

放射線位置検出器による放射性粒子粒径測定法の開発 2

立教大学との共同研究報告書

The measurement of the radioactive aerosol diameter by position sensitive semiconductor detectors 2

June 1979

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

TOKAI WORKS

POWER REACTOR & NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CORPORATION

複製あるいは入手については、下記にお問い合わせください。

茨城県那珂郡東海村 〒 319-11

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所技術部研究管理課 ☎ 東海(02928)2-1111

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

Enquiries about copyright and reproduction should be adressed to ;

Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation,

Tokai, Ibaraki, Post No 319-11, Japan.

放射線位置検出器による放射性粒子粒径測定法の開発2

立教大学との共同研究報告書

The measurement of the radioactive aerosol diameter by
position sensitive semiconductor detectors 2

中 田 啓* 中 本 淳**
○金 盛 正 至* 村 上 浩 之**
佃 正 昊**

期 間 1978年12月1日～1979年6月30日

目 的 放射性粒子粒径測定用半導体位置検出器を試作しその性能を試験する。

要 旨 5mm巾チェッカーボード方式半導体位置検出器を試作し、放射性粒子粒径測定用に半導体位置検出器が利用できるかどうかについて試験、検討した。試験結果は良好で、今後もう1段階位置分解能のよい検出器を試作することとした。

The measurement of the radioactive aerosol diameter by
position sensitive semiconductor detectors 2

Masashi Kanamori*, Atsushi Nakamoto**,
Hiroyuki Murakami**, Kei Nakata*,
and Masahiro Tsukuda**

Abstract

Determination of the diameter of radioactive aerosol is performed by using checkerboard type position sensitive semiconductor detectors (PSD). The filter paper with the radioactive aerosols is contacted to the PSD in order to calculate the diameter of the aerosol from the measured radioactivity.

* Power Reactor and Nuclear Fuel development corporation

* Rikkyo University

目 次

1.	はじめに	1
2.	概要	3
2.1	検出器の選択	3
2.2	検出器の持つべき性能	3
2.3	測定・試験の方法	5
3.	シリコン放射線位置検出器	6
3.1	はじめに	6
3.2	シリコン放射線検出器	6
3.3	シリコン放射線位置検出器	9
3.4	シリコン放射線検出器の製法	12
3.4.1	表面障壁型検出器の製法	14
3.4.2	Si(Li)の製法	15
3.5	シリコン放射線位置検出器の製法	16
3.5.1	電荷分割方式位置検出器の製法	16
3.5.2	チェッカーボード方式位置検出器の製法	18
3.6	α 放射性粒子粒径測定用位置検出器の試作	18
4.	情報処理回路	31
4.1	概要	31
4.2	機能	32
4.2.1	前置増幅器	32
4.2.2	主増幅器	32
4.2.3	演算部	33
4.2.4	タイミング制御部	33
4.2.5	高圧電源	34
4.2.6	NIM規格電源及びビン	34
4.2.7	テストパルス発生器	34
4.3	回路	35
4.3.1	前置増幅器	35
4.3.2	主増幅器	36
4.3.3	演算部	36
4.3.4	タイミング制御部	37

4.3.5	テストパルス発生器	37
4.4	2次元位置検出装置の問題点	38
5.	試作検出器の試験	48
5.1	概要	48
5.2	基礎試験	49
5.2.1	半導体素材に関する試験	49
5.2.2	パルス波形	49
5.3	非接触コリメート標準線源試験(1)	50
5.4	非接触コリメート標準線源試験(2)	50
5.5	接触コリメート標準線源試験	51
5.6	^{239}Pu サンプル試験	51
5.7	応用試験	52
5.7.1	接触劣化試験	52
5.7.2	ポリカーボネートフィルム層による変化	53
5.8	結論	53
6.	今後の課題	90
6.1	位置検出器について	90
6.2	試料について	90
6.3	データ処理回路について	90
7.	参考文献	91
	付録	93

1. はじめに

非密封の放射性同位元素や核燃料物質の取り扱い施設の作業者の内部被曝管理は重要な課題である。

放射性物質などの人体内への侵入については、大きく分けて、無傷あるいは傷のある皮膚を通じて入る場合、食べ物や飲み物などにより経口的に入る場合と、呼吸などによる吸入の場合がある。

人体内に侵入した放射性物質などに対する被曝評価を行なうためには、その物質の半減期、放出する放射線の種類、エネルギー、物理的な形、化学形など種々の因子について考慮しなければならない。

このうち吸入による体内侵入についての被曝評価を行なう場合は、上記の因子の他に粒子のサイズが問題となり、プルトニウム-239のように許容濃度が厳しい場合、わずかな数の粒子吸入が被曝線量評価に重要な影響を与える。

作業者が、放射性物質などを呼吸により吸入すると、呼気とともに再排出されるものや、呼吸器の上部にたまり、その後消化管に移るものと肺にたまるものとに分類され、身体内での挙動が分かれるのでそれぞれについての被曝評価をすることになっていて、ICRP, Pub 2, ICRPの“肺動態作業グループの報告”および、ICRP Pub 19 (1972)に詳述されている。

それによると、

- 1) 呼吸器系は放射線防護の立場から被曝評価が便利のように、N-P (鼻咽腔), T-B (気管-気管支), P (肺胞) の3つに区分する。
- 2) 吸入した放射性核種に対して化学形とは関係なく、その粒子サイズによって上述の呼吸器系の3つの区域に対する沈着率を定める。
- 3) 粒子サイズと無関係に吸入した放射性核種の化学形によって3つの区域中の排除の半減期(生物学的半減期)を定める。

すなわち、放射性核種はすべてその化学形に応じ排除の生物学的半減期の長短が割り当てられ、3つのクラス(D日, W週, Y年)に分類され、それぞれのクラス毎に、呼吸器系の各区域から血中あるいは胃腸管へ行く割合および半減期について固有の値が与えられている。

また、吸入した粒子について鼻咽腔の線量当量は、他の区域の線量当量に比べ比較的僅かなので、この区域の線量当量の算定は行なわないことになっていて、被曝評価をするときは、気管、気管支、肺胞、胸部リンパ節について全部合せ、複合気管として行なうことになっている。このように、粒子サイズについての情報は吸入被曝を考えると、体内の沈着する場所を定めるための重要な因子である。

現在は、集塵した口紙をまず放射線測定し、それにより放射エネルギーを求め、写真の露光時間を推定し、ポラロイド写真の印画紙に密着させ、放射エネルギーにより、黒点の大きさが違ってくることから、その粒子の大きさを決定する。

この場合、写真の露光時間は経験的に定めているのが実情で、もし黒化の程度が少なすぎれば、新たに始めから更に長時間露光のしなおしをしなければならないことになる。さらにこれから各種の仮定や条件を加えて計算することになり相当の時間を必要とする。

現場では、プルトニウムによる吸入が起った場合、この粒子サイズの情報が最も遅れることになるので、集塵した口紙上の放射線測定を行なうことにより、必要に応じて出来るだけ短時間に粒子サイズを測定し、それに伴う統計処理も自動的に行ないたい。

そこで²³⁹Pu粒子の粒径を、個別粒子の放射能から、粒子の密度を仮定することにより算出する方法を半導体検出器を用いて試験した。今回の試験は、前回の調査検討結果を(PNCT841-79-02で報告済)を基礎に、半導体位置検出器を実際に粒子測定の目的で作成使用し得るかどうか可能性を検討したものである。

2. 概 要

2.1 検出器の選択

ここで前回の調査結果を要約しておく。

- 1) 位置分解能という意味では、半導体位置検出器は、最もすぐれた検出器の部類に属する。検出器の長さにもよるが実験的には $30\ \mu\text{m}$ FWHM (検出器 $1\ \text{cm}$, $5\text{Mev}\ \alpha$) 程度の検出器まで試作されている。
- 2) 表面障壁型の検出器ならば、比較的製作方法も簡単である。
- 3) 半導体位置検出器の中では、多検出器型としてチェッカーボード方式、単検出器型として抵抗膜蒸着方式が代表的である。
- 4) 製作上の容易度、検出器の安定度という面から考えてチェッカーボード方式が抵抗膜蒸着方式に比較して有利であるが、位置弁別は、上下の短柵状電極に囲まれた区域毎に限定される。
- 5) チェッカーボード方式と抵抗膜蒸着方式とでは、抵抗体により電荷を分割するという機構が同一であるため、位置信号パルス进行处理する回路に同様なものを用いることができる。
- 6) 測定対象粒子線がアルファ線である場合には、吸収層の少ない検出器が望ましいが、表面障壁型半導体検出器はその条件に適している。

さらに位置検出器全体に関する調査検討の結果、半導体位置検出器、特に、チェッカーボード方式による検出器を試作することが

- 1) 検出器試作の確実度
- 2) 測定目的であるアルファ線に対する特性
- 3) 測定器自体の特性安定度

の3点から見て適当と判断されたので、同方式で放射性粒子粒径測定用半導体位置検出器を試作することとした。検出器製作については技術的経験が豊富と考えられる立教大学に製作を依頼することにした。

2.2 検出器の持つべき性能

本試験の目的が、半導体検出器利用の可能性を検討するという点にあることから考えて、

- 1) 検出器の必要面積
- 2) 位置分解能の条件
- 3) エネルギー分解能の条件
- 4) 検出器特性の安定度

5) 測定系の安定度

の各項目について検討する必要がある。

1) 検出器の必要面積

検出器の面積を決定する要因としては、

1. 被測定試料の大きさ
2. 必要な位置及びエネルギー分解能

という2点がある。1.の条件は、より大きな検出器が必要になるという条件で、2.はより小さな検出器が有利になるという条件である。

再処理施設において被測定試料として考えられるものは、代表的なものとして

1. スミヤロ紙 (直径 25 mm)
2. スニファロ紙 (直径 50 mm)

がある。スニファロ紙の方が直径が倍程度大きいですが、実際に内部被曝評価に使用する試料はスニファロ紙になるので、検出器自身の有効直径を50 mm ϕ とする必要がある。逆に、直径50 mm ϕ のものは現在の半導体検出器製作技術から言っても大面積で、一様な検出器の試作が小型の検出器に比べると難しいと言える。

2) 位置分解能の条件

エアスニファロ紙に付着している ^{239}Pu 粒子を測定する上で必要な位置分解能は、粒子付着密度との関係が

$$\text{付着密度} < 1 / \text{位置分解能}$$

という条件によって表わされることである。

3) エネルギー分解能の条件

エネルギー弁別能力を持つ検出器であれば、理想的な状態で言えば ^{239}Pu ($E_{\alpha} = 5.15 \text{ MeV}$)、 ^{238}U ($E_{\alpha} = 4.18 \text{ MeV}$)あるいはラドン娘核種等を弁別しそれぞれの核種別の測定が可能となる。これは放射線位置検出器でも同じことである。エネルギー分解能が劣化すれば、エネルギースペクトルが核種相互間で重なりあって弁別不能となるので半値巾は狭い程良い。ところが、実際の口紙試料を測定する場合に最もエネルギースペクトルを劣化させる原因は放射性粒子が口紙内へ入っていることによるエネルギー吸収であり、数百 KeV~MeVの半値巾増加となり得る。その意味では検出器としては可能な範囲内で~百 KeV (FWHM) 程度の性能を持たせれば良いと言える。

4), 5) 検出器及び測定系の安定度

検出器には、試料を密着あるいはそれに近い状態にする必要があるので、そのような状態でも安定して使用できることが必要となる。測定系に対しては、通常の放射線測定器以上の安定度が求められるわけではないが、位置情報のパルスが立ち上がり時間、パルス波高とも広範囲に分布することになるので、すべてのパルスを安定して測定し得ることが必要である。

2.3 測定・試験方法

検出器の基礎的な試験及び、実サンプルを模擬した試験を行ない、後に放射性粒子（本試験では ^{239}Pu ）の付着している口紙を検出器に可能な限り密着して測定する。実際には、検出器のクロスコンタミ防止及び劣化防止のために薄膜を口紙と検出器の間にはさみ圧着して試験を行なう。

3. シリコン放射線位置検出器

3.1 はじめに

位置検出器の素材としては、現在までに開発されている種々の検出器が用いられている。これらの中で気体あるいは液体を使用するものはそれら媒質を閉じ込める外壁が必要で、 α 線を測定する様な場合には、測定の都度その容器内への試料の装填、気体の封入あるいは液体の精製をする必要がありかなり手間のかゝる操作を必要としあまり実用的ではない。又固体シンナレーション・カウンターを使用するものはエネルギー分解能、位置分解能共にあまり良くない現状である。

シリコン半導体検出器は α 線の様な荷電粒子に対するエネルギー分解能が非常に優れており、その装置も小型で取扱いも簡便である。また最近大面積の検出器も開発され、こゝで測定しようとする口紙程度の大きさの検出器は製作出来る様になって来た。またシリコン半導体を用いた位置検出器も各方面で種々の型のものが開発されている。^{1), 2)}

われわれは口紙上に付着した α エアロゾルの放射能球相当径を測定するためのシリコン半導体位置検出器を開発して来たのでそれについて述べる。

3.2 シリコン放射線検出器³⁾

この検出器についてはよく知られているので原理的な説明は省く。

シリコン結晶の一般的特性をTable 3.2.1に示す。

シリコン放射線検出器としては次の様な種類がある。

1) 表面障壁型検出器

これは化学エッチングにより表面処理を施したシリコン単結晶の表面にある種の金属（通常n型シリコンに対しては金、p型シリコンに対してはアルミ）を蒸着して製作される。このため荷電粒子に対して不感領域となる入射窓の厚さは非常に薄く出来る（～数 $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ）反面表面が機械的接触に対し弱い欠点がある。特に金蒸着面は、はがれ易いので取扱いに注意を要する。

2) n-p接合型検出器

これはn, pいずれかの型のシリコン素材の表面付近にその逆の型を形成する不純物を熱拡散法あるいはイオン注入法により入れて製作する。したがって表面は機械的接触に対して丈夫である。熱拡散により作られたものは入射窓が若干厚いが、イオン注入法により作られるものは非常に薄いものが安定して出来る。

1) 2) 共検出器の作動原理は同じで n-p 接合部 (表面障壁型の場合シリコンと金属の接触面が一種の n-p 接合になっていると考えられる) に生ずる空乏層 (空間電荷層ともいう) が放射線の有感領域となるわけでこの厚さは

$$d = \begin{cases} 0.57 \sqrt{\rho (V+V_0)} & (\mu\text{m}) \quad (\text{n-Si の場合}) \\ 0.33 \sqrt{\rho (V+V_0)} & (\mu\text{m}) \quad (\text{p-Si の場合}) \end{cases} \text{-----}(3.1)$$

ρ : Si 素材の比抵抗 (Ωcm)

V : 逆バイアス電圧 (V)

V_0 : 熱平衡状態における固有障壁電圧 $V_0 \approx 0.5\text{v}$

で表わされ Si 素材の比抵抗, 検出器にかける電圧に依存する。この関係をノモグラフに表わしたものを Fig. 3.2.1 に示す。現在最高の厚さのものは P 型 $100 \sim 150\text{K}\Omega\text{cm}$ の素材を用いて 1KV 電圧で $4 \sim 5\text{mm}$ のものが作られているが、⁴⁾ 一般的には数 $100 \sim$ 数 $1000\Omega\text{cm}$ の素材で 100V 程度の電圧で $100 \sim$ 数 $100\mu\text{m}$ 程度の所で使用されている。また薄肉の素材 ($10 \sim 100\mu\text{m}$ 程度) を用い検出器全体を空乏層 (全体空乏層型) にしたものがあり, 荷電粒子の dE/dx を測定するのに使用されている。(dE/dx 型ともいわれる)。

3) リシウムドリフト型検出器 (Si(Li) と略記される)

p 型シリコン中にドナー不純物であるリシウムイオン (Li^+) をドリフトし, アクセプター不純物を完全に補償してやると, この領域が一種の真性半導体 (i 領域と呼ばれる) となり放射線の有感領域となる。これはその構造から nip 型検出器とも呼ばれ 1) 2) の場合と異なりバイアス電圧に無関係な肉厚の検出器となる。これはこの形のまゝでは窓厚が厚いので, リシウムをシリコンウェハの裏面まで完全にドリフトしその面に 1) で述べた表面障壁を作り薄窓にして使用される。

シリコン中の荷電粒子の飛程とエネルギーの関係を第 Fig 3.2.2 に示す。検出器の有感部の厚さは対象とする粒子の飛程より若干大きければよいわけであるが (例えば $^{239}\text{Pu}-\alpha$ の場合 $E_\alpha = 5.15\text{MeV}$ でシリコン中の飛程 $\sim 25\mu\text{m}$) , 面積の大きい検出器になると, 静電容量が大きくなるため後で述べる様にエネルギー分解能あるいは位置分解能の劣化の原因となる。このため大面積の検出器では他に支障のない限り厚さを増して静電容量をなるべく減らす様にした方がよい。

シリコン検出器の静電容量は誘電率 1.2 の平行平板コンデンサーと考えられるから

$$C = 1.1 \times 10^4 \text{ S} / d \text{ (pF)} \text{-----}(3.2)$$

S : 検出器有感部面積 (cm^2)

d : 検出器有感部厚さ (μm)

で与えられる。

荷電粒子がシリコン中に電子・正孔対を作るに要する平均エネルギー ϵ (W 値) は 3.62

eVであるからエネルギーEの荷電粒子により作られる電子，正孔対の数

$$N = E / \varepsilon = E \text{ (eV)} / 3.62 \text{ eV} \quad \text{-----}(3.3)$$

で与えられる。 $^{239}\text{Pu}-\alpha$ ($E_\alpha = 5.15 \text{ MeV}$)の場合 $N = 1.42 \times 10^6$ である。電荷量にすると $2.28 \times 10^{-13} \text{ coulomb}$ となる。

これらの電子および正孔は検出器にかけられた電場によりそれぞれの電極へ集められて行く。これらの移動速度は

$$u = \mu E \quad \text{-----}(3.4)$$

E : 電場

μ : キャリアの移動度

$$\mu_e = 1350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec at } 300\text{K} \text{ (電子)}$$

$$\mu_h = 480 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec at } 300\text{K} \text{ (正孔)}$$

で与えられるが，最終的には結晶格子による散乱等で最大速度がきまり両キャリアー共に

$$u_{\max} \simeq 10^7 \text{ cm/sec at } 300\text{K} \quad \text{-----}(3.5)$$

程度である。

このキャリアーの電極への収集時間により検出器から生ずるパルスの立ち上がり時間がきまるわけでキャリアーが作られる場所に依存する。正孔が収集電極の反対側の電極付近に作られる時，最も時間がかかる。いま電場が場所によらず一定であるとする（Si(Li)の場合は一定であるが表面障壁型，n-p接合型では場所に依存する）。キャリアーの最大収集時間は

$$t_{\max} = d / u_h = d / \mu_h E = d^2 / \mu_h V \quad \text{-----}(3.6)$$

d : 検出器の有効厚

V : 電極間電圧

で与えられる。普通表面障壁型またはn-p接合型の場合収集時間は数ns～数10nsである。又5mmのSi(Li)に500V加えた場合には1 μ s位になる。

シリコン単結晶はその素材毎に異なったキャリアーの平均寿命（ライフタイム）を持っている（結晶中の格子欠陥あるいは不純物に起因する）。この結晶中に生成されたキャリアーが再結合あるいは捕獲されることなく収集電極に集められるためには，素材のライフタイム τ は次の条件

$$\tau \gg t_{\max} \quad \text{あるいは} \quad d \ll \mu \tau E \quad \text{-----}(3.7)$$

を満足しなければならない。したがって厚肉の検出器を製作する場合，ライフタイムの大きい素材を選ぶ必要がある。通常数100 μ s～数msのものが使用される。

この様な放射線検出器の固有エネルギー分解能即ち原理的に限界のエネルギー分解能は放射線により作られるキャリアーの数 N (3.3式) のゆらぎによって決まる。このゆらぎの標準偏差は

$$\Delta N = \sqrt{FN} \quad \text{-----}(3.8)$$

F : Fano 因子, シリコンの場合 $F \approx 0.05$

で与えられる。(3.8) および (3.3) 式より固有エネルギー分解能は半値巾で表わすと

$$\Delta E = 2.35 \sqrt{F \epsilon E} \quad \text{-----}(3.9)$$

で与えられる。 $E = 5.15 \text{ MeV}$ に対して $\Delta E \approx 2.3 \text{ keV}$ (fwhm) となる。実際にはこれに検出器の漏洩電流による雑音, 増巾器の雑音が加わり室温で使用する場合 1桁以上悪くなる。

検出器の漏洩電流には検出器内部を流れる体積漏洩電流と検出器表面に沿って流れる表面漏洩電流がある。体積漏洩電流には少数キャリアーの空乏層内への拡散によるものと空乏層内の捕獲中心で熱的に発生するキャリアーによるものがあり, 前者は 10^{-9} A 程度で無視できる, 後者の上限は

$$I_v = en_i u / 2\tau = 1.2 \times 10^{-9} \text{ v (cm}^3) / \tau \text{ (sec) (A)} \quad \text{-----}(3.10)$$

e : 素電荷 = $1.6 \times 10^{-19} \text{ coulomb}$

n_i : 真性半導体キャリアー濃度 = $1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$

v : 検出器体積

τ : キャリアーライフタイム

で与えられる。

表面漏洩電流は検出器製作工程における表面処理法, あるいは表面汚染等により大きく変動し, エネルギー分解能に大きく影響を及ぼすので製作過程における素材の取扱いには十分気をつけなければならない。

3.3 シリコン放射線位置検出器

シリコンを用いた放射線位置検出器は大別して次の3種類のものがある。

1) 電荷分割方式位置検出器 ^{5~16)}

この方式の一次元の位置検出器の原理図を Fig. 3.3.1 に示す。検出器の一方の面は抵抗性の電極でその両端に位置信号の取り出す電極 P_1 , P_2 があり, もう一方の面は普通の電極でエネルギー信号の取り出し電極 E である。 ^{5~13)}

この方式を二次元 (X, Y) にするにはこの抵抗性電極面に P_1 — P_2 と直角方向に更に信号取り出し電極をつけるかあるいは裏面を抵抗性電極にして P_1 — P_2 と直角方向から信号を取り出せばよい。^{10, 14~16)} 後者の場合エネルギー信号は P_1 および P_2 からの信号の和として与えられる。

いま Fig 3.3.1 の x の位置に放射線が入射したとする。放射線により作られた電子, 正孔のキャリアーは電場によりそれぞれの電極面にドリフトして行く。抵抗性電極面に到達したキャリアーはそこから拡散して両端の位置信号取り出し電極へ集められる。抵抗性電極面の抵抗分布が一様であれば最終的にそれぞれの電極へ集められる電荷量は

$$\begin{aligned} Q_{P_1} &= (1-x/L) Q \\ Q_{P_2} &= (x/L) Q \\ Q_E &= Q \end{aligned} \quad \text{----- (3.11)}$$

Q : 放射線により作られる電荷総量
L : 検出器の長さ

で与えられる。⁵⁾ Q は検出器内での放射線のエネルギー損失に比例するから, 位置信号は放射線の入射位置とエネルギーに比例する。こゝで 3.3.1 図に示す様な回路構成で位置信号とエネルギー信号の商をとれば位置信号としてエネルギーに無関係に位置のみに比例する信号を得ることが出来る。⁶⁾

この検出器の信号の立ち上がり時間は, 放射線により検出器内部に作られたキャリアーが電極面に到達する時間と抵抗性電極面に到達したキャリアーが位置信号取り出し電極に拡散して行く時間によって決まる。前者は (3.6) 式によって与えられるがいまこの時間は非常に早いと仮定し無視出来るとして (厚肉の検出器になるとこの仮定は問題になる) 即ち放射線が入射した瞬間にそれにより作られる電荷が抵抗性電極面に生ずると仮定する。又電荷の生ずる範囲は点状即ち放射線により電子, 正孔が作られる範囲は点状と仮定する。

