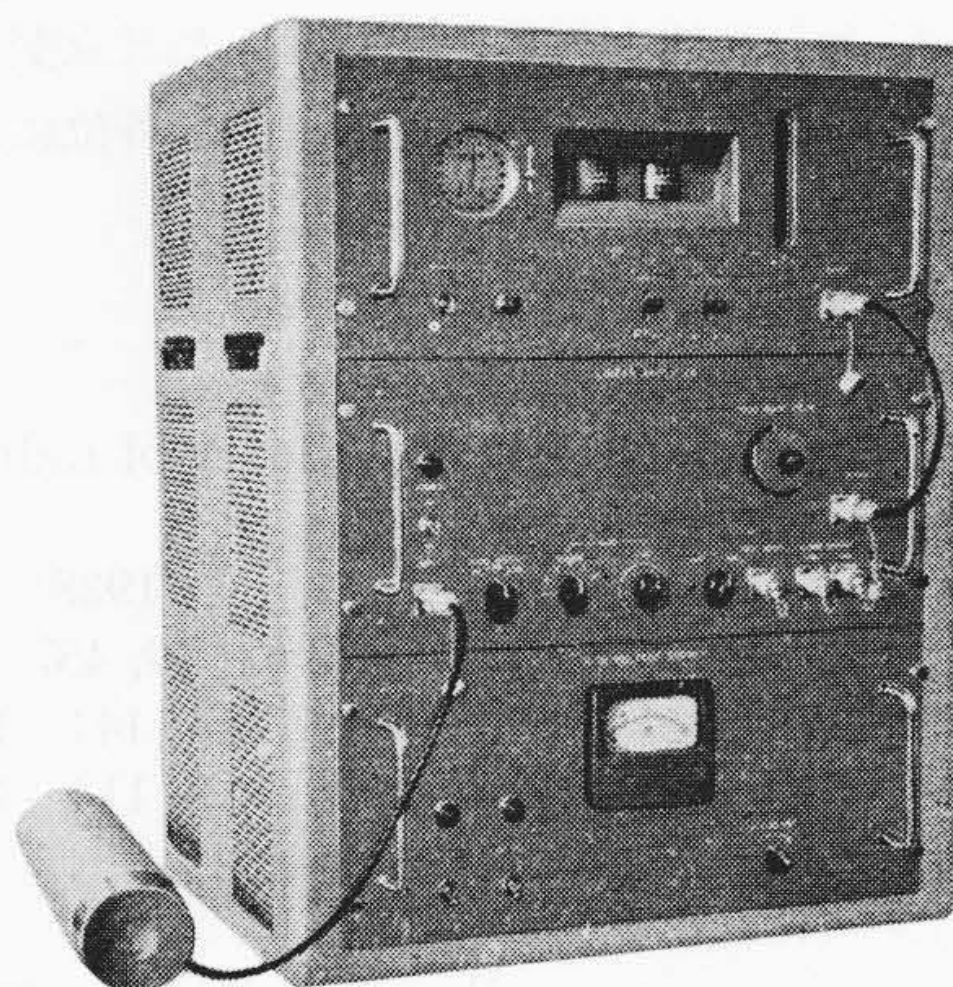
γ 線のエネルギースペクトルを測定するときは、その測定法に注意しなくてはならない。一般に行われているシンチレーションカウンタによる測定ではプローブをスタンドに取り付け、試料をスタンド下部の試料台に乗せて測定するが、このような方法では γ 線の反射散乱が多くなって分解能の高いスペクトルをうることができない。外部から入射する宇宙線を除くためにシールドなどを使用することはもちろん避けなくてはならない。スペクトル測定に際しては試料およびクリスタル、光電子増倍管の周囲になるべく散乱や反射を起させるような物を置かぬことが大切である。できればクリスタルと光電子増倍管をビニールテープなどで取り付け、試料もプラスチックのような軽い支持台の上に置くほうがよい。試料からの放射線が平行ビームとなるように、試料をクリスタルからなるべく遠ざけたほうがよい。

7. その他

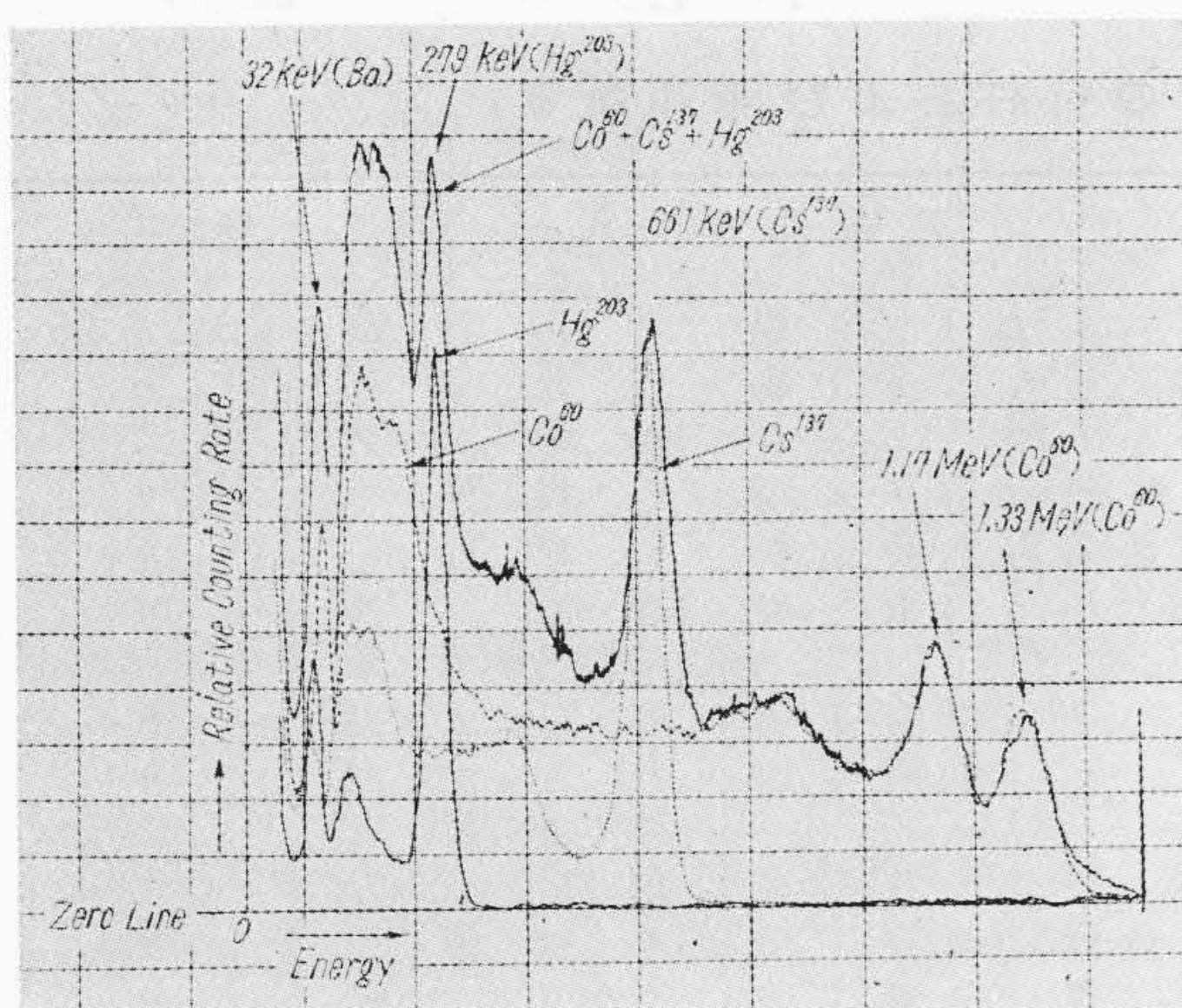
最後に日立製作所で製作しているシンチレーションカウンタについて一言する。第8図はRDA-2形 γ 線スペクトロメータで、その測定例を第6図に示す。Cs-137から出る32 keVの γ 線のピークがはっきり現われている。RDA-2形 γ 線スペクトロメータは、SP-2形シンチレーションヘッド、SL-3形リニヤアンプ、SA-2形波高分析器、SS-3形スケーラ、SR-3形レートメータ、SH-2形高圧電源、TVK形記録計より構成される。RDA-2形からスケーラを除いたものがRDA-3形 γ 線スペクトロ