(厚肉の検出器に長飛程の粒子が斜めに入射する様な場合この仮定は問題になる。) この様にして抵抗性電極面の一点に生じたキャリアーが拡散して行く様子は, 長さ L の検出器に連続的に一様分布した抵抗 R と静電容量 C によって与えられる拡散定数 (L^2/RC) によって表わされる拡散方程式

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{L^2}{RC} \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} \quad \text{----- (3.12)}$$

V : 電圧
t : 時間
x : 位置

を解くことによって得られる。検出器に対する初期条件, 境界条件を考慮してこれを解く

とそれぞれの電極に集められる電荷の様子は

$$\begin{aligned}
 Q_{P_1}(x, t) &= \frac{2Q}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{L} x \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2}{RC} t \right) \right] \\
 Q_{P_2}(x, t) &= -\frac{2Q}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{L} x \cdot \cos n\pi \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2}{RC} t \right) \right] \\
 Q_E(x, t) &= -\frac{2Q}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{L} x \cdot (1 - \cos n\pi) \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2}{RC} t \right) \right]
 \end{aligned}$$

----- (3.13)

で与えられる。⁵⁾無限大の時間後にはこれらは当然 (3.11) 式で与えられる結果となる。これを図に示すと Fig 3.3.2, Fig 3.3.3 の様になる。^{5, 7)}これは放射線の入射位置により検出器信号の立ち上がり時間が異なっていることを示している。放射線の入射位置と各電極における信号の立ち上がり時間の関係を Fig 3.3.4 に示す。これを利用して立ち上がり時間を測定することにより位置を検出することも出来る。(立ち上がり時間方式位置検出器)⁸⁾

この放射線の入射位置による信号の立ち上がり時間のバラツキのため、有限の整形時定数をもつ増巾回路系では測定値に非直線性を生ずる。この非直線性を 1% 以下に押えるためには増巾回路系の時定数は

$$\tau \geq 5RC/\pi^2 \quad \text{即ち} \quad \tau \geq RC/2 \quad \text{----- (3.14)}$$

となる様選ばなければならない。⁹⁾(実際には 1% 程度の非直線性は抵抗性電極面の抵抗分布の非一様性から生ずる場合が多い。)

電荷分割方式位置検出器の位置分解能は抵抗性電極面から生ずる熱雑音および検出器、増巾器の雑音等により決まる。したがってこれは後に述べられる様に整形回路系の方式に依存する。こゝで主な成分は抵抗面から生ずる熱雑音でそれによる位置分解能は近似的に

$$\Delta P \approx K \left(\frac{T\tau}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{L}{E} \quad \text{----- (3.15)}$$

あるいは (3.14) の条件を入れて

$$\Delta P \approx K' (TC)^{\frac{1}{2}} \frac{L}{E} \quad \text{----- (3.16)}$$

K, K' : 比例定数

T : 検出器の温度

τ : 増巾回路系の時定数

C : 検出器静電容量

R : 検出器位置信号取り出し電極間の抵抗

L : 検出器位置信号取り出し電極間の距離

E : 検出器内での放射線のエネルギー損失

9~12)

で与えられる。これによると決まった表面積の検出器で一定エネルギーの放射線を測定する場合、位置分解能を良くするにはCを小さくすることが必要である。更に分解能を良くするには低温にする以外にはない。¹²⁾

2) チェッカーボード方式位置検出器^{17~19)}

これはFig. 3.3.5に示す様に検出器の電極が多数の短冊状に分割され、その各々から信号を取り出す方式である。XY二次元の場合、検出器の両面に短冊状電極を直交する様つけておけばよい。

この検出器の位置分解能は短冊状電極の巾とその間隙で決まる。

この検出器の特長はデジタル化された早い信号が得られることであるが、多数の増巾器を必要とし読み出し方式が複雑になるという欠点がある。また各電極間の信号の相互誘導等の問題があり、読み出し回路系に種々の技術的工夫が必要である。

以上の短冊状電極方式の他に一つの半導体素材の上に多数の小検出素子を並べて使用する方式が考えられる。読み出し方式としてビデオ方式²¹⁾、CCD (charge coupled Device)²²⁾方式等考えられているが現在では殆んど物理実験には使用されていない。

3) 混合方式^{23, 24)}

これはFig. 3.3.6に示す様にチェッカーボード方式の検出器の電極間に外部抵抗を取りつけ読み出し方式を単純化したものである。

この検出器の場合、信号の立ち上り時間は電荷分割方式の場合と同様で外部抵抗、検出器静電容量および放射線の入射位置に依存する。また位置分解能は短冊状電極の巾かあるいは電荷分割方式で決まる位置分解能(3.15, 3.16式)のいずれか悪い方で決まる。

電荷分割方式の検出器においては一樣抵抗分布の抵抗層を作ることが中々困難であること又チェッカーボード方式においては読み出し方式が複雑であることから両者の折衷案としてこの方式の検出器がよく用いられている。

3.4 シリコン放射線検出器の製法

半導体検出器の製法はそれぞれの製作者により多少異なる部分があるが大筋は大体同じである。ここでは先ずわれわれが行なっている通常のシリコン表面障壁型検出器およびリシウムドリフト型シリコン検出器の製法について述べ、次にそれらを用いた位置検出器の製法について述べる。

先ず最初にいずれの型の検出器を製作するにも共通な事項から述べよう。

1) シリコン単結晶

これは製造会社より購入するわけであるがその選ぶ基準は次の如くである。

① 伝導型

表面障壁型の場合 n 型, p 型いずれでもよいが, 普通 n 型がよく用いられる。

Si (Li) の場合 p 型を用いる。

② 比抵抗

表面障壁型の場合有感領域の厚さに関係するので, 対象とする放射線のエネルギーと使用するバイアス電圧の関係より適当な値を選ぶ。(3.1 図を参照するとよい) 普通の市販品では数 100~数 1000 Ωcm 程度である。前にも述べた様に特注品で 100~150 $\text{K}\Omega\text{cm}$ の素材があるが現在の所面積は小さい(直径~1 インチ)。

Si (Li) の場合比抵抗は無関係であるが普通 100~1000 Ωcm のものが使用される。

③ 直径

目的の大きさのものを選ぶ, 現在市販品で 1~3 インチである。特注品として直径 3 インチのものを縦方向にカットしてもらえば更に大面積のものが得られる。

④ 厚さ

測定対象とする放射線の飛程および機械的強度を考慮して所定の厚さにカットしてもらおう。

⑤ ライフタイム

前にも述べた様に出来る丈長いものがよい。通常数 100 μsec ~数 msec のものが使用される。

⑥ 転位密度

結晶格子欠陥を表わすものであるから出来る丈少ないものが望ましい。普通 $10^2 \sim 10^4 / \text{cm}^2$ 位である。なお $10^3 / \text{cm}^2$ 以下のものは dislocation free と云われる。

⑦ 表面仕上げ

出来れば 1500~2000 番位のカーボランダム (SiC) あるいはアルミナ (Al_2O_3) で表面研磨してもらおう。

2) 表面研磨

素材購入時に前述⑦の表面仕上げがしてあればこの必要がないが, 表面がカットしたままの状態の時は前述の研磨剤を用いて平滑なガラス板上で表面カットの跡が無くなるまで研磨する。

3) 洗浄

超音波洗浄器を用いトリクロルエチレンで十分脱脂を行なった後(トリクロルエチレン中で煮沸する場合もある)。アセトンで置換する。次に脱イオン水で洗浄した後, 硝酸に

より金属イオンを除去する（硝酸中で煮沸する場合もある）。

こゝでシリコン素材の取扱いについては特にその清浄さに気をつけねばならない。前にも述べた様にこの製作過程において生ずる表面汚染が検出器の表面漏洩電流のもとなり分解能劣化を招く。洗浄に使用する純水（脱イオン水）、有機溶剤、酸その他の薬品類の純度（通常半導体用を使用）、使用する器具等の清浄度に気をつける必要がある。また取り扱う場所周辺の雰囲気にも気をつけなければならない。

3.4.1 シリコン表面障壁型検出器の製法

前記共通事項の処理を行なった後次の工程に入る。

1) 化学エッチング

硝酸、弗酸、水酢酸の混液（体積比2：1：1）を用いて表面加工層の部分を溶かし去る。清浄なポリエチレンまたはテフロンビーカーを使用し、エッチングの気泡がシリコン表面に停滞しない様ビーカーを動かしながら行なう（専用の装置を使用することもある）。大体数分で数100 μ m エッチングされ鏡面状態が得られる。次にビーカー中に多量の脱イオン水を注ぎエッチング反応をとめる。

エッチングされたシリコンウェハーは一般にエッチングの間上面になっている方がきれいに仕上るので通常この面を放射線の入射面になる様取扱う。

2) 水洗

水洗専用のビーカーにウェハーを移し数回脱イオン水を交換して十分な水洗を行なう。

3) 乾燥

清浄な口紙上にウェハーを移し、すみやかに水を切って乾燥する。この場合空気中の塵埃等がつかない様気をつける。（このまゝ数日清浄な所へ保管することもある。）

4) マウント

マウントの方法は用途により種々ある。通常Fig 3.4.1に示される様に、アクリル板あるいは電子回路用エポキシ基板を加工した枠にマウントする。あらかじめ中性洗剤等でよく洗浄された枠にエポキシ系接着剤を用いてウェハーを固定する。（この場合エポキシ接着剤の種類によって生ずる電極周辺部の強電場を緩和するため、シリコン素材の型によりn型用、p型用エポキシと区別して用いる場合がある。²⁵⁾

なおマウント用枠からの電極リード線は次に述べる蒸着によってシリコン面と電氣的接続する様にしておく。

5) 電極蒸着

マウントされたシリコンの表面およびリード線の一部が蒸着される様なマスク（金属製）を用いて真空蒸着装置内で一方の面に金、他方にアルミを蒸着する。蒸着膜の厚さは通常数10～100 μ g/cm²程度にする。真空度は10⁻⁵～10⁻⁶Torr位で行なう。

前にも述べた様にシリコン結晶がn型の場合金側に表面障壁が出来放射線の入射面となりアルミ側はオーム接触となる。p型シリコンの場合はこの逆になる。

9) 再生

上記の様にして出来上がった検出器の蒸着面が汚染あるいは機械的接触等ではがれて特性が劣化した場合、その面の蒸着金属を溶かし去って（金の場合王水、アルミの場合苛性ソーダを用いる）脱イオン水で洗浄した後再度蒸着することにより特性は復帰する場合が多い。（王水を使用する場合、リード線が多少浸されるが別に問題はない。）

3.4.2 Si(Li) 検出器の製法

前記共通事項の処理を行なった後次の工程に入る。

1) リシウム拡散

熱電対のついたヒーター（上面がグラファイト又は銅製）の上にp型シリコン素材をのせ真空蒸着装置内で350～400℃に加熱しリシウムを適量蒸着する。この場合シリコン側面に蒸着されない様適当なマスクを使用するか側面にカーボン粉末を水で溶かしたものを塗布しておく。シリコン内に拡散されるリシウムの濃度分布は

$$N_d = N_0 \operatorname{erfc} \left[x / 2 \sqrt{Dt} \right] \quad \text{-----}(3.17)$$

N_0 : 表面濃度, $N_0 \sim 10^{18}$ atom $350 \sim 450^\circ\text{C}$

D : 拡散係数, $D = 2.5 \times 10^{-3} \exp(-7600/T)$

t : 拡散時間

x : 表面からの深さ

で与えられる。シリコン素材の不純物濃度を N_a とすると n-p 接合の境界の位置 X_j は

$$X_j = 2 \sqrt{Dt} \operatorname{erfc}^{-1} (N_a / N_0) \quad \text{-----}(3.18)$$

で与えられる。これらの関係を表わすノモグラフを Fig 3.4.2 に示す。

通常～5分位の拡散時間で～200μm程度の拡散層（n-p接合境界の位置）を得る。拡散後蒸着装置内に空気を入れ、シリコン素材をヒーターから離し冷却する。この場合素材を急冷すると破損するおそれがあるので注意を要する。冷却後水洗して表面に残るリシウムを洗い落とす。

2) 拡散チェック

硫酸銅の飽和溶液に数% 弗酸を加えた溶液中に素材を浸し赤外線ランプで照射すると接合部が銅メッキされ拡散をチェックすることが出来る。

側面にリシウムが付着している場合ラッピングして削り落とす必要がある。

3) 化学エッチング

有機溶剤，硝酸，脱イオン水で洗浄し，両面を耐酸テープあるいはピセインワックス等で覆い側面のみをエッチングする（20～30分位）

4) リシウムドリフト

リシウムが拡散されたシリコンに逆バイアス電圧をかけ高温にすると，接合部付近のリシウムがドリフトされる。ドリフトの割合および巾は

$$\frac{dw}{dt} = \frac{V}{W} \mu$$

$$W = (2 \mu V t)^{\frac{1}{2}} \quad \text{-----}(3.19)$$

W：ドリフト領域の巾

V：逆バイアス電圧

μ ：リシウムイオンの移動度， $\mu = \frac{29.0}{T} \exp\left(\frac{-7600}{T}\right)$ ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$)

T：温度

で与えられる。これらの関係を表わすノモグラフをFig 3.4.3 (A, B) に示す。

ドリフト装置としては種々考案されているがこゝではFig 3.4.4に示す様な装置を使用する。（これはシリコン素材に一定電流を供給しドリフトの間シリコンに消費されるパワーを制御する方法で，簡単で信頼性のある方法である。）

ドリフトは $\sim 10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 以下の範囲で行なう。薄窓の検出器を作るためにリシウムが素材の裏面に到達するまで行ないこの面を放射線の入射面とする。

②で用いた方法でドリフト状態をチェックする。両面薄窓の検出器にするためにはリシウム拡散層をラップして削り落とす。

5) 有機溶剤，硝酸，脱イオン水で洗浄後，以後の操作は表面障壁型検出器を作る場合と同じである。たゞしリシウム拡散層側にアルミ蒸着，つきぬけた面に金を蒸着する。

3.5 シリコン放射線位置検出器の製法

3.5.1 電荷分割方式位置検出器の製法

この方式で問題になることは抵抗分布の様な抵抗性電極を作る方法で，現在次の3種類の方法が用いられている。

- ① 拡散法
- ② イオン注入法
- ③ 蒸着法

①②はシリコンウェーハ表面にドナーまたはアクセプター不純物を所定の抵抗値になる様熱拡散あるいはイオン注入して作る方法で、安定した丈夫な表面抵抗層が得られる。特にイオン注入法で作られるものは薄窓で抵抗分布の一樣性に優れている。たゞこれらの方法は高温加熱処理を必要とするのでSi(Li)検出器には使用出来ない。Si(Li)ではリシウム拡散層自身を利用して作られた例がある。¹⁾

③の方法は比較的簡単に出来るため一般によく用いられておりわれわれも採用しているのでこゝではこの蒸着法について述べる。

この方法で問題になるのは蒸着物質の選択である。これは半導体と接触して良好な整流特性あるいはオーム性接触を示し、所定の抵抗値になる様蒸着した場合適当な膜厚を有しその抵抗分布の一樣性の良いものでなければならない。種々の高比抵抗を有する金属類(Pd, Bi, NiCr等)^{7,10,28)}を用いて試作されているが室温で良好な結果を得ることは中々難しく、現状では確立された方法はない。

われわれはn型シリコンに対し整流性接触をするPdを真空蒸着して抵抗性電極をもつ位置検出器を試作したのでその方法について述べる。(オーム性接触を示す適当な物質は未だ見当らない。)

1) n型シリコンまたはSi(Li)素材を用い、マウントまでの素材の処理工程は前記通常の検出器の場合と全く同じである。たゞしマウント枠の電極リード線は信号取り出し電極の位置に必要な数丈つけ、それぞれ蒸着によってシリコン面の電極と電氣的に接続する様にしておく。抵抗性電極側が放射線の入射面となるので素材はその様にマウントする。

2) 位置信号取り出し電極の蒸着

シリコン表面の両端に~1mm巾の帯状に蒸着される様なマスクを用いて金を厚く(~100 μ g/cm²)蒸着する。この場合同時に前述のマウント枠のリード線に蒸着され電氣的に接続する様にしておく。

3) 抵抗性電極面の蒸着

シリコン表面全面に蒸着されるマスクを用い、位置信号取り出し電極間の抵抗値をモニターしながら、パラジウム(Pd)を所定の抵抗値になる様(通常10~20K Ω)蒸着する。

この場合蒸着用ヒーターから発する光により発生するキャリアーのため、蒸着中の抵抗値は大巾に変動するので注意を要する。又別にガラス板等を用いて抵抗モニターする方法もあるが、シリコン面と表面状態の相異等によりかなり異なった値になることがあるので注意を要する。

4) エネルギー信号用電極面の蒸着

これは通常の検出器の場合と同様に、裏面のシリコン表面全体にオーム性接触となる

アルミを蒸着する。

3.5.2 チェッカーボード方式位置検出器の製法

これは拡散型検出器では特殊鋸，レーザービーム，化学エッチング等で溝を掘って，分割された短冊状電極が作られる。

表面障壁型あるいはSi(Li)検出器の場合蒸着により短冊状電極が作られるので，その製作工程は前記通常の検出器の場合とシリコンマウント用の枠および蒸着マスクが異なる丈で他は全く同じである。

マウント用の枠はシリコン面の短冊状電極をつける位置に電極リード線をつけたものをアクリル板または回路用基板で作る。

蒸着用マスクは通常の検出器用のマスクの枠の中に，製作しようとする短冊状電極巾の間隔で100～500 μ mの線（又はリボン線）を張って作る。この場合これを前記マウント枠に合わせた時に，それぞれのリード線がこれらの線（又はリボン線）の間に来る様にする。又このマスクとシリコン面との間隙はなるべく接近する様にする（0.5～1mm程度）。

3.6 α 放射性粒子粒径測定用位置検出器の試作

1) 設計方針

対象とする α 線は主として $^{239}\text{Pu}-\alpha$ ($E_{\alpha}=5.15\text{MeV}$)である。これが口紙に付着しているのでエネルギーにかなりの拡がりをもつ，このため検出器自身のエネルギー分解能はそれ程良いものは要求されない。

位置検出器は位置そのものを測定する必要がないので位置と位置信号間の直線性は特に要求されないが，口紙に付着した個々の α エーロゾルが分離測定出来る位置分解能を必要とする。これは口紙に付着している α エーロゾルの密度に依存するわけで，分解能の決まった検出器ではその分解能内に2ヶ以上のエーロゾルが付着しない様サンプリング時間の調整を行なえばよい。

位置検出器としては2次元のもので口紙が密着出来るものならどの型でもよい。そこで今回はこの種の測定に対する検出器の特性を調べるため，比較的容易に安定したものが出来る表面障壁型のチェッカーボード方式で回路系を簡単化するため外付抵抗による電荷分割方式即ち混合方式の位置検出器を試作した。

2) 仕様

検出器の図をFig 3.6.1 (A, B)に示す。

仕様は次の通りである。

2.1) 50mm ϕ 検出器

① シリコン素材の特性

- 1) Orientation ; 1-1-1 within 1 deg
- 2) Diameter 51.6 mm
- 3) Life time 2000 microsec
- 4) Thickness 2mm
- 5) N-type Phos-doped
- 6) Specific resistivity 1.7×10^4 ohm-cm
- 7) dislocation free

② 電極：チェッカーボード方式

入射面 金蒸着, 巾5mm, 間隔100 μ m, 電極数11本
裏面 アルミ蒸着, 巾5mm, 間隔100 μ m, 電極数10本

③ 外付抵抗

入射面 各電極間1K Ω , 全体 10K Ω
裏面 各電極間1K Ω , 全体 9K Ω

2.2) 7.6mm ϕ 検出器

① シリコン素材の特性

- 1) Orientation 1-1-1
- 2) Diameter 76.80 mm
- 3) Lifetime 2300 microsec
- 4) Thickness 300 μ
- 5) P type B-doped
- 6) Specific resistivity 1500 ohm-cm
- 7) dislocation free

② 電極：チェッカーボード方式

入射面 金蒸着, 巾5mm, 間隔100 μ m, 電極数15本
裏面 アルミ蒸着 " " "

③ 外付抵抗

入射面 各電極間 270 Ω , 全体 3.8K Ω
裏面 各電極間 " 全体 "

Table. 3.2.1. Basic properties of intrinsic silicon

Atomic number	14
Atomic weight	28.09
Stable isotope mass numbers	28-29-30
Density (300°K); g cm ⁻³	2.33
Atoms cm ⁻³	4.96×10^{22}
Crystal structure	Diamond type
Lattice constant (300°K); cm	5.429×10^{-8}
Melting point; °C	1420
Boiling point; °C	2600
Thermal expansion coefficient; °C ⁻¹	4.2×10^{-6}
Thermal conductivity; cm ⁻¹ s ⁻¹ °C ⁻¹	0.20
Specific heat (273°-373°K); cal g ⁻¹ °C ⁻¹	0.181
Dielectric constant	12
Forbidden energy gap (300°K); eV	1.115
Forbidden energy gap (0°K); eV	1.165
Intrinsic carrier density (300°K); cm ⁻³	1.5×10^{10}
Intrinsic resistivity (300°K); Ωcm	2.3×10^5
Electron mobility (300°K); cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	1350
Hole mobility (300°K); cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	480
Electron mobility (77°K); cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	2.1×10^4
Hole mobility (77°K); cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	1.1×10^4
Carrier saturation velocity; cm s ⁻¹ (300°K)	8.2×10^6
Carrier saturation velocity; cm s ⁻¹ (77°K)	$\approx 10^7$
Electron diffusion constant (300°K); cm ² s ⁻¹	38
Hole diffusion constant (300°K); cm ² s ⁻¹	13
Work function; eV	5.0
Energy per hole-electron pair (300°K); eV	3.62
Energy per hole-electron pair (77°K); eV	3.76

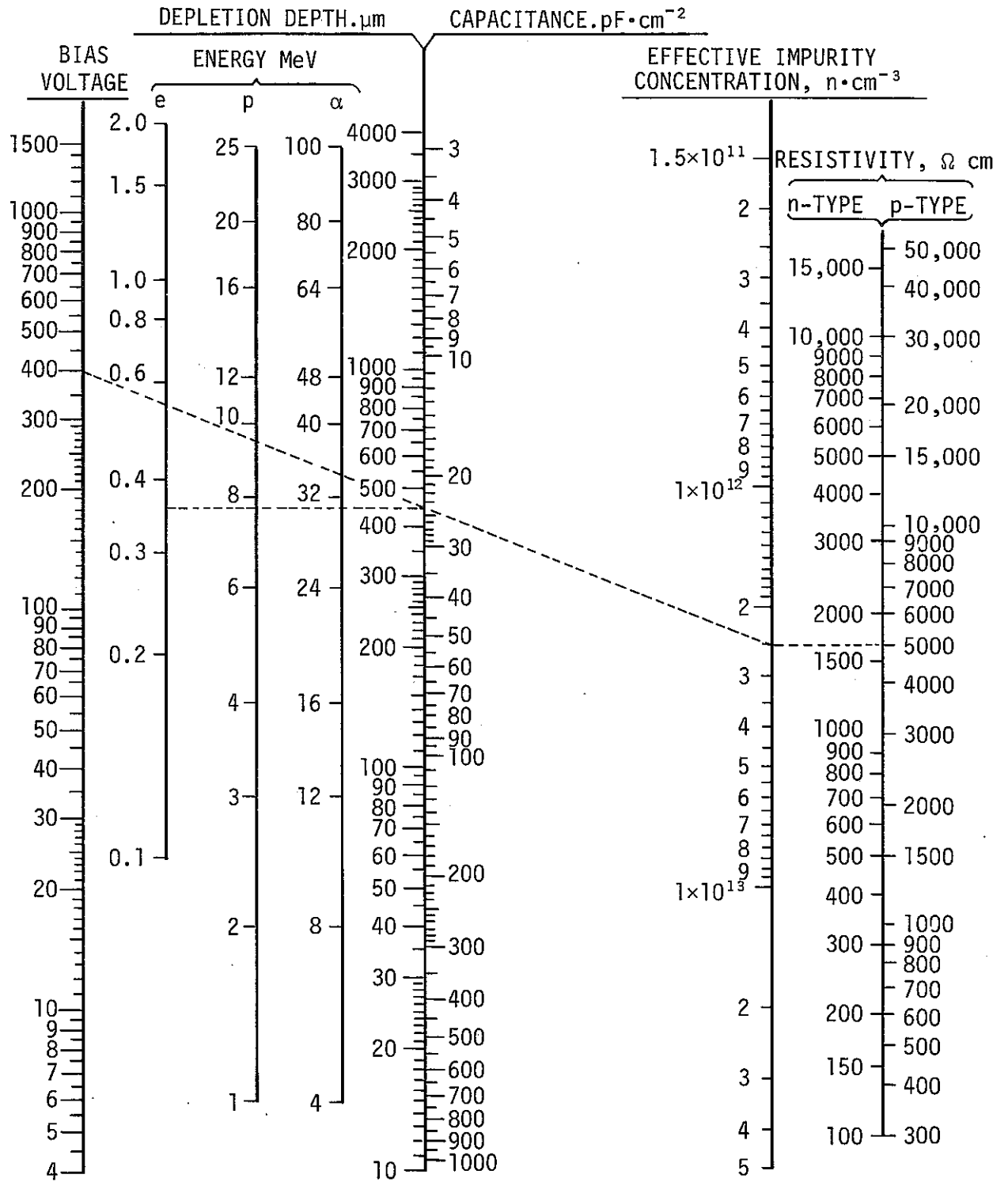


Fig. 3.2.1 Silicon diode nomograph, computed using carrier mobilities of 1500 and 500 for electrons and holes respectively. This nomograph does not apply to lithium-drifted devices.