第5図 RDR-2形シンチレーションカウンタ



第7図 RDS-2形シンチレーションカウンタ外観



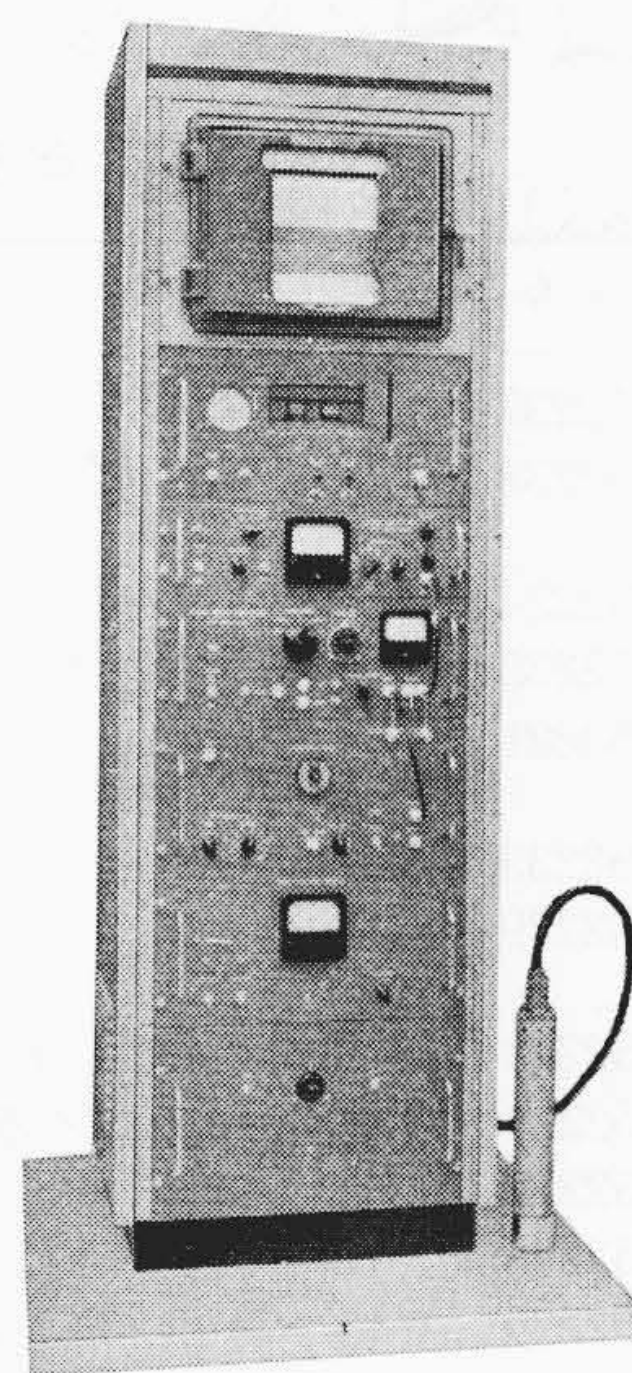
第6図 測定例

メータである。さらに、記録計、波高分析器、レートメータを除き、リニヤアンプに続くディスクリミネータを使用し、手動によって γ 線のスペクトルを測定できるようにしたものが第7図に示すRDS-2形シンチレーションカウンタである。RDS-2形のスケーラの代りにレートメータを取り付けたものが第5図に示すRDR-2形シンチレーションカウンタである。第9図に示すRDC-2形シンチレーションカウンタは上記の γ 線スペクトロメータに比べて簡単なリニヤアンプ、レートメータ、スケーラをもち、安価で広い用途をもっている。

そのほかシンチレーションカウンタを利用した製品として、各種の空気や排水の汚染度測定器、 γ 線用ゴニオメータ、三結晶形ペアースペクトロメータなどがある。

8. 結 言

以上はわれわれが取り扱うことの多いクリスタルにNaIを使用したシンチレーションカウンタにつきおもな注意事項を述べたが、最近ではシンチレータとしてプラス

第8図 RDA-2形 γ 線スペクトロメータ

第9図 RDC-2形シンチレーションカウンタ外観

チックシンチレータ、液体シンチレータ、ガスシンチレータなどが使用される傾向にある。また電気回路もその用途により種々の特性を有するものが考えられている。このようなシンチレーションカウンタについてはまたそれぞれ特有な注意を要するが、今後に残された問題としてさらに研究を進める。

擱筆するにあたり種々御援助いただいた日立製作所中央研究所、日立研究所、多賀工場の関係者各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) W. Heither: The gurntum theory of radiation, 3rd edition 75 (1954)
- (2) F. Seitz: J. Chem. Phys., 6, 150 (1938)
- (3) C. E. Williams: J. Chem. Phys., 19, 457 (1951)
- (4) C. J. Taylor et al: Phys. Rev., 84, 141 (1951)
- (5) H. T. Wast et al: Phys. Rev., 81, 114 (1951)
- (6) V. O. Eriksen and G. Tenssen: Phys. Rev., 84, 150 (1952)
- (7) W. F. Miller et al: Rev. Sci. Instr., 28, 717