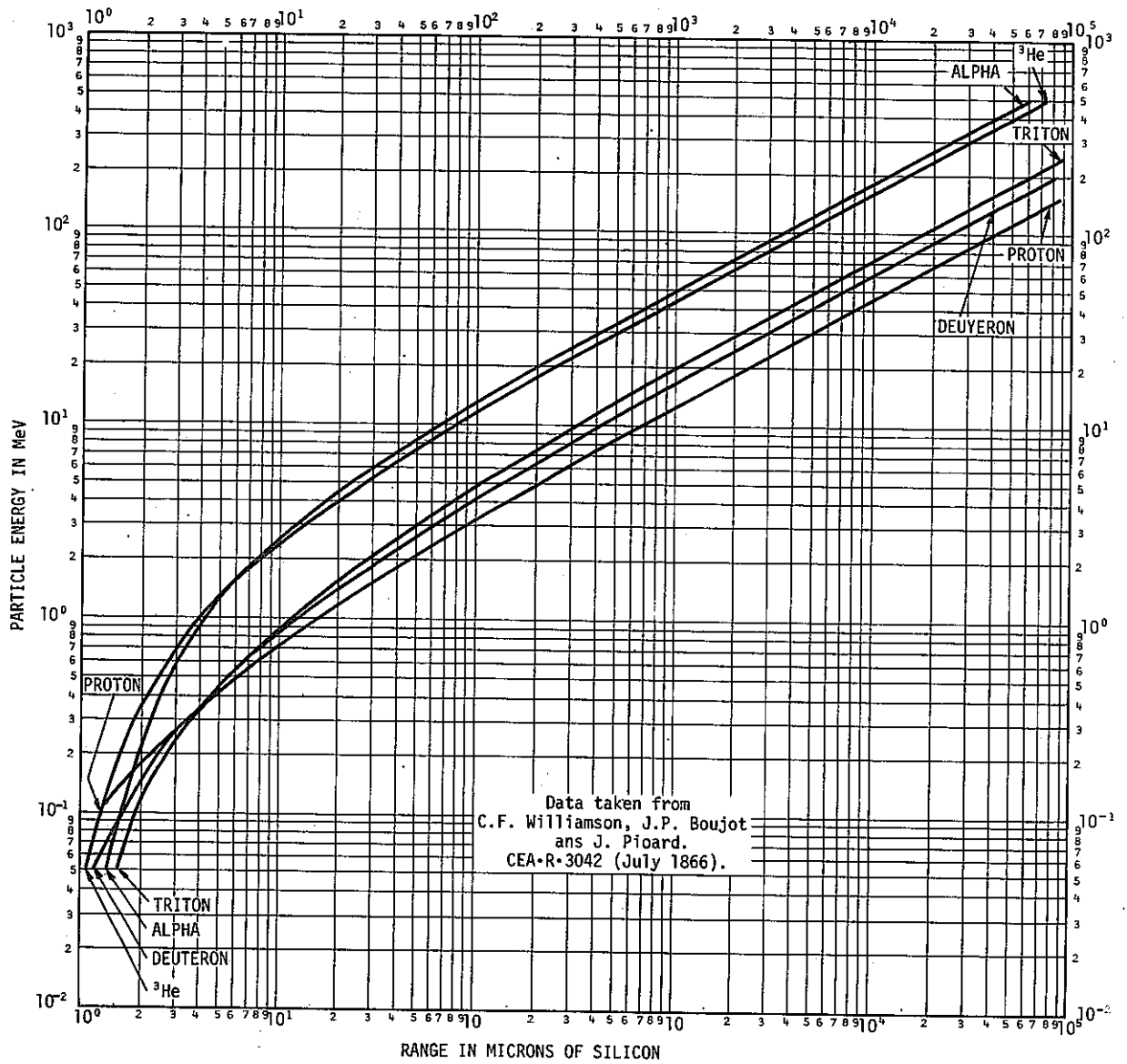


Fig. 3.2.2. RANGE-ENERGY CURVES

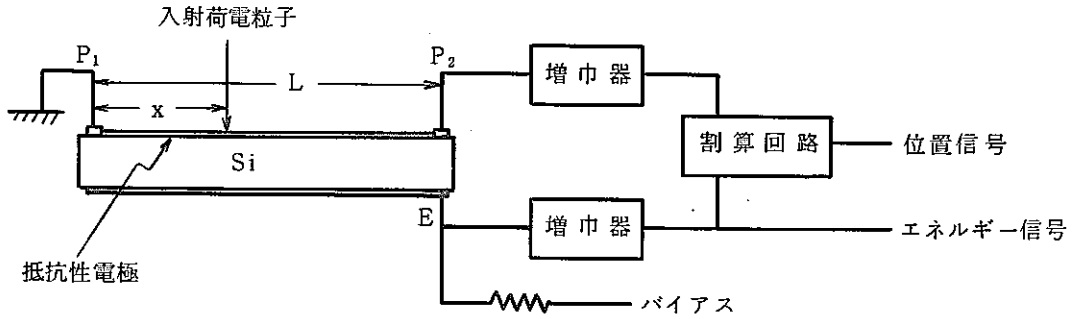


Fig. 3.3.1. 1次元位置検出器原理図

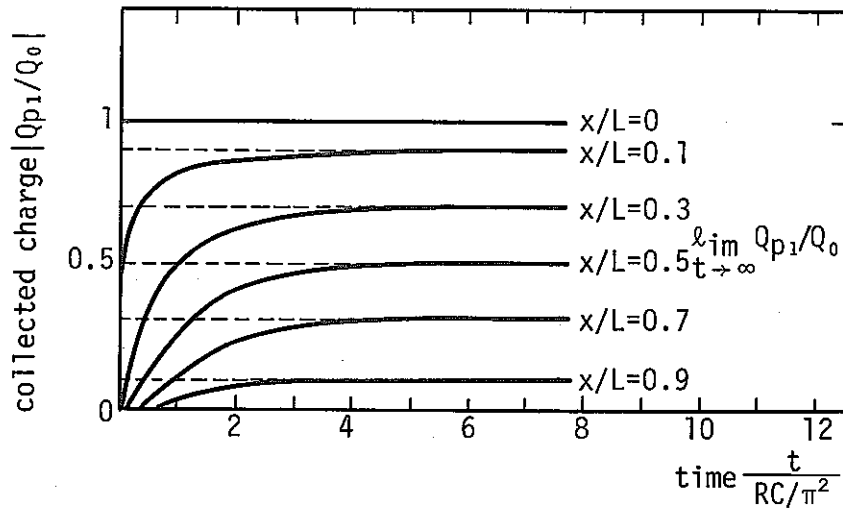


Fig. 3.3.2. The fractional amount of charge collected at a position contact as a function of time for various positions of incidence. The dimensionless time scale is given in units of the fundamental time constant RC/π^2 .

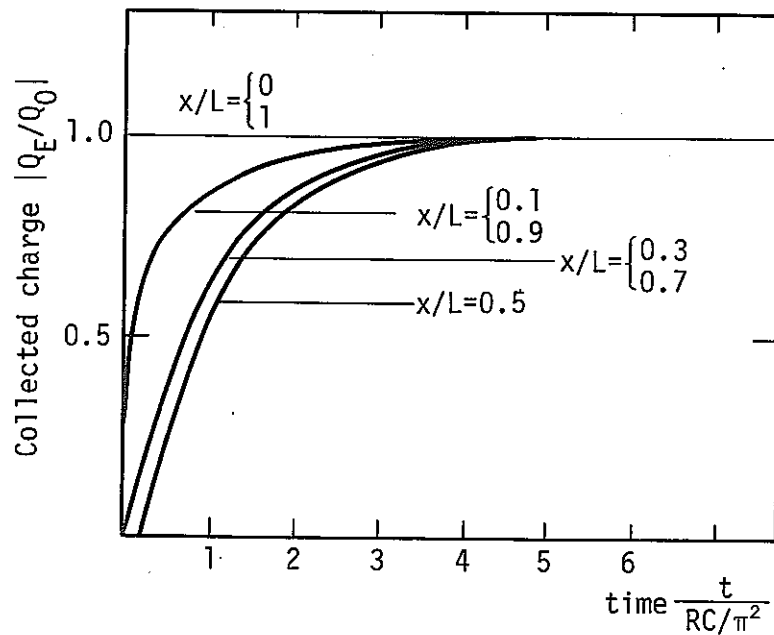
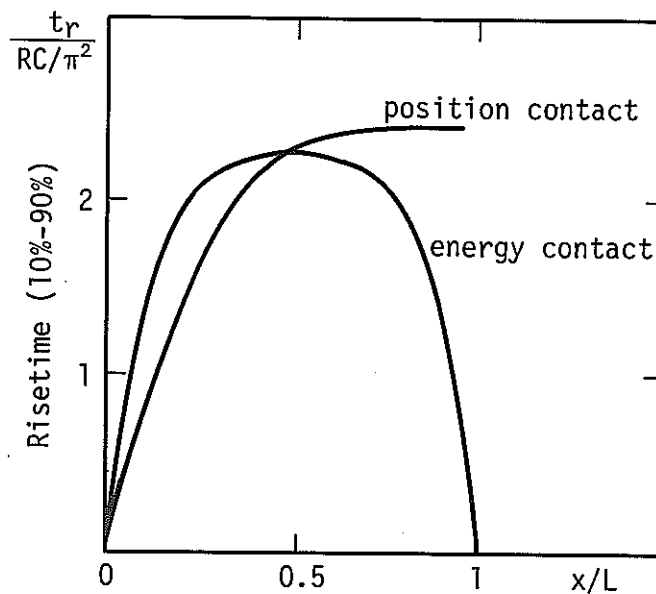


Fig. 3.3.3 The charge collected at the energy contact as a function of time for various positions of incidence. The kinetics of charge collection are the same for points equidistant from the center of the RC-line at $0.5L$.



Position of a particle incident on the detector.

Fig. 3.3.4. The rise times in units of the fundamental time constant for both energy and position contacts as a function of the position of incidence.

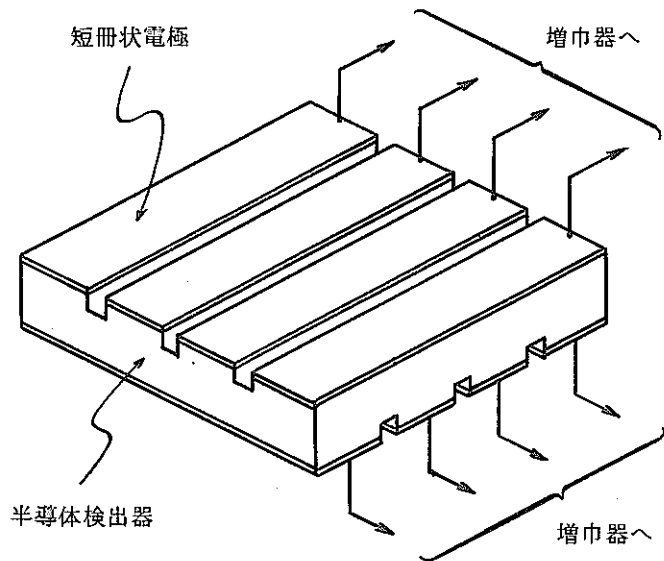


Fig. 3.3.5. チェッカーボード検出器原理図

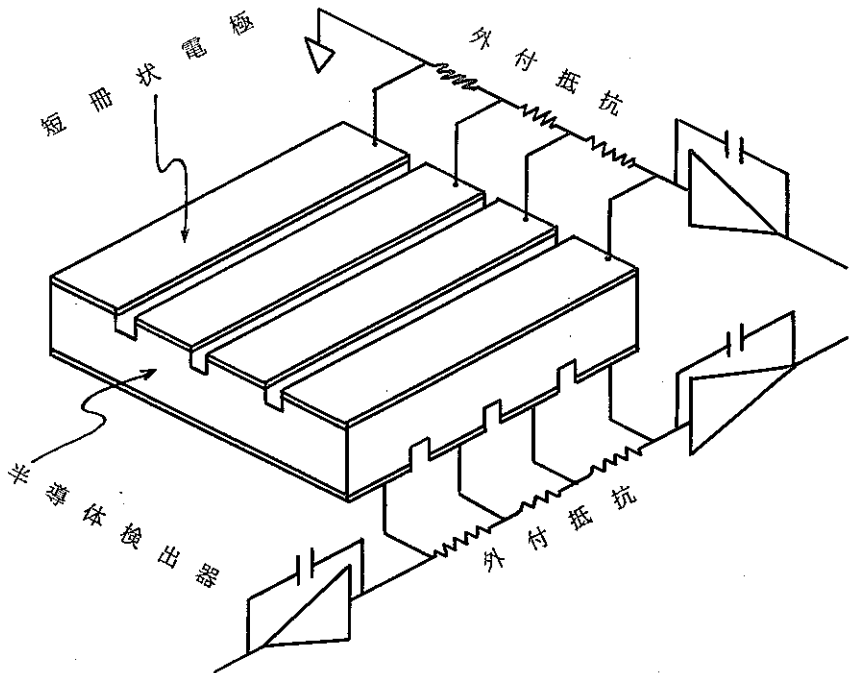


Fig. 3.3.6. 混合方式検出器原理図

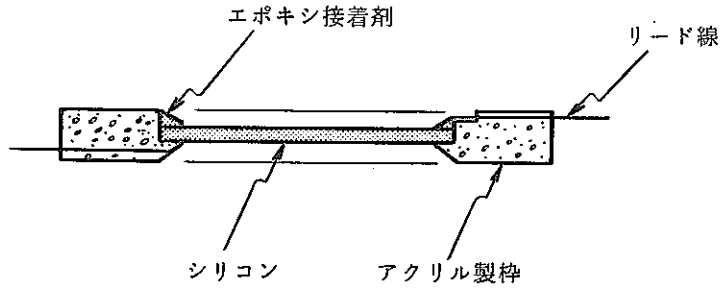
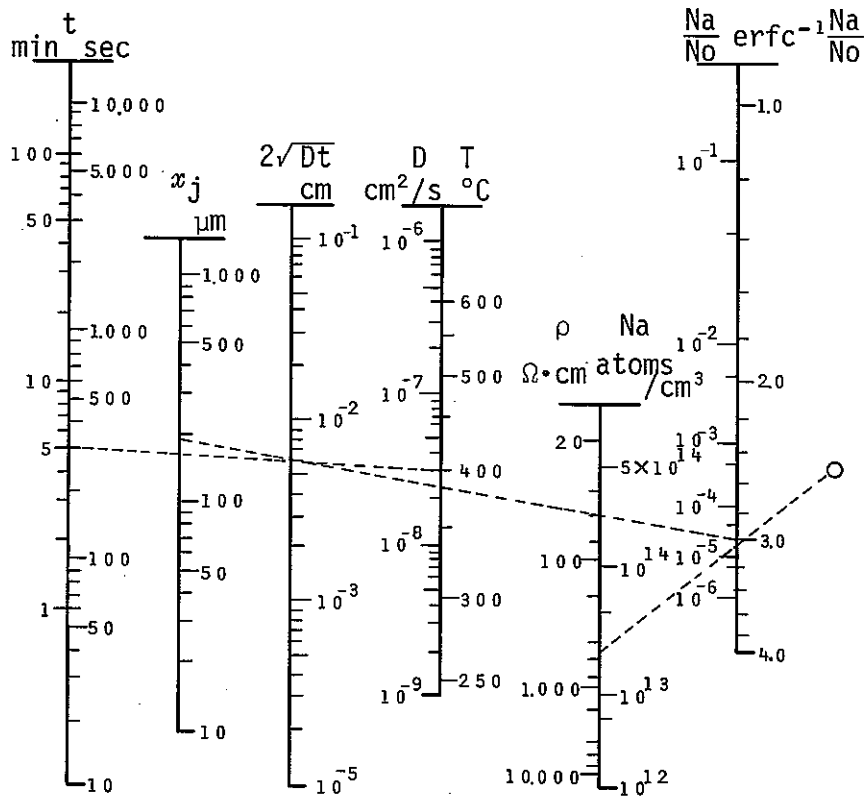


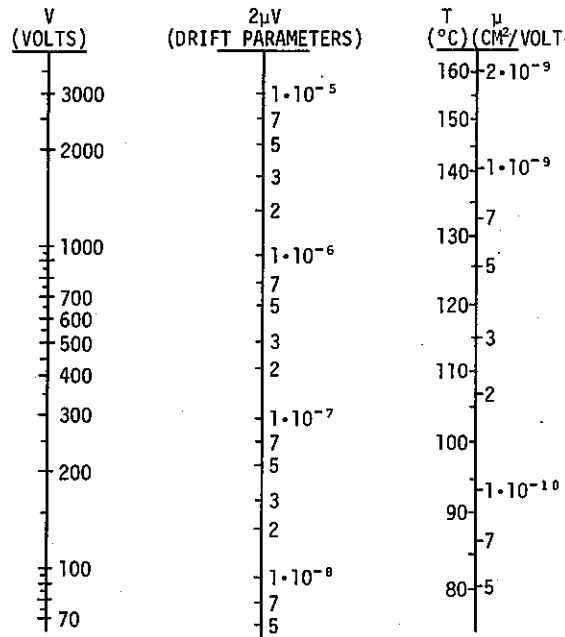
Fig. 3. 4. 1 シリコンウエハーマウント時断面図



$$x_j = 2\sqrt{Dt} \operatorname{erfc}^{-1} (Na/No)$$

$No \sim 10^{18} \text{ atoms/cm}^3 \text{ (350} \sim \text{450}^\circ\text{C)}$

Fig. 3. 4. 2 P型シリコン中のリシウム拡散に関するノモグラフ



NOTE: DRIFT MOBILITY OF LI IONS IS GIVEN FOR SILICON WITH LOW OXYGEN CONCENTRATIONS.

Fig. 3.4.3.A Lithium drift parameter nomograph for oxygen-free silicon.

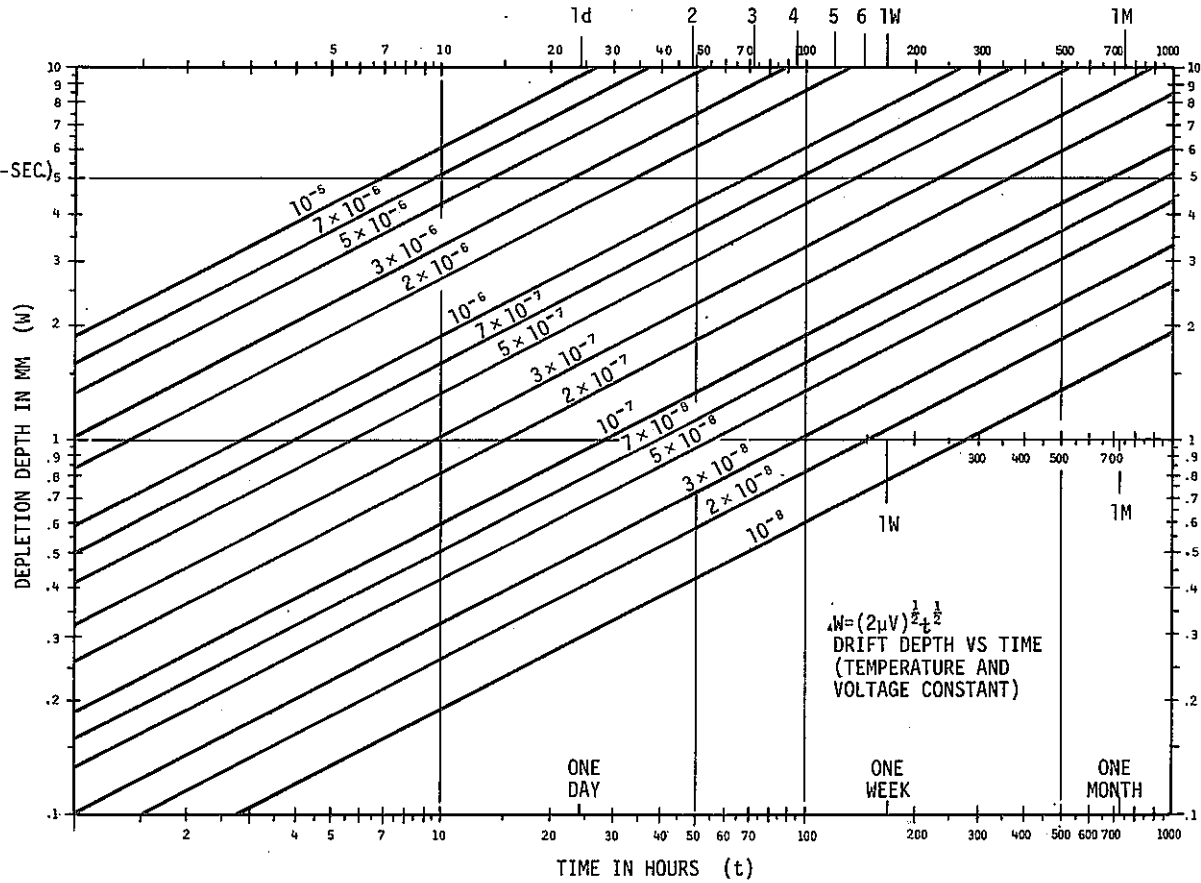


Fig. 3.4.3.B Drifted depth as a function of time for various drift parameters (2μV).

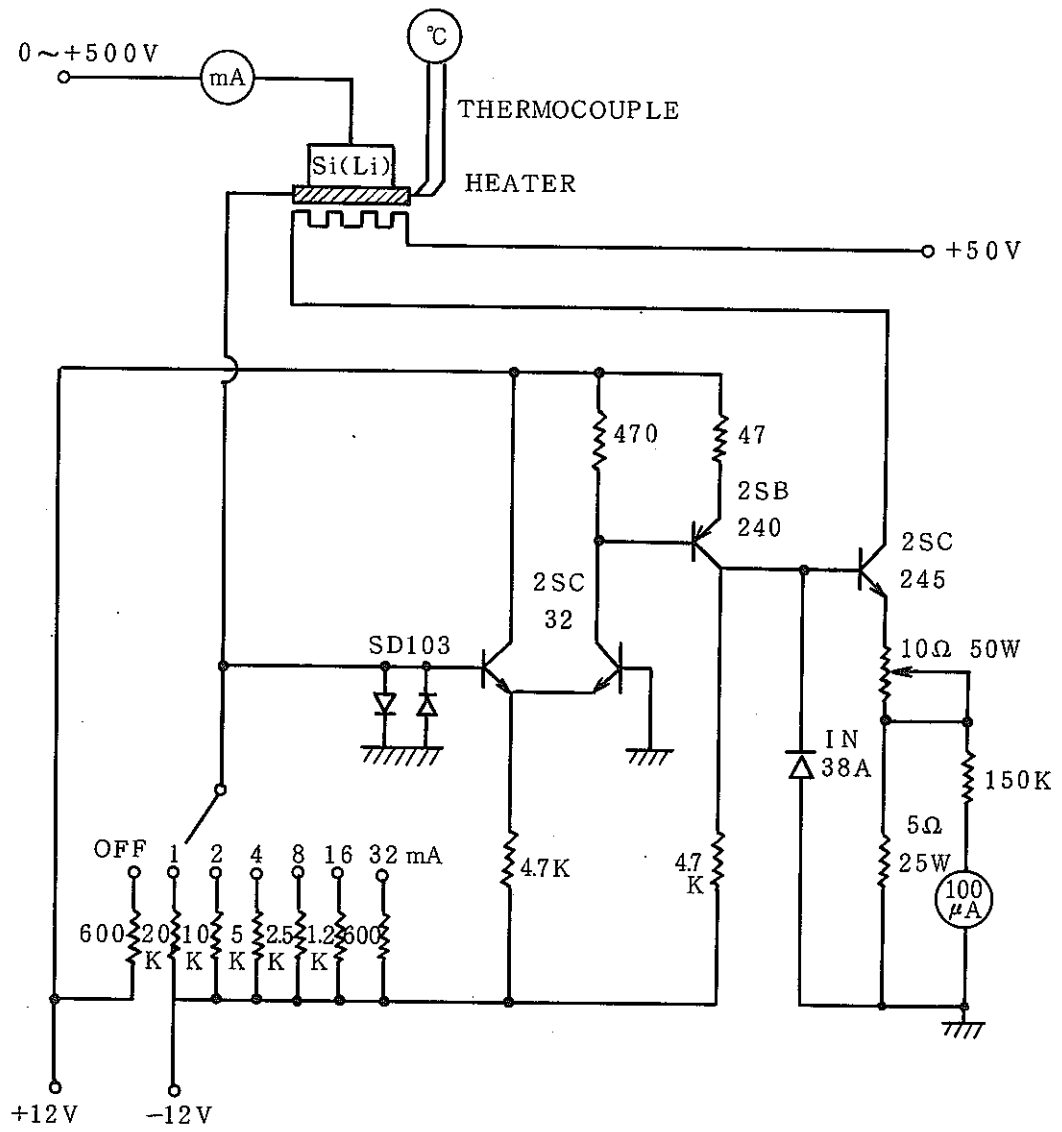


Fig. 3.4.4. シリコン・リシウムドリフト装置

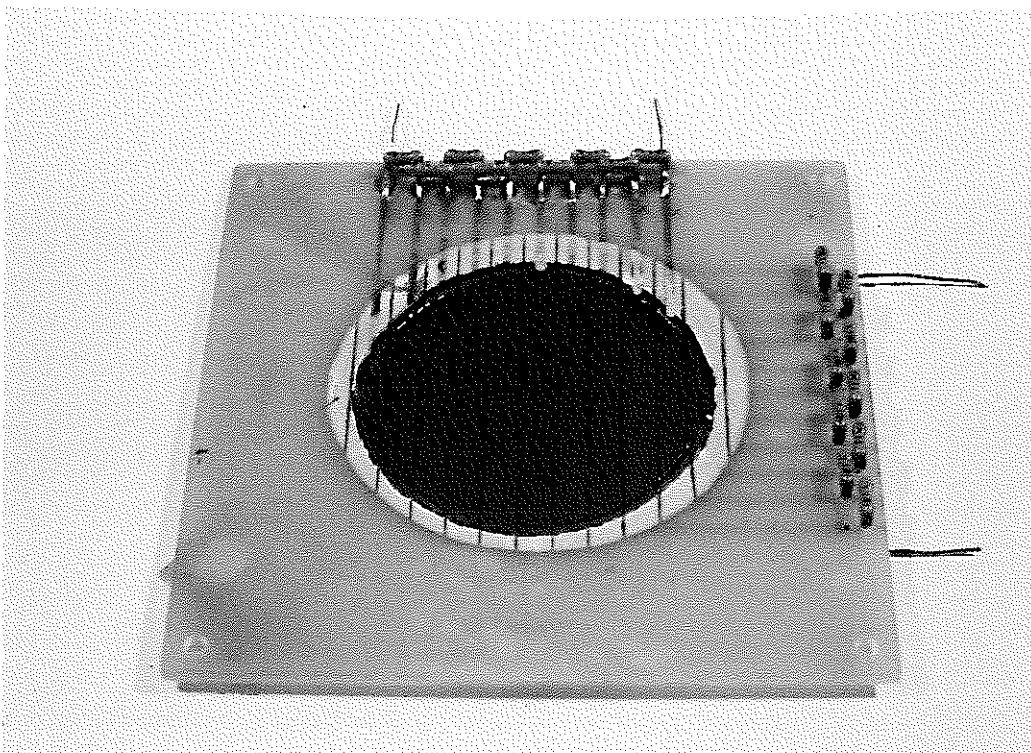
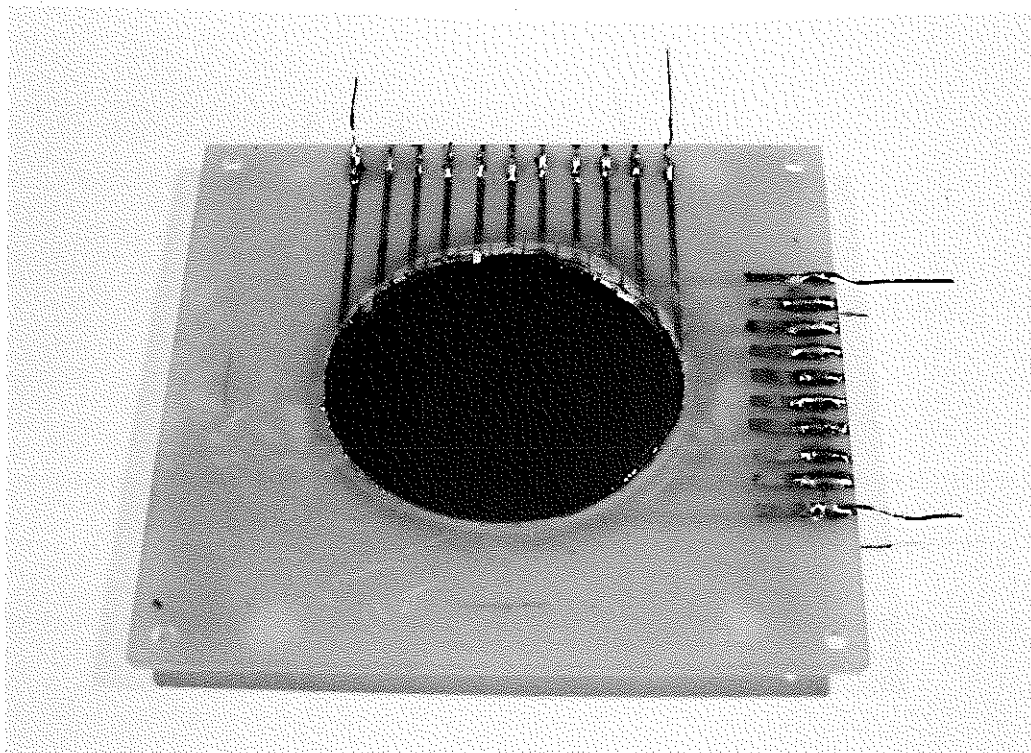


Fig. 3.6.1.A 50 mm ϕ 半導体チェッカーボード検出器

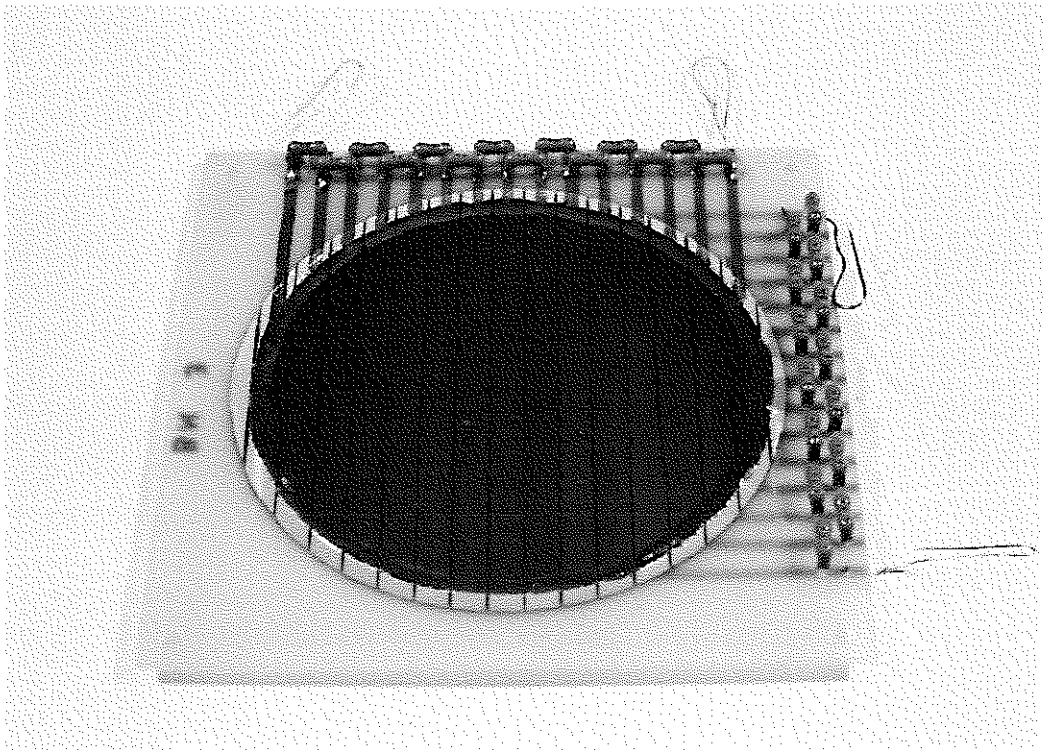
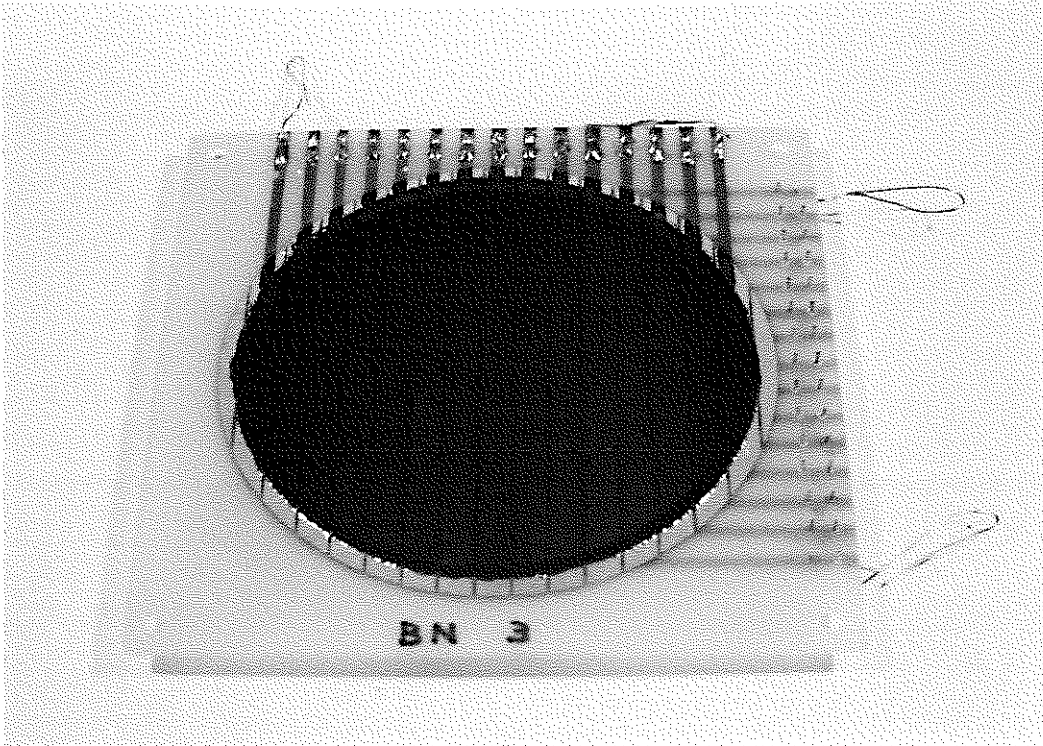


Fig. 3. 6. 1. B 76 mm ϕ 半導体チェッカーボード検出器

4. 情報処理回路

4.1 概要

放射線位置検出器の種類，チェッカーボード方式，電荷分割方式，遅延線方式の電気的意味及び，必要な回路系について述べる。第1の方式であるチェッカーボード方式は等価的に多数の検出器を2次元状に配置し，それぞれの検出器から個別に信号を取り出し位置を求めるものである。第2の方式，電荷分割方式は抵抗伝送線に連続（分布）又は個別の電極を1次元的に接続して伝送線両端に分割されて現われる電荷の比から位置を求めるものである。第3の方式，遅延線方式は，R-C又はL-C遅延線（伝送線）に連続（分布）又は個別の電極を1次元的に接続し遅延線（伝送線）の両端に現われる信号の時間差から位置を求めるものである。この場合遅延線の周波数特性（遅延時間の周波数特性）によっては立上り時間の差となる。たとえばR-C遅延線では立上り時間の差となって現われる。

マルチストリップ電極を持つ半導体検出器は外部回路によりこれら3つの方式で位置検出が可能である。しかし第1の方式は回路系が非常に大きくなるため陽電子消滅 γ 線角度相関測定のような特別な目的の場合に用いられている。第3の方式は各電極の静電容量を一様にするのが困難であるため位置分解能が悪化する。第2の方式は抵抗の一様性が位置の精度に影響するが抵抗を一様にするのは比較的容易である。分布的な抵抗性電極の場合も同様である。したがって半導体検出器の場合は電荷分割方式が最も適した方式であると考えられる。しかし抵抗伝送線には必ず浮遊静電容量があるので実際にはR-C遅延線としても働くのでFig. 4.1.1のように放射線入射位置によってパルス波高と共に立上り時間も変化する。したがって回路系はこのことを考慮して設計しなければならない。

本研究ではFig. 3.6.1のように外部に個別抵抗で接続したマルチストリップ型電極を両面に持つ位置検出型半導体検出器を用いて放射性粒子の粒径測定法の開発を行うものである。

Fig. 4.1.2は予備実験として位置検出型半導体検出器の性能試験を行った際の測定回路系のブロックダイアグラムである。前置増幅器は常温Si検出器用のFET入力電荷増幅器である。主増幅器はR-C微分積分型マルチモード増幅器である。リニアゲートは市販NIMモジュールのリニアゲートアンドストレッチャーである。演算部はリニアゲートからの3つの出力パルスを入力とする加算器及び割算器で出力は位置信号とエネルギー信号が得られるものである。この測定系は立上り時間及び遅延時間の変化（放射線の入射位置による変化）に対応することが出来ない（遅延時間等の調整をしなければならない）ため放射線の入射位置を制限して実験を行った。

今度開発を行っている放射性粒径測定装置は立上り時間が $4\mu\text{s}$ までの2次元位置検出を行えるものである。この装置は市販されている一般用NIMモジュールの組合せだけでは実現

が困難である。

4.2 機能

Fig. 4.2.1.のブロックダイヤグラムは電荷分割方式2次元位置測定回路の主要機能を示したものである。

以下に各部分について説明を行う。

4.2.1 前置増幅器

位置検出型半導体検出器はFig. 4.2.2.に示す等価回路とみなせる。つまりR-C伝送線に放射線入射位置に応じた位置にパルス電流源があると考える。電荷分割方式ではB点に発生した電荷（電流パルスを時間積分したもの）は R_A 、 R_C で分割されA点、C点に流入する。電荷はそれぞれ

$$Q_A = \frac{R_C}{R_A + R_C} \cdot Q$$

$$Q_C = \frac{R_A}{R_A + R_C} \cdot Q$$

$$\text{但し, } R_A + R_C = R$$

$$Q_A + Q_C = Q$$

となる。 R_A/R は入射位置を表らわすので $Q_A/Q = \frac{R_C}{R_A + R_C}$ を求めれば放射線の入射位置を知ることが出来る。検出器容量は面積が大きくなるため全容量で数100PFとなるため、A又はC点での信号パルスの立上り時間を考慮すれば抵抗Rは $\sim 10\text{ k}\Omega$ から数 $\text{ k}\Omega$ 程度となる。検出器の出力端子に現われた電荷は電荷有感前置増幅器で電圧に変換される。検出器の静電容量が大きいため前置増幅器の雑音-容量特性の傾斜は小さくする必要はある。また並列雑音抵抗が小さいため波形整形の時定数は大きくすることが出来ない。したがって初段素子は等価直列雑音抵抗が特に小さいものを選ばなければならない。

4.2.2 主増幅器

検出器からの信号は放射線の入射位置によりパルス波高及び立上り時間が変化する。立上り時間の変動はR-C伝送線の定数によって異なるが $2\sim 3\ \mu\text{s}$ 程度となる。このため通常用いられているRC微分、積分形の波形整形回路を用いるよりもディレイライン微分-R-C積分を用いた方が立上り時間の変動によるパルス波高の変動を少なくすることができる。並列雑音を小さくするためには時定数は小さくする必要はあるが $2\sim 3\ \mu\text{s}$ で変動する立上り時間の影響の方が大きくなるため微分時定数は $4\ \mu\text{s}$ とした。積分時定数は $1\ \mu\text{s}$ とした。

主増幅器の等価入力雑音電圧は前置増幅器の雑音及び必要とするエネルギー分解能に比べて無視出来る程度であればよい。たとえば 46 mV/MeV (Si) の感度を持つ前置増幅器を用いる場合にはエネルギー分解能を 10 KeV とするならば $100 \mu\text{V (rms)}$ 程度で十分である。増幅度は放射線のエネルギー範囲、前置増幅器の感度等から $10 \sim 300$ 倍程度でよい。また極性切換は独立に行なう必要がある。

4.2.3 演算部

演算部は検出器で分割された電荷からエネルギーを算出するための加算回路、位置検出のため Q_A/Q を計算する割算回路、これらの演算を正常に行なわせるために前処理を行う入力リニアゲート、ストレッチャー、出力リニアゲート及びシングルチャネル波高弁別器により構成される。

検出器からの信号は立上り時間及び遅延時間が放射線の入射位置によって異なるため、そのままアナログ演算を行うことは出来ない。入力リニアゲートは演算途中で次のパルスが入らないように演算終了まで入力を阻止するためのものである。ストレッチャーは演算に必要なパルスのピーク値を演算終了まで保持するためのものである。

加算回路はエネルギー信号を得るために検出器 Y 軸の両端からの信号 Q_y 、 Q_z を加算し $Q_E = Q_y + Q_z$ 得るためのものである。

割算器は X 軸用、Y 軸用の 2 系統からなり、X 軸用割算器は X 軸信号 Q_x を分子とし、エネルギー信号 Q_E を分母として演算を行う。Y 軸も同様に Q_y/Q_E の演算を行う。

割算の演算結果は放射線入射位置の X 軸位置、Y 軸位置を示している。

出力リニアゲートは演算器の演算結果が安定してから出力信号を送り出すためのもので、X 軸位置、Y 軸位置、エネルギーの 3 系統がある。これらの出力信号は多重波高分析器に適合するもので時間的には同時に出力される。

2 系統のデュアルシングルチャネル波高弁別器は X 軸、Y 軸の位置弁別及びエネルギー弁別を行うものである。位置弁別用のシングルチャネル波高弁別器は特定の位置（2 次元的な位置）を指定してそこに入射した放射線を選び出してエネルギー分析等を行うためのものである。エネルギー弁別用シングルチャネル波高弁別器は指定したエネルギー範囲の放射線の位置分布を求めるためのものである。位置弁別用シングルチャネル波高弁別器との同時計数を行うことにより特定の位置及びエネルギーの放射線を選び出し多重波高分析器を使用せずにスケラーで計数が行なえる。

4.2.4 タイミング制御部

タイミング制御部はリニアゲート、ストレッチャー、シングルチャネル波高弁別器等を動作させるためのタイミングパルスを発生するためのものである。

放射線の入射位置によって検出器からの信号は遅延時間及び立上り時間が異なっているため、放射線の入射時刻の基準点を正確に決めることが出来ない。そこで入射時刻を y 又は z 信号のうちどちらか早く到着した時刻と近似して入射時刻の基準点を決めても実用上問題はない。

タイミング制御部は入射時刻検出部と制御パルス発生部から成っている。演算部の制御信号は機能的には次の4種類である。

①入力リニアゲート制御 ②ストレッチャー制御 ③出力リニアゲート制御 ④シングルチャンネル波高弁別器制御

これらの制御信号の原理的な時間関係は Fig 4.2.3 のようになる。実際の時間幅等は検出器の立上り時間、遅延時間等から決めなければならない。また立上り時間が遅く $4 \mu\text{s}$ 以上ならば主増幅器の波形整形回路の時定数を変えなければならない。

4.2.5 高圧電源

半導体検出器に印加するバイアス電圧は検出器によって異なるが常温で用いるシリコン検出器では 500V 以下が多い、薄形サーフェスバリア型では $20\sim 30\text{V}$ のものもある。また検出器の電圧電流特性等を測定するためには $0\sim 500\text{V}$ まで連続的に変えられる方がよい。電圧変動に関してはリップル、スパイク状ノイズ等の周波数の高い変動成分は誤動作や分解能の悪化等を生じるので極力少なくしなければならない。しかし電圧のドリフト等の周波数の低い変動成分は半導体検出器の性質上ほとんど問題とならない。実際に使用する電圧は検出器によって異なり数 10V から数 100V である。したがって数 10V の低電圧領域でも安定に動作する必要がある。

4.2.6 NIM規格電源及びピン

主増幅器、演算部、制御部等はNIM規格モジュールであるので、これらのモジュールを収納し電源を供給する。

4.2.7 テストパルス発生器

2次元位置検出装置の較正、動作試験等を行うためのものである。このパルス発生器は電荷分割方式2次元位置検出器を模擬する信号発生器で、X軸位置、Y軸位置、エネルギーを独立に変えることが出来る。

Fig 4.2.4は原理を示したものである。可変抵抗 R の中点 からエネルギーの大きさに相当する定電流 I を流すと電流は抵抗 R_a 、 R_c で分割されて次式のように a 点、 C 点に I_a 、 I_c となって流れる。このとき a 点、 c 点は仮想接地点とみなす。

$$I = I_a + I_c \quad \text{—— (1)}$$

$$I_a R_a = I_c R_c \quad \text{—— (2)}$$

$$R = R_a + R_c \quad \text{—— (3)}$$

(1), (2), (3)から

$$I = I_a + I_a \frac{R_a}{R_c} = I_a \frac{R}{R_c}$$

$$I_a = \frac{R_c}{R} I$$

$$I_c = \frac{R_a}{R} I$$

したがって抵抗 R の両端 a, c に現われ 2 電流 I_a, I_c は 点の位置に比例したものとなる。これは電荷分割方式位置検出器の動作を直流電流で模擬したものである。 I_a, I_c を電圧に変換してリニアゲートにより電圧パルスに変換する。パルス発生器の出力は X 軸位置 X, X', Y 軸位置 y, z , 及びエネルギー E の 5 種類である。