(1957)

- (8) J. G. Campbel and A. J. F. Boyle: Australian J. Phys., 6, 171 (1953)
- (9) H. Kohm: Nncleonics, 6, 27, 60 (1950)
- (10) K. Siegborn: β and γ ray spectrascopy, p. 143
- (11) R. S. Foote and H. W. Koch: Rev. Sci. Instr., 25, 746 (1954)
- (12) 山崎, 岡野: 物理学会分科会 (1954) 東京
- (13) P. A. Tove: Rev. Sci. Instr., 27, 143 (1956)
- (14) 木村, 陸路: 物理学会分科会 (1957) 金沢
- (15) 岡野: 原子核研究 1, 3, 108 (1954)
- (16) E. Fairstein: Rev. Sci. Instr., 27, 475 (1956)
- (17) Elmon and Sands: Electronics, (1949 McGraw Hill)



特許と新案



最近登録された日立製作所の特許および実用新案

(その2)

(第10頁より続く)

区 別	登録番号	名 称	工 場 別	氏 名	登録年月日
特 許	252237	蒸 気 タ ー ビ ン 保 護 装 置	日立工場	和田 静 哉	34. 5. 26
"	252238	開 閉 器 操 作 カ ム 装 置	国分工場	安 藤 卓 郎	"
"	252234	内 燃 電 気 車 輻 の 自 動 加 速 装 置	水戸工場	竹 村 伸 一	"
"	252235	内 燃 電 気 車 輻 の 自 動 負 荷 調 整 装 置	水戸工場	竹 村 伸 一	"
"	252221	回 転 方 向 に よ り 伝 達 能 力 を 異 に す る 流 体 接 手	亀有工場	寺 田 進 彦	"
"	252233	水 中 モ ー タ	亀有工場	関 英 忠 夫	"
"	252239	バ ン ド プ レ ー キ	亀有工場	館 下 俊 郎	"
"	252223	永 久 磁 石 型 電 子 顕 微 鏡	多賀工場	若 森 昌 史	"
"	252224	電 子 レ ン ズ 系 の 焦 点 距 離 可 変 装 置	多賀工場	木 村 博 一	"
"	252227	分 光 光 電 測 光 装 置	多賀工場	木 村 博 一	"
"	252228	自 記 分 光 測 光 装 置	多賀工場	大 和 田 勤	"
"	252229	磁 石 励 磁 4 段 電 子 レ ン ズ 系	多賀工場	大 和 田 勤	"
"	252230	自 動 平 衡 型 放 射 線 液 面 計 の 自 動 較 正 装 置	多賀工場	木 村 博 一	"
"	252236	可 動 線 輪 型 電 圧 調 整 器	多賀工場	鷲 見 哲 雄	"
"	252222	粘 着 性 材 料 製 造 方 法	多賀工場	渡 井 三 夫	"
"	252225	レ ベ ル 検 知 装 置	絶縁物工場	川 和 田 七 郎	"
"	252226	保 護 装 置 付 熱 的 継 電 装 置	中央研究所	二 木 久 夫	"
"			中央研究所	二 木 久 夫	"
"				田 島 喜 平 太	"
"				山 田 博 三	"
"				清 宮 弘 基	"
"	252231	水 位 遠 隔 指 示 装 置	日立研究所	片 木 剣 三 郎	"
"	252232	水 位 遠 隔 指 示 装 置	日立研究所	片 木 剣 三 郎	"
実 用 新 案	494148	油 入 套 管	国分工場	石 崎 幸	34. 5. 19
"	494149	配 電 盤 用 信 号 灯	国分工場	佐 竹 喜 代 松	"
"	494150	配 電 盤 用 小 型 信 号 灯	国分工場	金 井 好 延 昭	"
"	494151	模 擬 切 断 開 閉 器	国分工場	金 綿 引 好 延 昭	"
"	494152	二 段 操 作 式 操 作 開 閉 器 の 前 部 カ バ ー 取 付 装 置	国分工場	金 綿 引 好 延 昭	"
"	494153	操 作 開 閉 器 の ス ク リ ー ン 取 付 装 置	国分工場	金 井 好 延	"
"	494154	信 号 灯 を 内 蔵 し た 操 作 開 閉 器	国分工場	金 井 好 延	"
"	494155	断 路 器 固 定 接 触 装 置	国分工場	加 藤 清 次	"
				羽 藤 沼 一 郎	"
				星 恵 記	"

(第30頁へ続く)