4.3 回路

4.3.1 前置増幅器

前置増幅は検出器で発生した電荷パルスを電圧パルスに変換する。半導体検出器の静電容量は面積に比例し厚さに逆比例するので検出器の大きさにより数 PF から数 nF に達するものがある。本実験で使用する検出器は $\sim 200PF$ のものと $\sim 2nF$ のものがある。したがって前置増幅器に要求される基本的な特性は数 nF の検出器容量で正常に動作し、雑音-容量特性の傾斜が小さいことである。前置増幅器の雑音は検出器の静電容量及び電荷分割抵抗の値によって決まる。前置増幅器の等価雑音電荷 Q_N^2 は次のように表わされる。

$$Q_N^2 = \frac{1}{2} e^2 n n C_{in}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ [W'(t)]^2 + \frac{1}{\tau^2 i_n} [W(t)]^2 \right\} dt + \frac{1}{2} i_n^2 \int_{-\infty}^{\infty} [W(t)]^2 dt$$

波形整形を三角波としたとき近似的に Q_N^2 は

$$Q_N^2 = 4 k T R_s C_{in}^2 \cdot \frac{1}{t_m} + \frac{1}{3} \left(4 k T \frac{1}{R_p} + 2 q e I_0 \right) \cdot t_m$$

R_s : 初段能動素子 (FET) の直列等価雑音抵抗

R_p : 並列雑音電流

I_0 : 入力電流

t_m : 波形整形回路ピーキングタイム (時定数)

k : ボルツマン定数

T : 絶対温度

直列雑音の項は Q_N が $\sqrt{R_s C_{in}}$ に比例し，並列雑音の項は Q_N が $\sqrt{R_p}$ に逆比例する。 R_p はフィードバック抵抗，検出器負荷抵抗，電荷分割抵抗等が並列に接続されていると考えられるので抵抗の値から主に電荷分割抵抗で決まる。 C_{in} は検出器の大きさで決まるので R_p を大きくすると信号の遅延時間及び立上り時間が大きくなるため R_p をあまり大きくすることが出来ない。このため並列雑音の項は大きくなる。また波形整形回路の時定数もあまり大きくできない。つまり波形整形回路の時定数は雑音よりも立上り時間の変動の問題から決める必要がある。このため低雑音測定 of 最適条件は満されない。

4.3.2 主増幅器

位置検出型半導体検出器の出力信号は放射線の入射位置によって立上り時間，遅延時間が変化する。したがって通常のRC-RC微分積分タイプの波形整形回路では時定数を数 $10\mu s$ と非常に長くもなければ立上り時間の変動によってパルス波高が変化してしまう。このように時定数の長いパルス波形はピーク検出，パイルアップ，雑音等に問題がある。したがって雑音が多少増加するが波形整形回路にDL-RC微分積分回路を用いる。ディレイラインによる波形の歪みを少なくするために初段増幅部で $300ms$ 程度の積分を行い高周波成分を除去する。ディレイライン微分の時定数は信号の立上り時間を考慮して $4\mu s$ とする。積分時定数は $2\mu s$ とする。積分回路はパイルアップによる過負荷を防止するため微分回路の後に入れる。このほかタイミング調整を行うためディレイラインにより $2\mu s$ 遅延させる。これらの値は検出器の特性で変更する必要がある。

Fig. 4.3.1.は主増幅器のブロックダイヤグラムである。

4.3.3 演算部

演算部のブロックダイヤグラムをFig 4.3.2に示す。現在演算中の信号に雑音や次に入射した放射線の信号が混入すると演算結果に誤差を生じる。このため入力部にリニアゲートを設けて演算中は入力を阻止しなければならない。検出器からの信号は放射線の入射位置により立上り時間，遅延時間が異なるため x ， y ， z の3つの信号の波形及びピークの時間が異っている。演算器の入力信号は同一波形で同一時刻に入力されなければならない。パルスストレッチャーは入力信号のピーク値を検出しその値を演算終了まで保持するためのものである。ストレッチャーの出力は x ， y ， z の信号がすべてピークに達した後は同一波形となるので演算器の入力条件を満している。

加算器は y 及び z 信号を加算しエネルギー信号 E を得るためのものである。

割算器は x/E ， y/E の演算を行い放射線の入射位置を算出するものである。割算器はアナログ乗除算用集積回路を用いる。演算原理は入力信号をログ変換して加算又は減算した後逆ログ変換を行い乗除算を行うものである。

乗除算器の周波数応答は1MHz程度あるので入力信号が一定となった後1~2 μ s経過すれば正しい演算結果が出力される。

出力部リニアゲートは演算器出力信号から正しい演算結果部分を取り出すとともに出力波形を多重波高分析器の入力波形に適合させるためのものである。

シングルチャンネル波高弁別器は演算器の出力結果つまりX軸位置，Y軸位置，エネルギーがあらかじめ設定された範囲にあるか否かを判定するためのものである。X軸，Y軸の同時計数（コインシデンス）を行うと2次元の一定領域に入射する放射線のみを選び出してエネルギースペクトル分析を行える。またある設定されたエネルギーを選び出しX軸，Y軸信号を2次元多重波高分析器に入力すればそのエネルギーの放射線源の2次元分布が得られる。

入力部リニアゲート，ストレッチャー，出力部リニアゲート，シングルチャンネル波高弁別器はタイミング制御部からの制御信号によって動作する。

4.3.4 タイミング制御部

タイミング制御部は入力信号から放射線の入射時刻基準を検出して演算部への制御信号を発生するものである。制御開始の時刻基準は放射線の入射時刻であるが2次元位置検出器では直接その時刻を求めることはできない。そこでx，y，zの各信号は入射位置によって立上り時間，遅延時間が異なっているためy又はz信号のどちらか早く検出した時刻を近似的な入射時刻と考える。Fig 4.3.3は制御部のブロックダイアグラムである。加算増幅器はエネルギー信号を得るためのものではなく，入射時刻を得るためのものである。この加算器はy，zの波形や時間差を無視しているので出力波形はy，z信号の時間関係がそのまま反映している。この出力を速い微分積分回路で波形整形を行い，その信号の前縁を時刻基準とする。この時刻はy又z信号のうちどちらか早く検出器の出力端子に到着した時刻を表わしている。この時刻を基準としてFig 4.2.3のようなタイムチャートで制御信号を発生する。しかし実際の測定では検出器の特性に合わせてパルス幅などを決める必要がある。

4.3.5 テストパルス発生器

2次元位置検出装置の動作試験及び校正は検出器を模擬したパルスを前置増幅器のテスト端子に加えて行う。パルス発生器の各出力は検出器のx，y，z端子に発生する電荷パルスと同様な振幅の関係を保つものである。このほかエネルギーに相当するy+z及び位置信号E-Xの出力端子を有している。放射線の入射位置に対応した出力パルスの発原理は4-2で簡単に述べてある。この方式は電荷パルスを直流電流に置きかえているので立上り時間，遅延時間等については実際の波形と異なっている。つまり電荷量に相当

する電圧パルスの振幅の関係についてのみ検出器を模擬したものとなっている。

検出器のX軸，Y軸出力の極性は互いに逆になっている。つまりアノード側（金電極側）は正孔を集めるので正電荷パルスとなり，カソード側（アルミ電極側）は電子を集めるので負電荷パルスとなる。したがってパルス発生器のX軸，Y軸出力は独立に極性の変更が出来なければならない。Fig 4.3.4はテストパルス発生器のブロックダイアグラムである。電圧発生部は位置信号に対応した直流電圧を発生する。リニアゲートは直流電圧をパルス電圧に変換する。水銀リレーは5種類の出力を同時に発生するのが困難なため使用できない。リニアゲートの出力インピーダンスが高いためそのままでは出力ケーブルを駆動できないので出力増幅部では50Ωケーブルを駆動するためにインピーダンス変換を行う。

4.4 2次元位置検出装置の問題点

電荷分割方式による2次元位置検出器は放射線の入射位置によって出力端子に集められる電荷量が異なりその大きさは0から全電荷量まで分布している。つまり入射位置を検出出来る限界は出力端子に集められた電荷量と検出器及び前置増幅器による雑音との比によって決まる。中心部に入射した場合はほぼ1/2の電荷が集まるが周辺部では0又は1となる。測定すべき放射線のエネルギーの最低値でも周辺部において一定以上のS/Nを得るためにはFig 4.4.1のように擬似的な電極を設け仮想的に大面積検出器を考えその中心部のみを使用する必要がある。つまり周辺部での位置分解能を一定水準以上に保つためには位置検出のダイナミックレンジを犠牲にしなければならない。

立上り時間差方式（遅延時間差方式）では電荷はほぼ1/2に等分されるので位置によるS/Nの悪化は少くないが遅延線定数の均一性が問題となる。つまりR（又はL）及び電極容量Cの精度が位置の精度を決める。Rの精度は非常に良くすることが出来るが円形の半導体検出器では電極容量を一定にするのは困難なため立上り時間差方式は使用しにくい。

電荷分割方式を用いる場合，特に注意しなければならない事項は電荷分割回路が同時にR-C遅延回路となることである。このため放射線入射位置によって遅延時間及び立上り時間が異なる事である。つまり波形整形方式及びその時定数を選択する際に遅延時間及び立上り時間の差がパルス波高に影響しないようにする必要がある。またS/N及び最高計数率についても考慮する必要がある。

2次元位置検出装置はX軸位置，Y軸位置，エネルギーの3つのパラメーターについて測定を行うことが出来る。しかし一般的に使用されている1パラメーター多重波高分析器では他の2つのパラメーターを固定するか無視しなければならない。放射線の入射位置を2次元で表示するためには最低限2パラメーター多重波高分析器が必要である。エネルギー情報に関してはエネルギー分解能（放射線源の自吸収を含くめて）が悪いのでシングルチャネル波

高分析器により特定領域を選択する程度でもよい、もし1パラメータ多重波高分析器のみで2次元位置を高分解能で得ようとするならば数10回パラメータを変えて測定をくり返さなければならぬ。2次元位置検出器を有効に利用するためには2又は3パラメータ多重波高分析器と組合せてデータを取得することが必須条件と考えられる。また必要とする分解能が10%程度であるならば 8×8 又は 16×16 チャンネル程度の簡易形2パラメータ多重波高分析器を開発することも考えられる。また別な方式としてマイクロコンピュータ又はパーソナルコンピュータにADCを接続してオンラインマルチパラメータ多重波高分析器として利用することも考えられる。この場合はソフトウェアの開発が重要な問題となってくる。

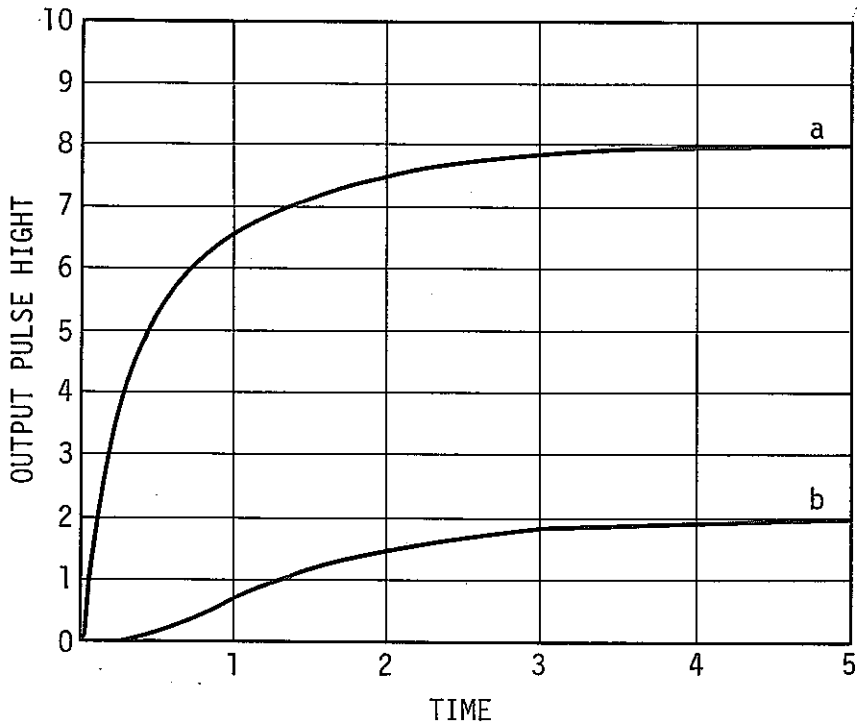
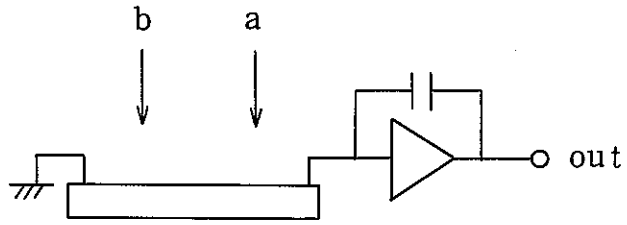
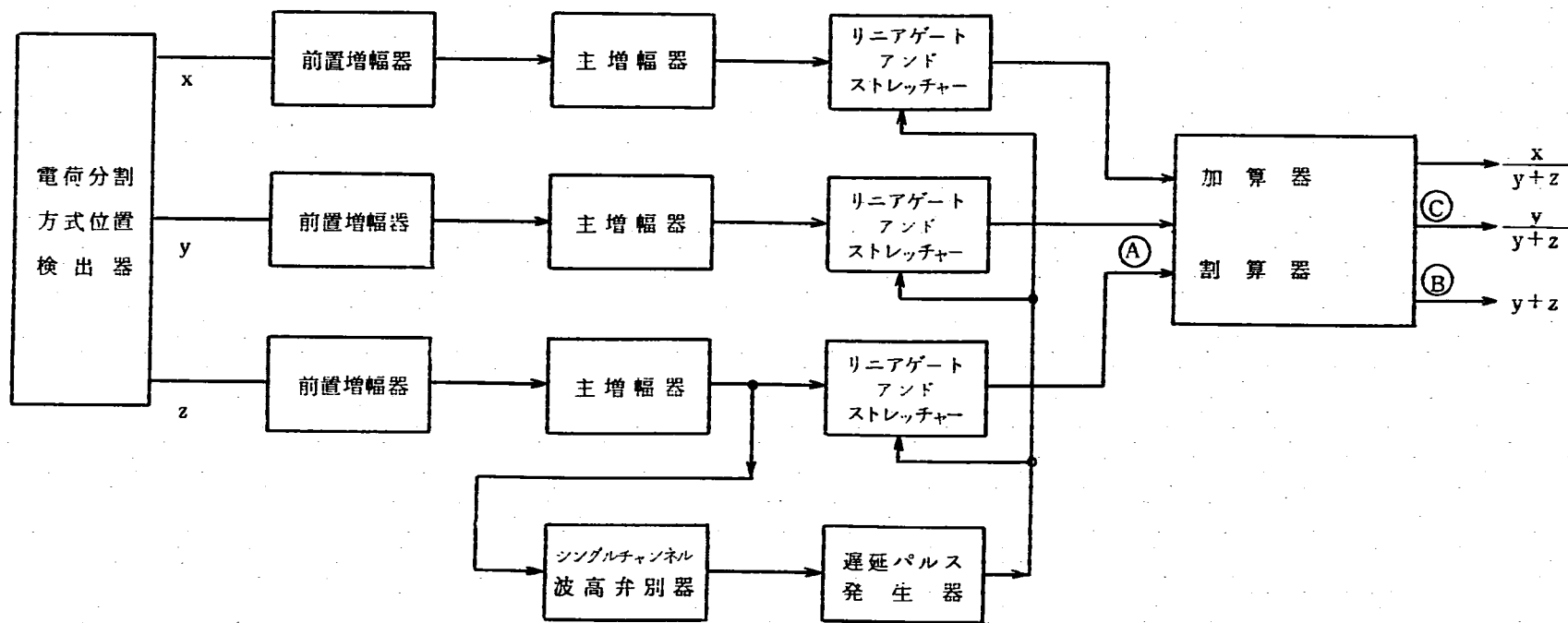


Fig. 4.1.1. 放射線入射位置によるパルス波形の変化



F 4.1.2. 予備実験に用いた位置検出回路の
ブロックダイアグラム

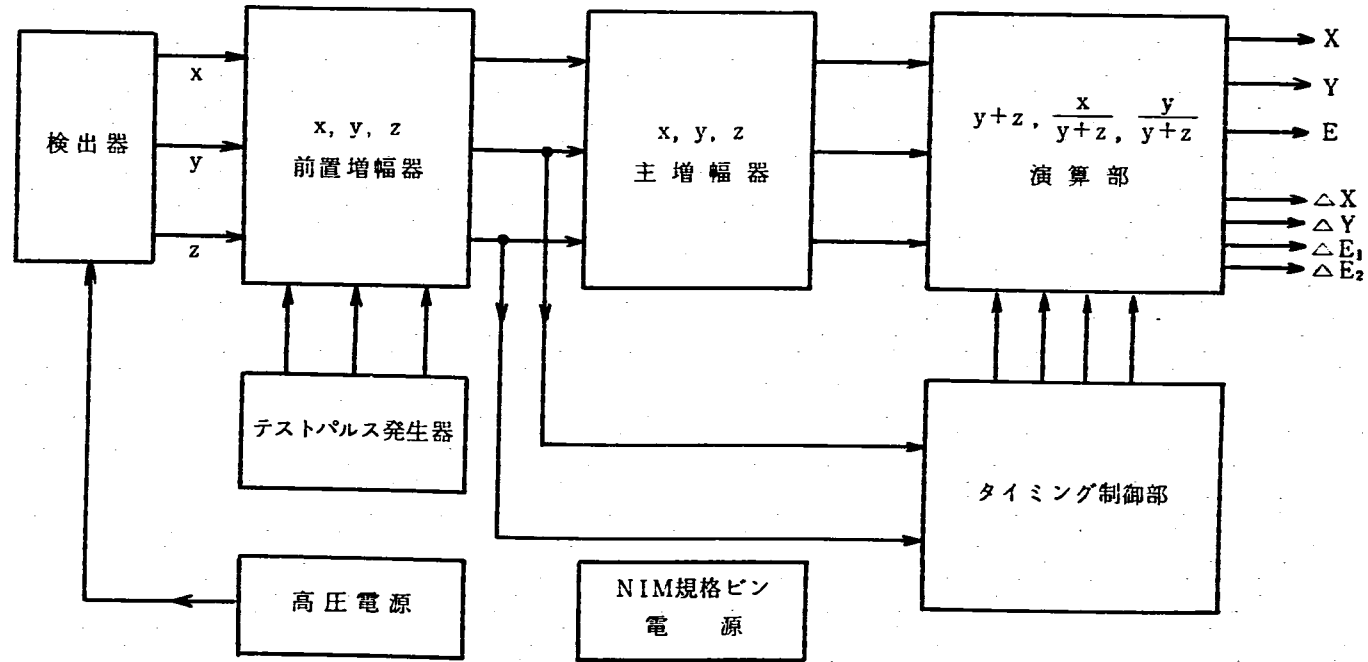


Fig 4 2.1. 電荷分割方式2次元位置検出器主要機能
ブロックダイアグラム

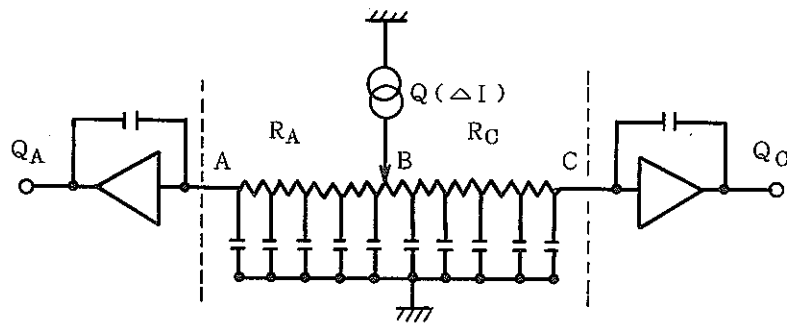


Fig. 4.2.2. 位置検出型半導体検出器の等価回路

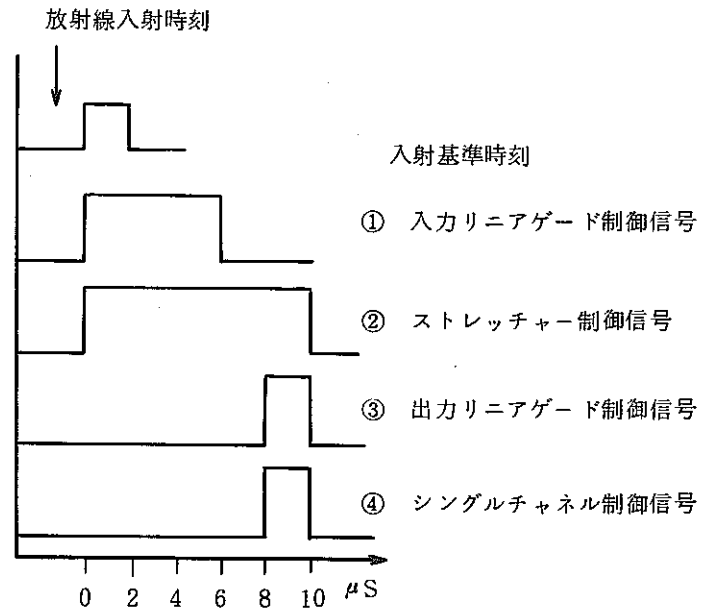


Fig. 4.2.3. タイミング制御部制御信号

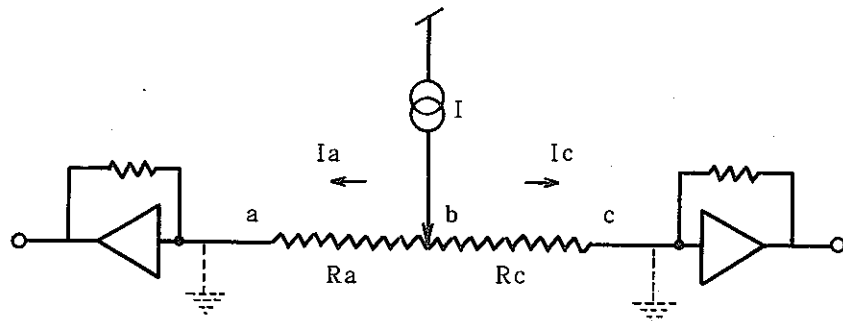


Fig. 4.2.4. テストパルス発生器の位置信号発生 の原理図

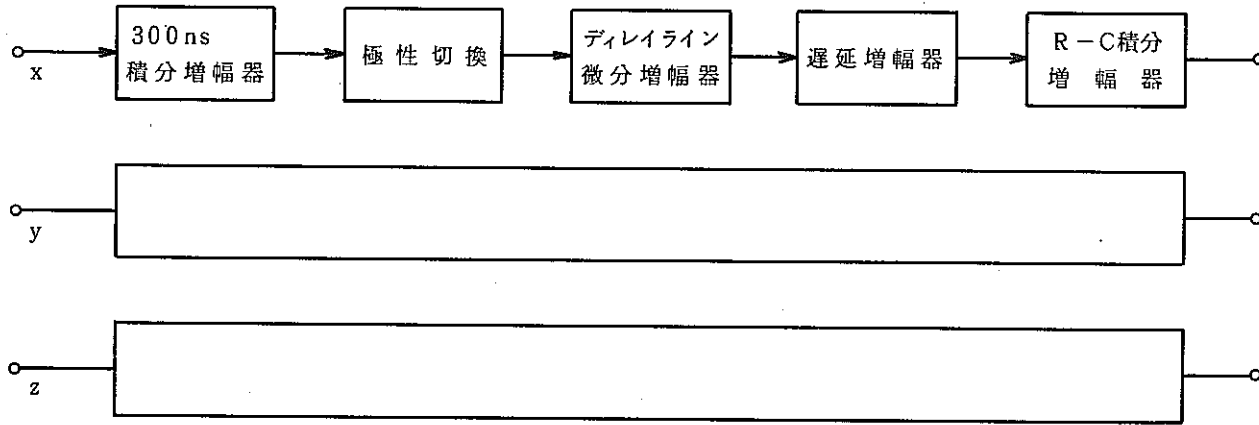


Fig. 4.3.1. 主増幅器ブロックダイヤグラム

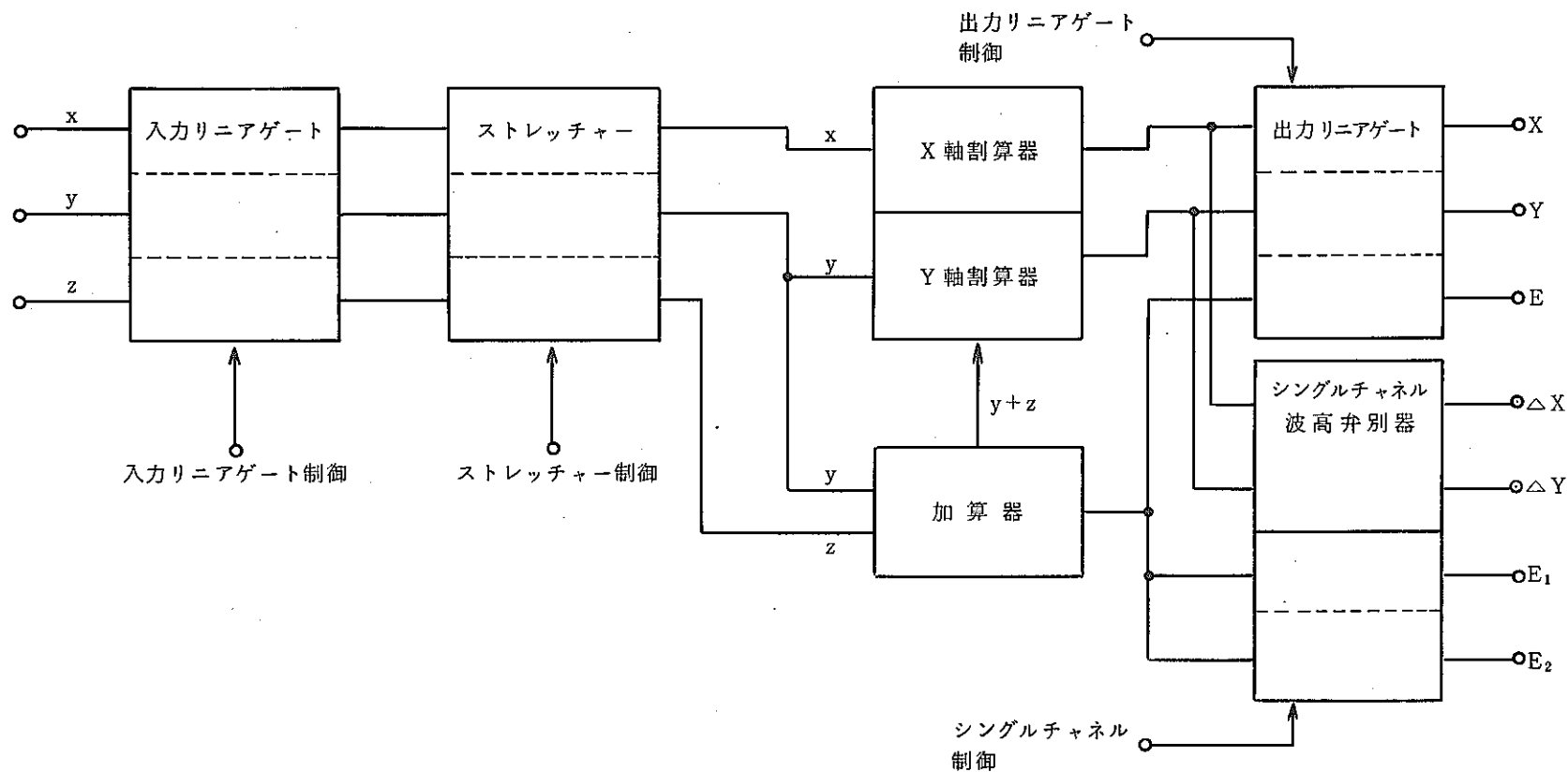


Fig. 4.3.2. 演算部ブロックダイヤグラム

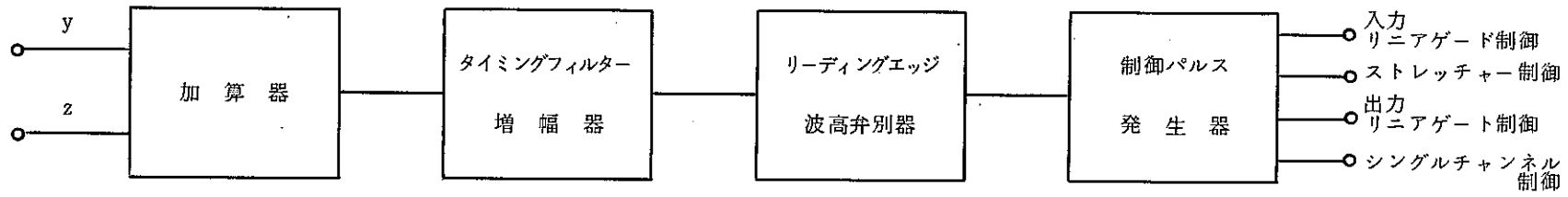


Fig. 4.3.3. タイミング制御部ブロックダイアグラム

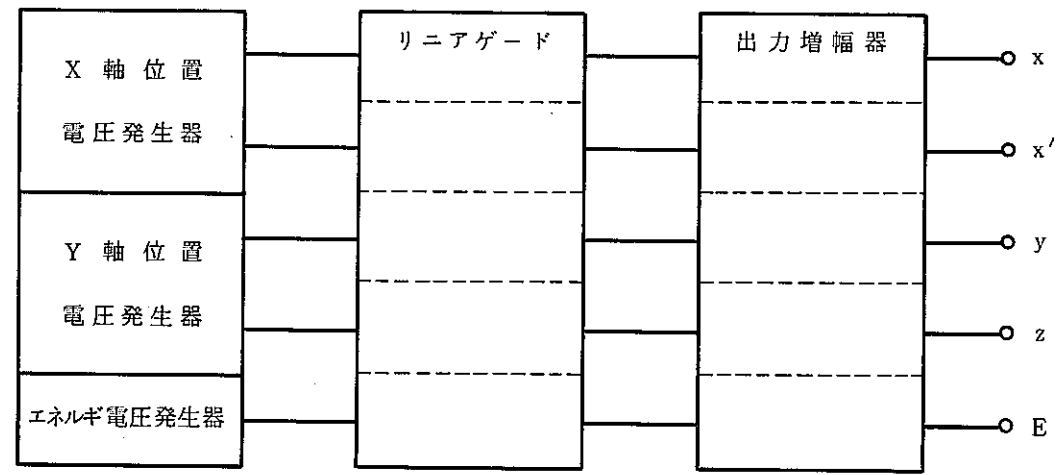


Fig. 4.3.4. テストパルス発生器ブロックダイアグラム

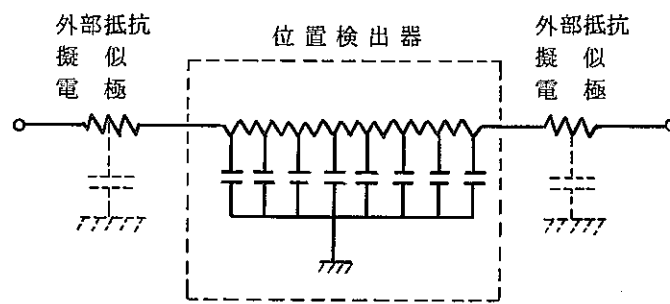


Fig. 4.4.1. 位置分解能を一定水準に保つために外部抵抗を附加して仮想的に面積を拡大した時の等価回路

5. 試作検出器の試験

5.1 概要

放射性粒子の粒径測定器として半導体放射線位置検出器を使用する場合に問題となってくる特性としては、通常の半導体検出器の特性として要求される項目である

1. 検出器素材に関するもの
 - 1-1 印加電圧-検出器容量特性
 - 1-2 印加電圧-漏電流特性
2. エネルギー特性
 - 2-1 エネルギー直線性
 - 2-2 エネルギー分解能

の他に位置検出器としての特性が必要である。位置検出器としては

1. 位置信号直線性
2. 位置分解能
3. 位置決定安定度
4. 位置信号相互混入度

があるが、それぞれの項目について決定する必要がある。また、その他にも実際の使用条件に適合させるために、薄膜を検出器、試料間に挿入した場合における位置分解能、エネルギー分解能の劣化の問題について試験する必要がある。業務における使用等を考慮した場合、あるいは、そうでなくとも実際に使用している場合に試料が検出器に、直接あるいは間接に触れるために起こる接触劣化の問題を、定性的（できれば定量的）に把握する必要がある。

試験方法としては、第1に単体の通常の半導体検出器を試作し、エネルギー分解能等の試験を行ない、素材がどの程度のものか把握する。第2に同一ロットからの素材を用いて、位置検出器を試作し、位置検出器としての試験を行なう。位置検出器としての試験としては

- I 標準のアルファ線源（電着線源）を用いて、コリメータでコリメートし、検出器と接触させず位置区画の1個ずつを試験する。
- II Iと同じく非接触で長い線源を使用し、同時に多区画に放射線を入射させて試験を行なう。
- III 標準のアルファ線源をコリメートし、薄膜を挿入し、検出器に密着させて試験を行なう。
- IV 実際のプルトニウム粒子がロ紙上に固着したサンプルを用い、ロ紙と検出器間に薄膜を挿入し密着して測定を行なう。

V LED 光パルスにより，半導体素材及び，回路系の位置特性試験を行なう。

試験を行ない位置検出器が必要特性を満足するかについて調査した。（LED 光パルス試験は，3 inch N型素材についてのみ実施し結果は付録で述べる。）

5.2 基礎試験

5.2.1 半導体素材に関する試験

半導体素材としては1.50mmφ及び2.76mmφの2種類を準備し，各々に5mm間隔の格子状（チェッカーボード方式）電極蒸着を，上面に金，裏面にアルミニウムを用いて行ない検出器を製作した。なお1の素材についてI～IVの試験を実施し，2の素材についてはVの試験のみ実施した。

その他に，半導体素材の基本特性を調べるために，同一のロットからの素材を用いて，一般の半導体検出器を製作し，特性を測定した。その結果普通の半導体検出器については，エネルギー分解能が ^{241}Am のアルファ線に対して84 KeV，リーク電流18μA，容量195 PF（バイアス電圧300V，波形整形時定数2μs）となった。

それに対して，位置検出器として作成したものは，エネルギー分解能が135 KeV～160 KeVとなった。リーク電流は，300Vのバイアス電圧に対して20μA程度となった。エネルギー分解能的に見れば試料からのアルファ粒子のエネルギー情報が劣化していることを考えれば十分な値と考えられる。

5.2.2 パルス波形

回路については§4 情報処理回路で説明した。回路の中で特定の点におけるパルス波形を次に示す。

Fig. 5.2.4は，上のパルスが，非接触コリメート試験(2)において観測される位置情報パルスである。このパルスはX方向一定でY方向変化特性をとるために，Y軸に棒状アメリカウム線源を置いて測定したパルスで，加算回路のすぐ前の点（Fig. 4.1.2. (A)）で採取されたものである。位置によるパルス波高の差異を見ることができる。下のパルスは，加算回路のすぐ後の点（Fig. 4.1.2. (B)）でのパルスである。これはエネルギー情報を示すパルスである。

Fig. 5.2.5は，最終的に加算され，トータルエネルギー情報で割られた後の位置情報パルスであり，このパルスが実際にパルスハイトアナライザによって分析され位置情報である。（Fig.4.1.2. (C)）

5.3 非接触コリメート標準線源試験 (1)

この試験では、真空チェンバー中に半導体位置検出器を設置して行なう。線源はアルファ線用電着標準線源である。線源をアクリルの1.5mm厚のコリメータでコリメートしている。コリメータの穴の直径は、1mmで1つだけあいている。線源試験用検出器配置は、Fig 5.3.1に示すとおりになっている。試験に際しての諸パラメータはTable.5.3.1にまとめてある。

Fig. 5.3.1のとおり、標準線源から放出されたアルファ線は、1区画のみに入射するが、回路の説明のところからもあきらかなようにパルスの（立ち上がり時間等）波形が粒子の入射位置によって異なる。そこで、タイミングを調整し、Fig. 5.3.2に示すスペクトルA, B, Cどれもが測定可能なように調整する。その結果得られたスペクトルがFig. 5.3.2である。これにより次に、直線性の試験等を§ 5.4で行なう。

5.4 非接触コリメート標準線源試験 (2)

この試験では、真空チェンバーの中に半導体検出器を設置して行なう。線源はアルファ線用の ^{241}Am 線源である。線源は従長に製作してあり、同時に多点の位置について試験を行なうことができる。線源をアクリルの0.4mm厚コリメータでコリメートしている。コリメータには直線上に5mm間隔で、0.8mmφの穴があけてある。試験に際しての諸パラメータはTable.5.4.1にまとめる。

試験は真空チェンバーの中で、真空ポンプのみの荒引き状態で実施した。線源のコリメートはFig. 5.4.1のように行っているが、図からもわかるとおり、 ^{241}Am から放出されるアルファ線は、1つの穴から1区画のみに入射するように設計されている。その結果得られた位置情報のスペクトルをFig. 5.4.2, Fig 5.4.3にあげる。それぞれy方向x方向のスペクトルで1区画に1本識別できる。

次にx方向、y方向の位置情報の直線性をプロットした図を示す。放射性粒子の粒径を測定するという目的にとっては位置情報の直線性という因子は重要なものではないが、誤差1%以内で十分に5%の抵抗誤差以内におさまっている。

また、Fig. 5.4.4からFig 5.4.9までにy方向の+4レベルから、y=0のレベルまでy方向の線源位置を変化させた場合のx方向直線性試験結果及び、x=0レベルでy方向直線性を試験した結果をあげるが、それぞれ十分な直線性が得られており、半導体素材の均質性の確認にもなっている。さらに、半導体素材の均質性の確認にもなっている。さらに、半導体素材厚み2.0mmで、空乏層厚約1.1mmであるので、抵抗性素材層の影響が出るかと思われたが確認されていない。

5.5 接触コリメート標準線源試験

この試験では真空中及び空気中に、半導体検出器を設置して試験を行なう。線源は²³⁹Pu標準線源で、液滴乾燥型の線源である。線源を0.4mm厚アクリル板でコリメートしている。コリメータの穴の直径は、0.8mmφである。試験に際しての諸パラメータは、Table 5.5.1に示す。

試験を行なう場合の雰囲気は、真空中及び空気中である。線源をFig 5.5.1のようにコリメートしているため、線源からのアルファ線はすべて1区画の位置に入射しなければならない筈であるが、結果的にFig 5.5.2及びFig 5.5.3に示すように1区画のみに粒子が入射している状態が識別されている。

また、真空中及び空気中での位置スペクトル、エネルギースペクトルを比較した場合にも、両者の間に有意な差は見られなかった。

また、ポリカーボネートフィルムを挿入したことによる悪影響も特に見られない。これによって次に行なうべき、²³⁹Puサンプル試験を実施するにあたり、ポリカーボネートフィルムを使用することが十分に有効と判断された。

5.6 ²³⁹Pu サンプル試験

この試験では、真空中及び空気中に半導体検出器を設置して試験を行なう。線源としては、実際にプルトニウム施設で採取された²³⁹Puポイントソースを用いる。この線源は同時に現在実際に使用されている粒径測定法であるZnS(Ag)増感オートラジオグラフ法により測定しその結果を相互に比較する。検出器及び測定試料の相互の位置関係はFig 5.6.1に示す。また、試験時の測定条件は、Table 5.6.1に示す。

接触コリメート標準線源試験及び今回の試験の結果から、ポリカーボネートフィルムを用いて密着測定する場合には、真空中か空気中かという雰囲気の違いは無視し得るということがわかったので、今後の試験装置を設計する場合及び試験実施に際しては特に別の角度から真空等の雰囲気が要求されない限り空気中で試験することにする。

²³⁹Puポイントソースについて、Fig 5.6.2に従来用いられている粒径測定方法であるZnS(Ag)増感オートラジオグラフ法による測定写真を紹介する。この方法による粒径測定値は、 $\approx 5\mu\text{m}$ である。それに対してFig 5.6.3, Fig 5.6.4からもわかるように、²³⁹Puから放出されたアルファ線は1区画の位置にのみ入射しており、その結果から以下の式

$$d_A = \left(\frac{M \times 10^{11}}{\lambda \cdot \pi \cdot A \cdot \rho \cdot f} \right) \times x^{\frac{1}{3}}$$

$$\doteq (1.39 \times x)^{\frac{1}{3}}$$

λ : 壊変定数

M : 放射性粒子の質量数

- A : アボガドロ数
 ρ : 放射性粒子の密度
 f : 粒子中の放射性粒子の割合
 x : 粒子の放射能 (dpm)
 d_A : 粒子直径 (μm)

を用いて算出した ^{239}Pu 粒子の直径は $5.1\ \mu\text{m}$ である。従来の方法と半導体放射線位置検出器による粒径測定結果はかなり良く一致している。

またこの測定結果は、Fig 5.6.4 からわかるとおり、エネルギースペクトルが、口紙中でのアルファ線の吸収、及びポリカーボネートフィルムによる吸収を反映して、 $1\sim 2\text{MeV}$ のチャンネルまで広がっているが、割算回路が十分に機能しているために位置が完全に特定できている。

5.7 応用試験

5.7.1 接触劣化試験

この試験の目的とするところは、半導体位置検出器を実際の測定に応用することになった場合に、半導体検出器そのものに、試料を接触させる等の半導体検出器表面を劣化させる試験が多いことを考え、劣化の程度を把握し、具体的な対策を考えることにある。

試験は、通常のサーフェスバリアー型半導体検出器を用いて行なう。検出器は表面に金、裏面にアルミニウムを蒸着してあるが、アルミ面が比較的機械的強度がすぐれているのに比し、金蒸着面は、綿が接触した程度でも傷がつき性能が劣化することが知られている。検出器面の強度を考慮するとアルミ面を粒子入射面として使用することが有効な方法であるが、空乏層がアルミ面まで達するように設計しなければならない。ところが空乏層が素材全体に広がっているものは特性的に安定しないという面を持っており、できれば金側入射の状態で検出器を使用することが上策である。

そこで金側蒸着面について、2種類の接触劣化試験を行なった。

- 1) 金蒸着面に金属試料を直接置き劣化度を ^{241}Am 線源のエネルギー分解能の劣化によって調べる。
- 2) 金蒸着面に、 $2\ \mu\text{m}$ ポリカーボネートフィルムを1枚密着させ、その上から金属試料を置き劣化度をアルファ線源のエネルギー分解能の劣化によって調べる。

接触劣化度の評価指標としては、実用上の観点から言って、エネルギー分解能を選択した。

Table 5.7.1 中で、直接接触法が上述1)の方法を示し、間接接触法が2)の方法を示す。表からわかるとおり、この範囲内(1回測定あたり、2回試料移動)では特に両者の試

験方法による差異はでていない。

これからの試験では、検出器自身が放射性物質で汚染されるのを防止するために、ポリカーボネートフィルムで検出器を保護して測定を行なう。

5.7.2 ポリカーボネートフィルム層による変化

この試験の目的は、半導体位置検出器の特性劣化及び検出器の汚染を防ぐためにポリカーボネートフィルムを検出器と試料の間に挿入することが必要となってくるが、このとき、エネルギー分解能の劣化、位置分解能の劣化という2点で測定上の悪影響を及ぼすという点について、その影響度を評価することにある。

試験は、今回製作した半導体位置検出器を用いて行なう。ポリカーボネートフィルムは、金側に密着させ、1～4枚と枚数を変化させた場合の特性変化を測定している。雰囲気は真空としてポリカーボネートフィルム層の影響のみが表われるようにしている。測定項目としては、

- 1) 線源ピークチャンネルのシフト
 - 2) エネルギー分解能、半値巾の増加
- の2点である。

Fig 5.7.3 及び Fig 5.7.4を参照することにより、ピークチャンネルシフトは $8 \mu\text{m}$ ($9.6 \times 10^{-3} \text{mg}/\text{cm}^2$)のポリカーボネートフィルムまで直線上にのり、半値巾の増加分についても実験的にはほぼ直線に乗っていると評価できることがわかる。

5.8 結論

今回の試験は全体として、半導体位置検出器が放射性粒子の粒径を測定する方法として利用できる可能性があるかどうかについて、5mm幅の位置検出器を用いて検討するということがであった。その意味で得られた結論についてまとめる。

- 1) 半導体素材については、均質性、面積、比抵抗、等の基礎的な性質について十分なものが得られることがわかった。
- 2) 半導体素材から位置検出器を製作する技術についてもチェッカーボード型についてはさらに分解能を向上させることができる。
- 3) 位置検出器の各位置区画に入射したアルファ線は、それぞれ独立に識別され計数される性能が、①コリメートされ2mm程度離れた位置から入射したアルファ線及び②薄膜をはさんで入射したアルファ線、の2つについて確認された。
- 4) 実用にする場合に必要となる性能で、接触劣化の問題について、当面の試験の範囲内ではポリカーボネートフィルムを挿入することにより問題ないことがわかった。
- 5) ポリカーボネートフィルムを挿入してアルファ線を測定した場合のエネルギーピークの

シフト特性，半値巾の劣化の特性について実用上必要な範囲内で定量的に決定できることがわかった。

- 6) ポリカーボネートフィルムを挿入して，アルファ線標準線源で密着コリメートしての測定は結果が良好であった。
- 7) ^{239}Pu ポイントソースのサンプル（実際にプル燃で採取されたサンプル）について粒径測定試験を行ったところ，従来用いられている $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 増感オートラジオグラフ法での測定結果と良く一致している。
- 8) 位置決定安定度，位置信号相互混入度は十分に満足できる値であった。

以上の結果から，さらに位置分解能のすぐれた半導体位置検出器を試作し，1 mm 程度の間隔にある放射性粒子に対しての有効性を調査することとした。

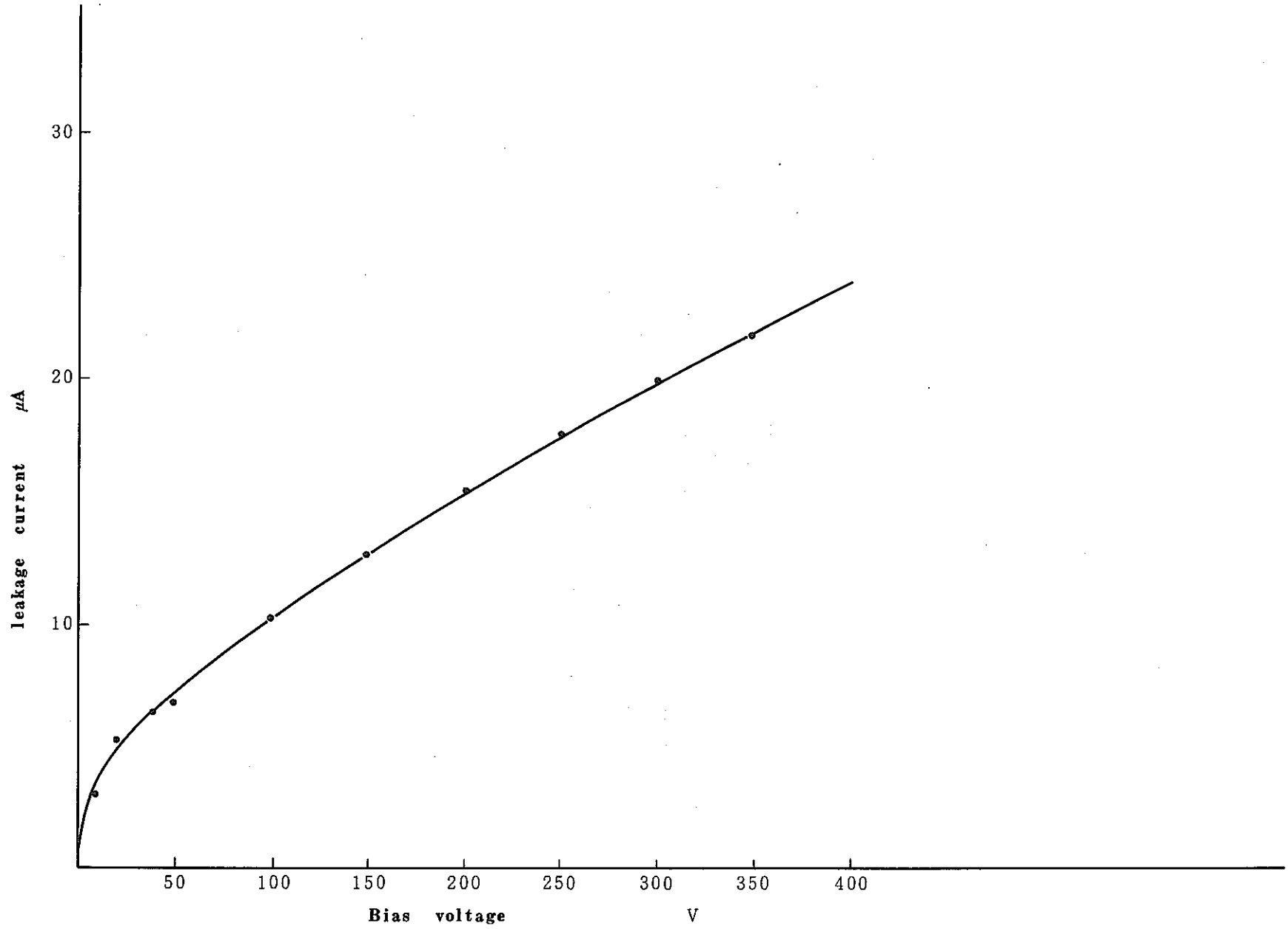


Fig. 5. 2. 1. 位置検出器のバイアス電圧ーリーク電流特性

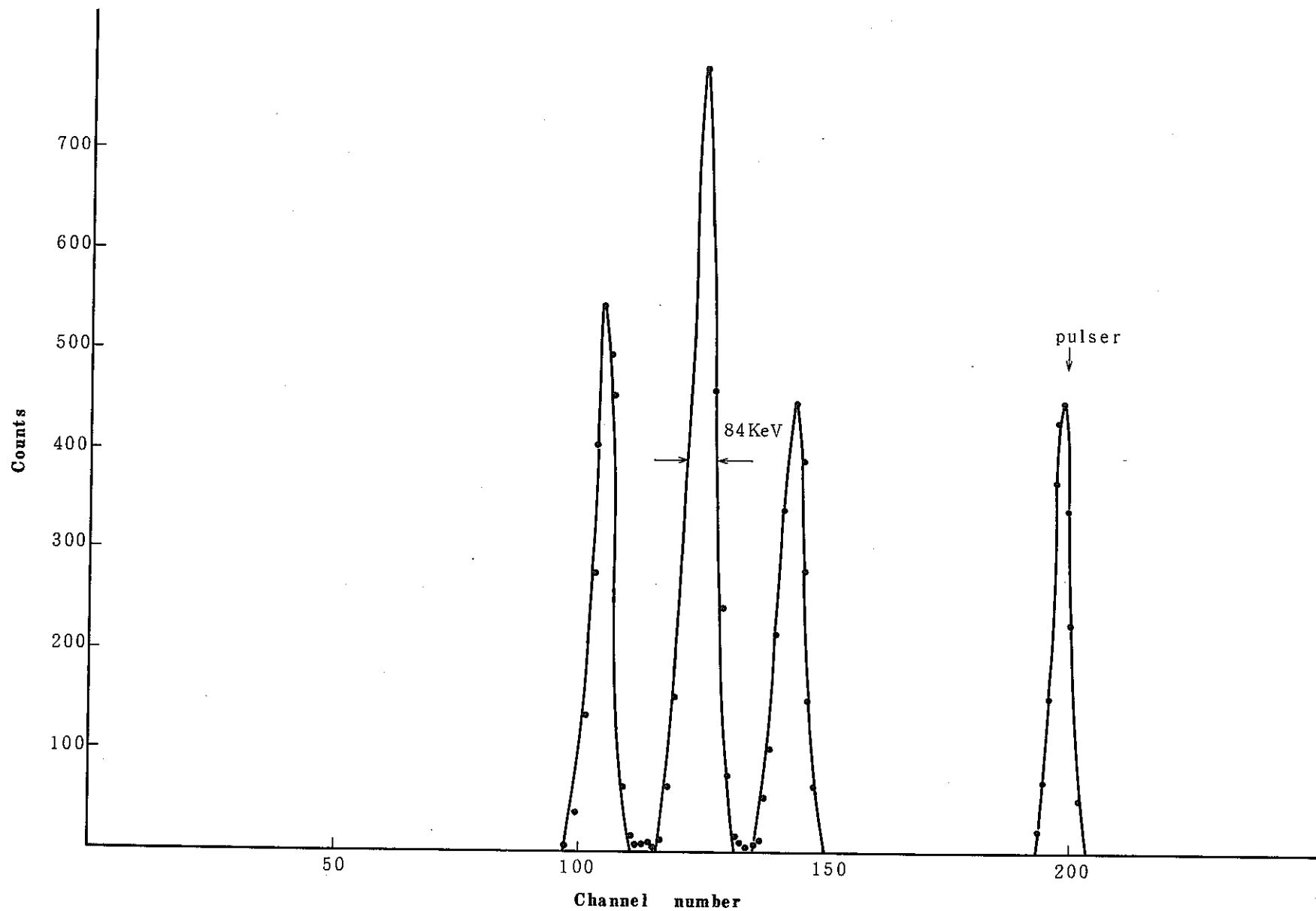


Fig. 5. 2. 2. 52mm ϕ 普通SSDエネルギースペクトル

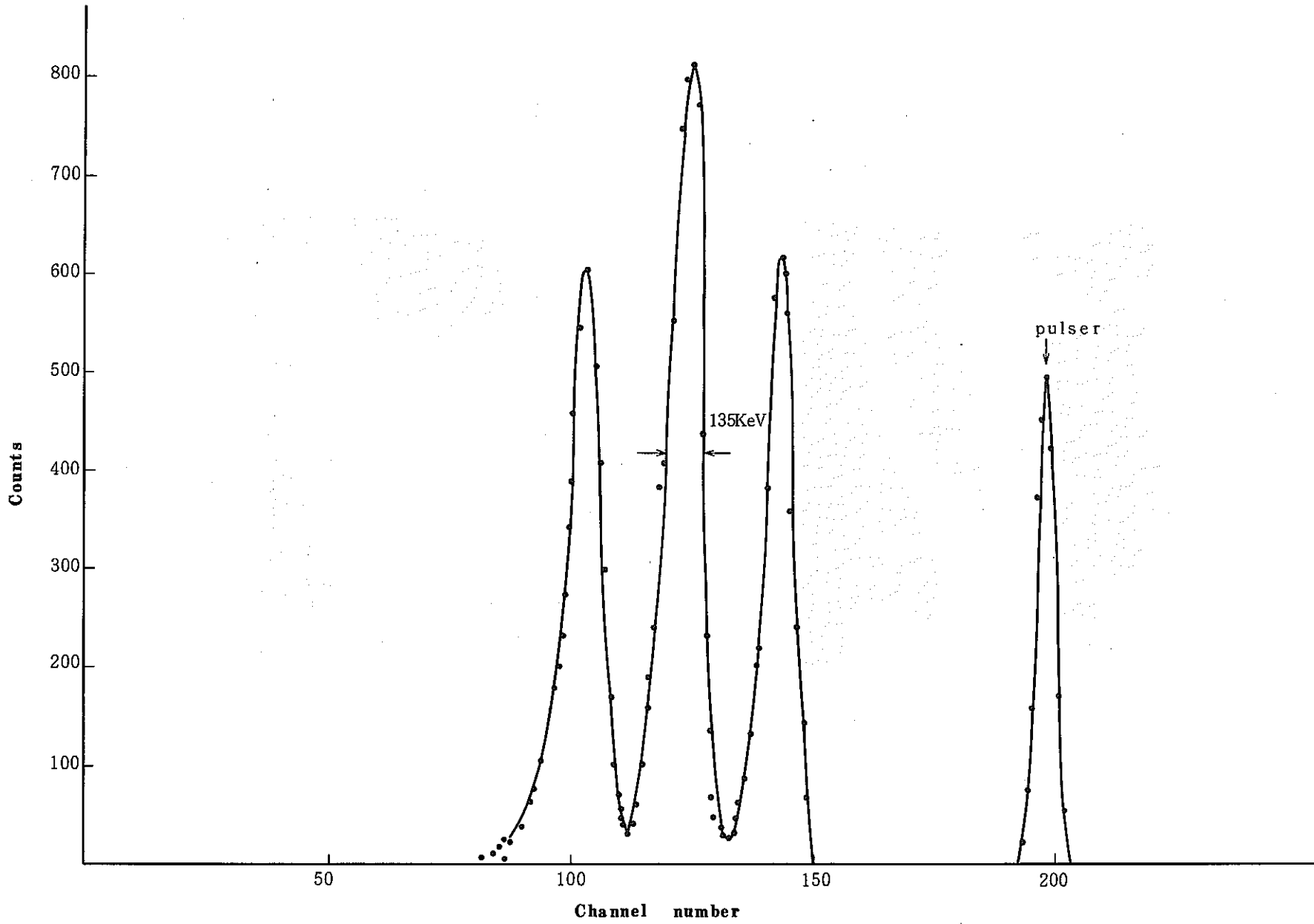


Fig. 5. 2. 3. 52 mm ϕ PSD検出器エネルギースペクトル

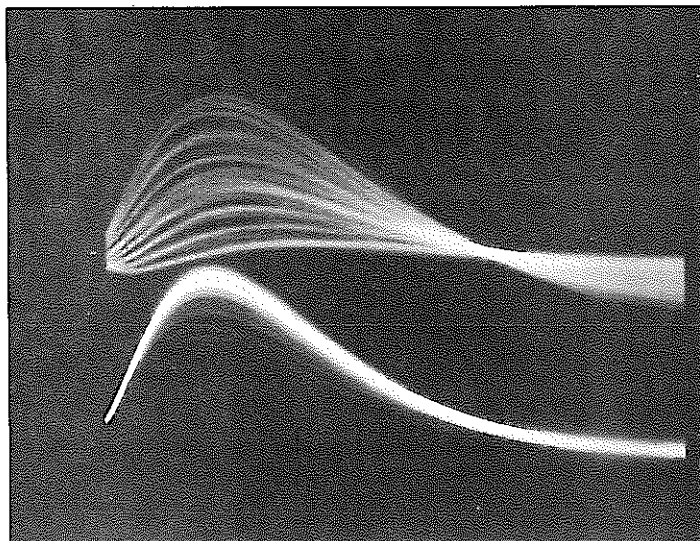


Fig. 5.2.4 (上) 割算前の位置信号パルス
(下) エネルギーパルス

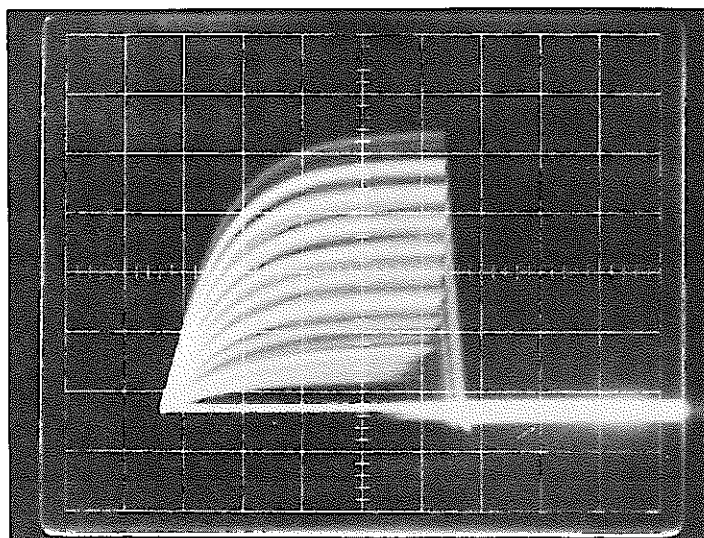


Fig. 5.2.5 エネルギーパルスで割算後の位置信号パルス
(このパルスを波高分析する)

Table.5.3.1. 非接触コリメータ標準線源試験(1)の測定条件

項 目	内 容
検出器素材・製法	N型素材(サーフェスバリアー型)
直 径	51.6 mm ϕ
厚 さ	2.0 mm
比 抵 抗	1.7×10^4 ohm-cm
バイアス電圧	300 V
検出器(R・C)	1.9×10^{-6} (10 k Ω × 190 pF)
波形整形時定数	2 μ S
空乏層厚さ(計算)	1129 μ m
線 源	mixed alpha 線源
コリメータ	アクリル, 1.5 mm厚, 1 mm ϕ
線源検出器距離	非接触でコリメータ上に線源を設置 距離 2 mm
粒子入射方向	金側入射

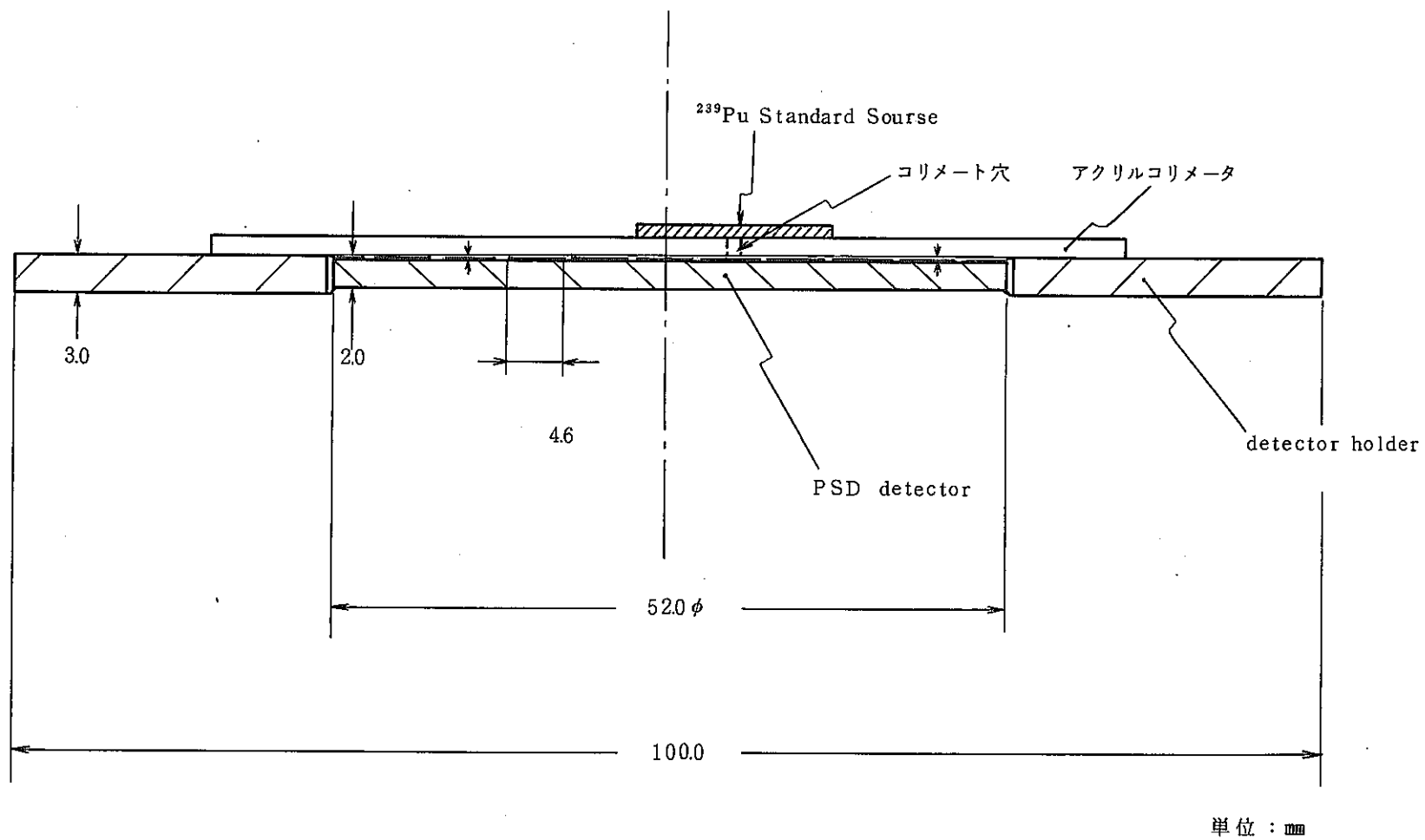


Fig. 5.3.1 非接触コリメート標準線源試験1

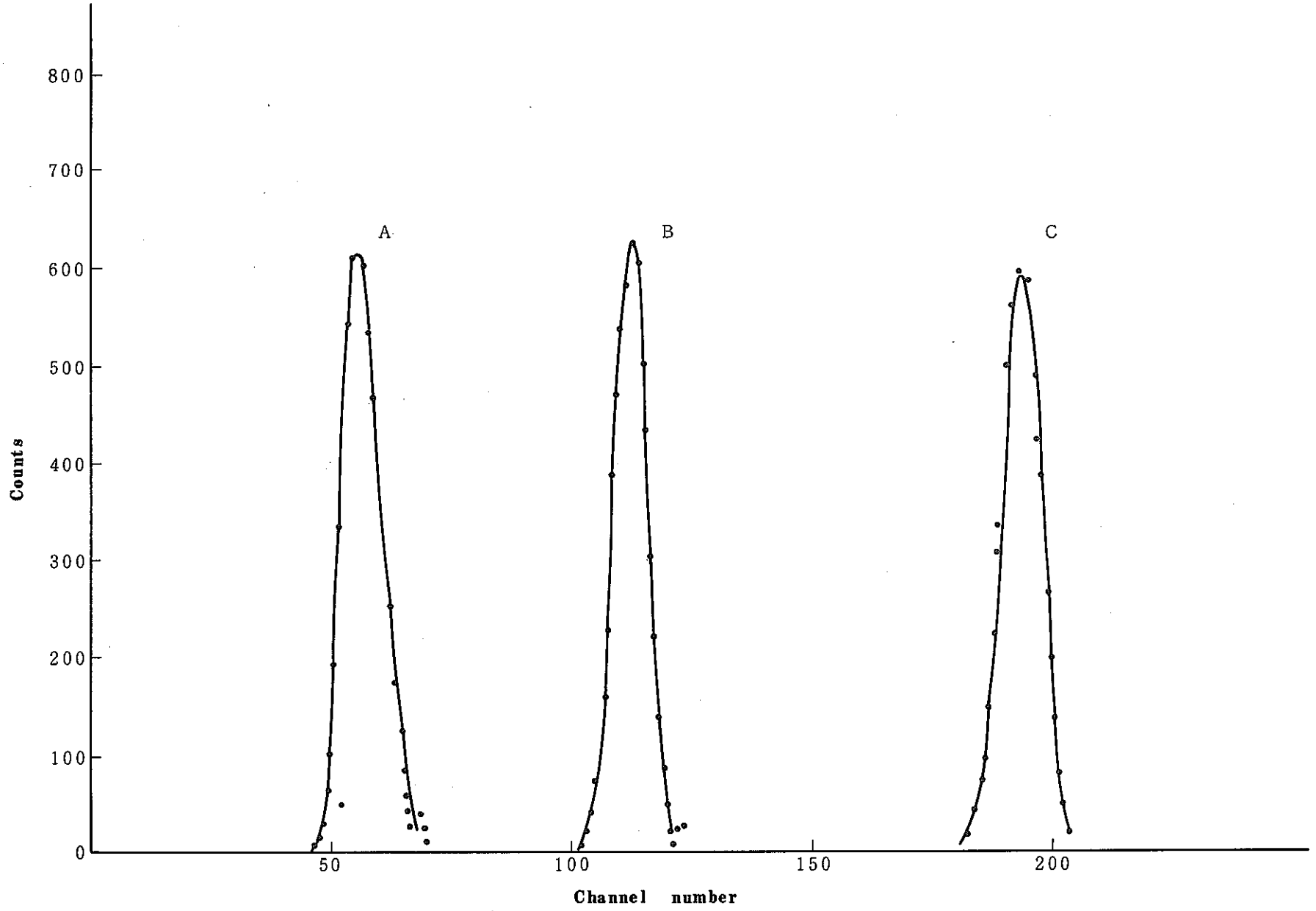


Fig. 5.3.2. Position spectrum of the PSD (X-axis)

Table. 5.4.1. 非接触コリメータ標準線源試験(2)の測定条件

項 目	内 容
検出器素材・製法	N型素材(サーフェスバリアー型)
直 径	5.16 mm ϕ
厚 さ	2.0 mm
比 抵 抗	1.7×10^4 ohm-cm
バ イ ア ス 電 圧	300 V
検 出 器 (R · C)	1.9×10^{-6} (10 k Ω \times 190 PF)
波 形 整 形 時 定 数	2 μ S
空 乏 層 厚 さ (計 算)	1129 μ m
線 源	²⁴¹ Am長方形線源
コ リ メ ー タ	0.4 mm厚アクリル板, 0.8 mm ϕ 直線多穴
線 源 検 出 器 距 離	非接触でコリメータ上に線源を設置 距離 2 mm
粒 子 入 射 方 向	金 側 入 射

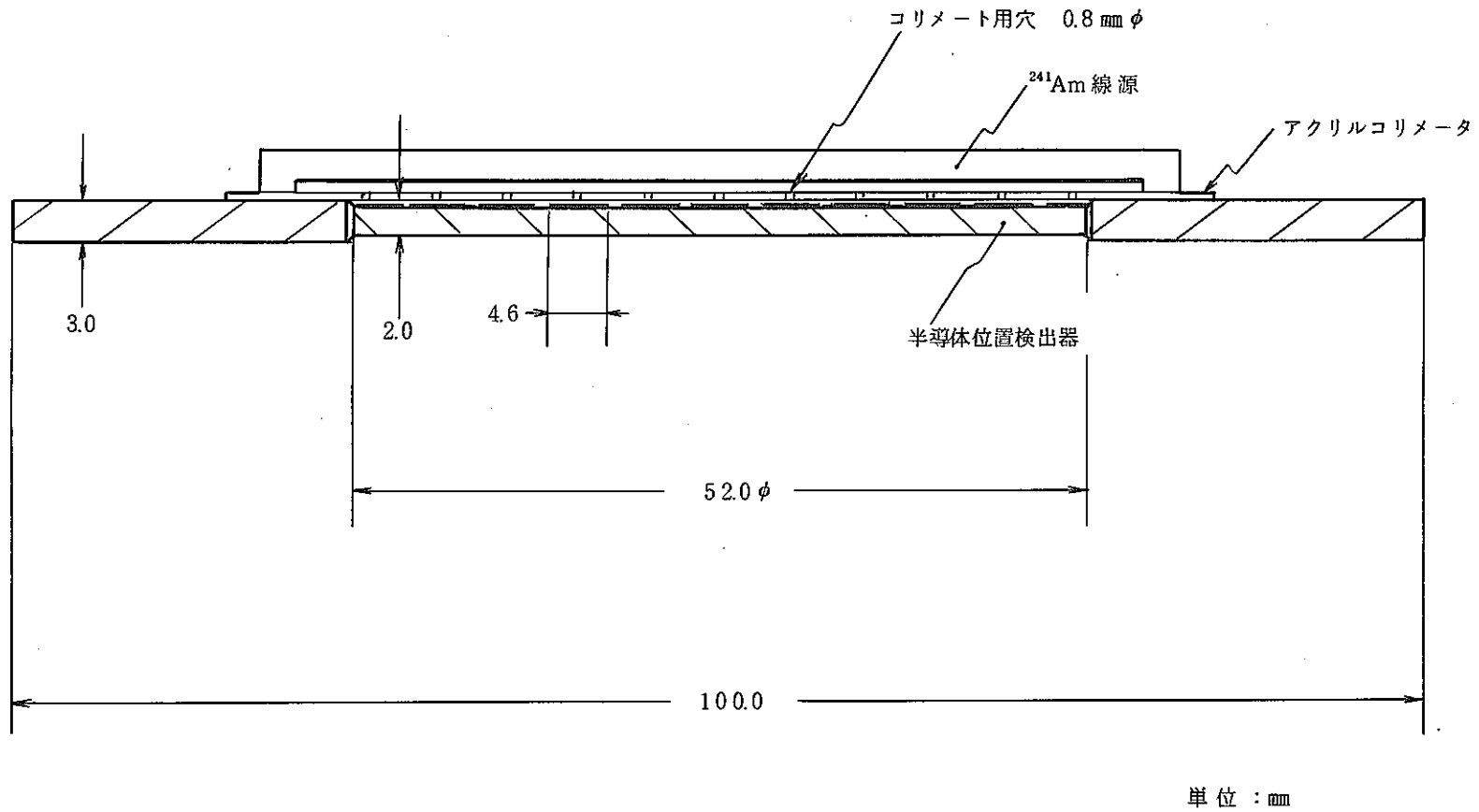


Fig. 5.4.1. 非接触コリメータ標準線源試験(2)における配置(断面図)

-64-

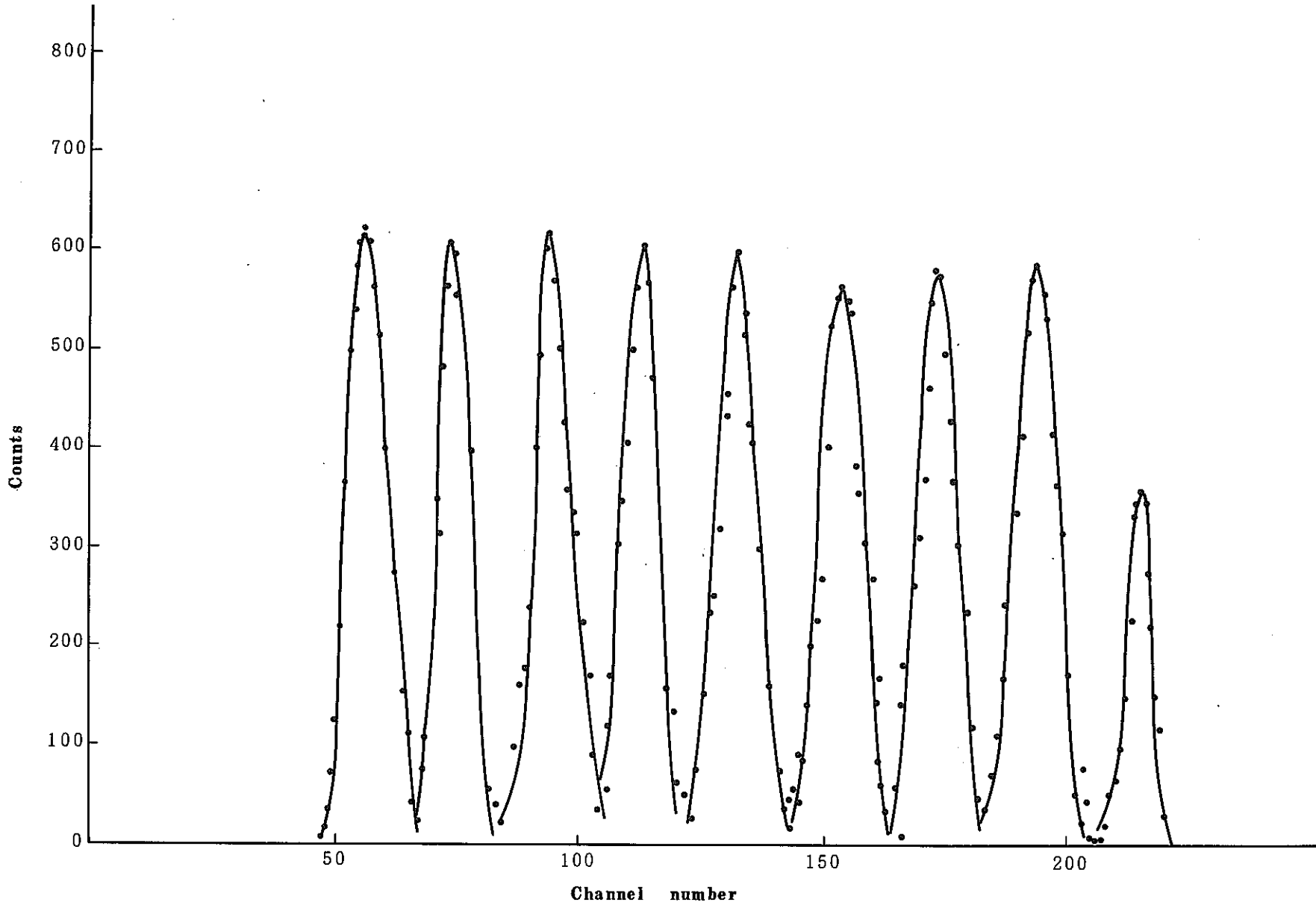


Fig. 5.4.2.. Position spectrum of the PSD (X-axis)

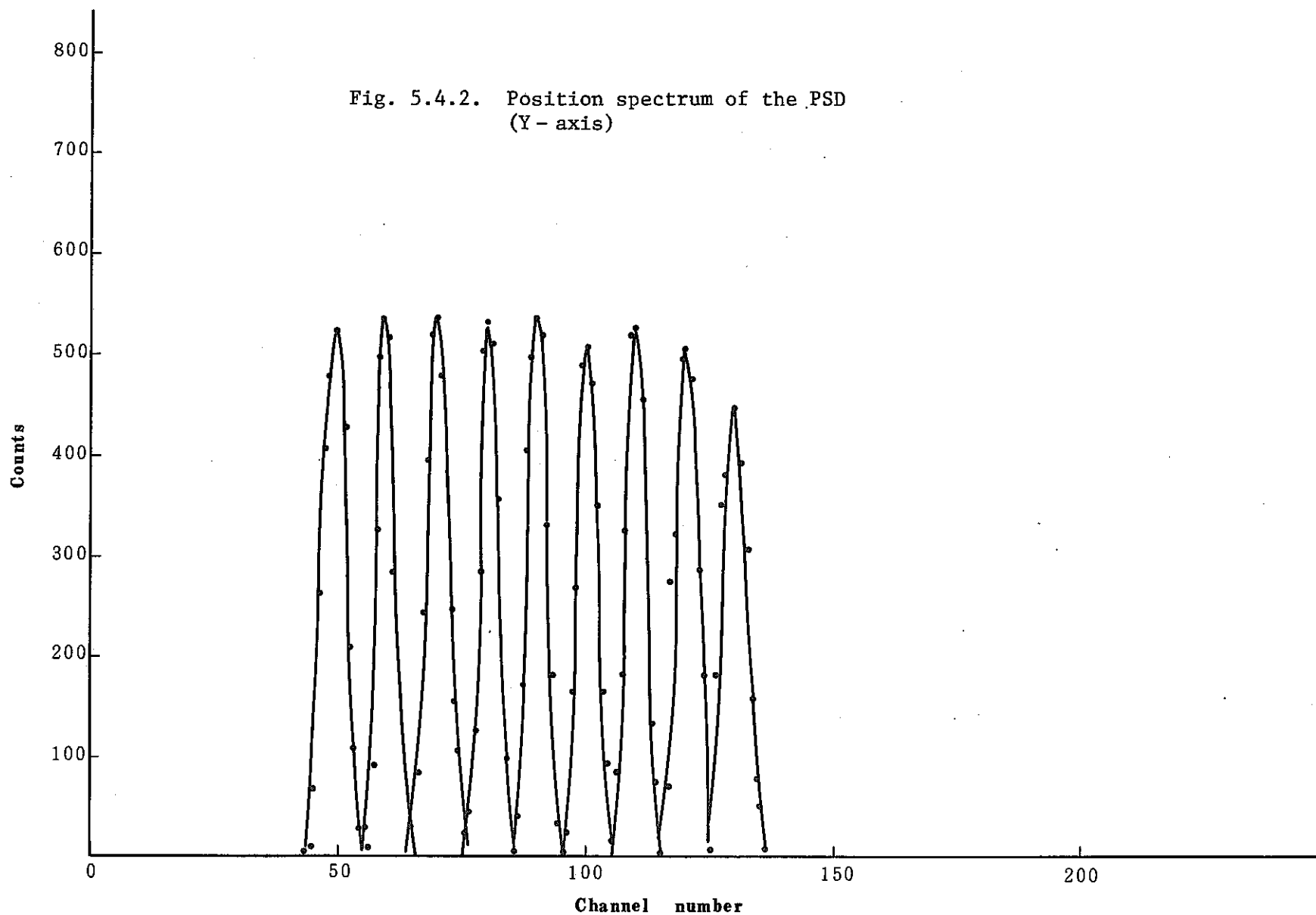


Fig. 5.4.2. Position spectrum of the PSD (Y-axis)

Fig. 5.4.3. Position spectrum of the PSD (Y-axis)

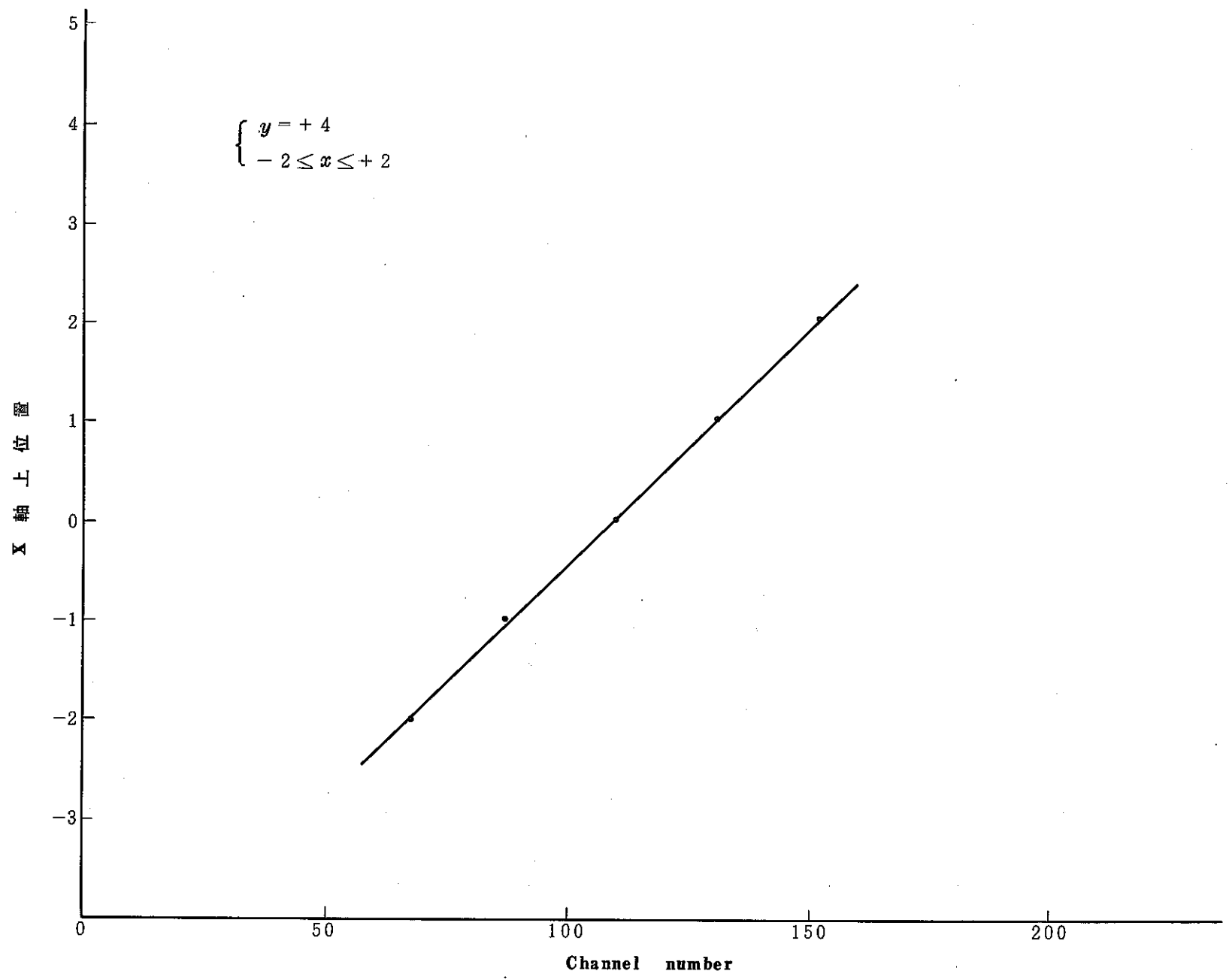


Fig. 5.4.4. X 軸位置スペクトル直線性

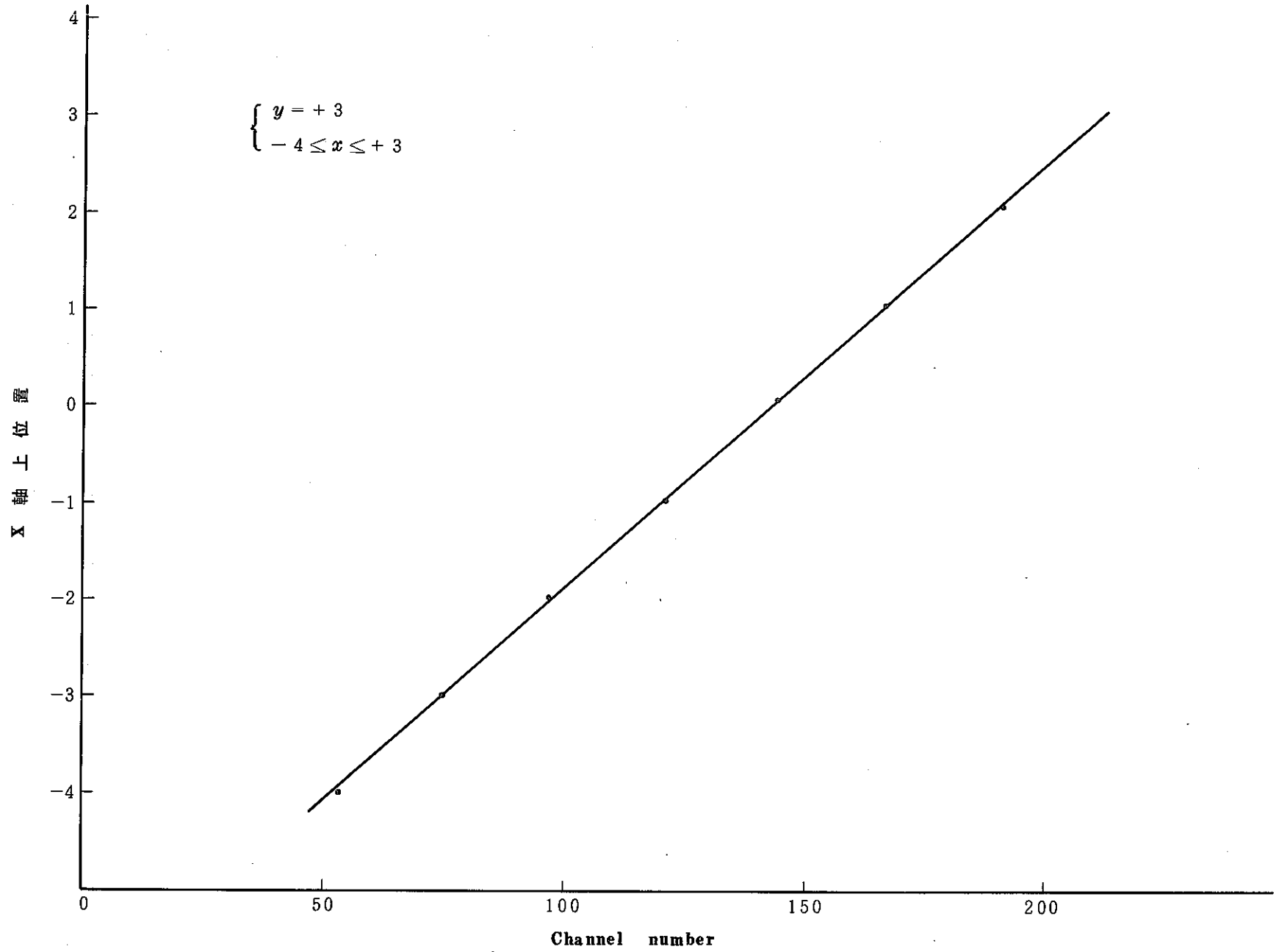


Fig. 5. 4. 5. X軸位置スペクトル直線性

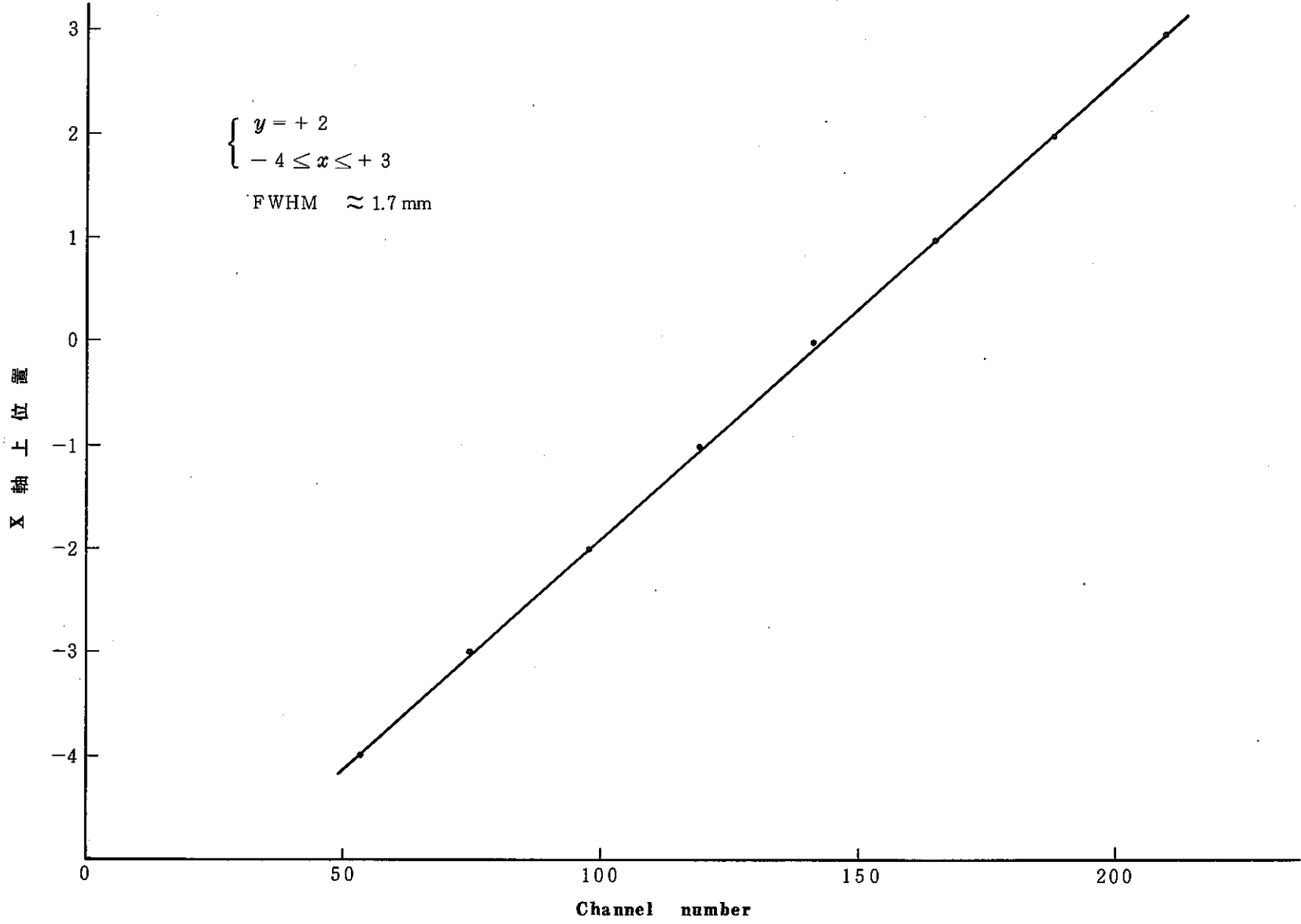


Fig. 5.4.6. X軸位置スペクトル直線性

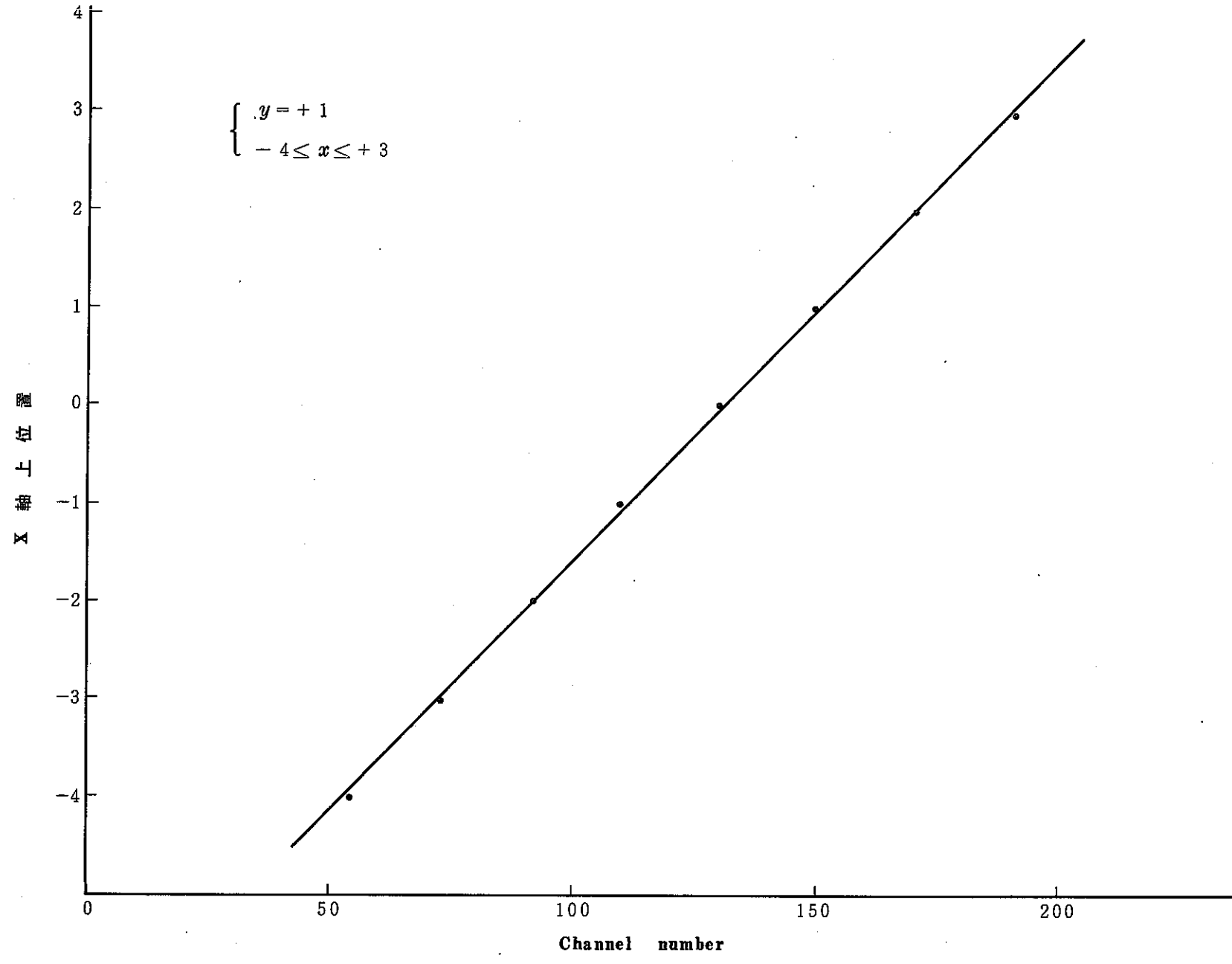


Fig. 5.4.7. X軸位置スペクトル直線性

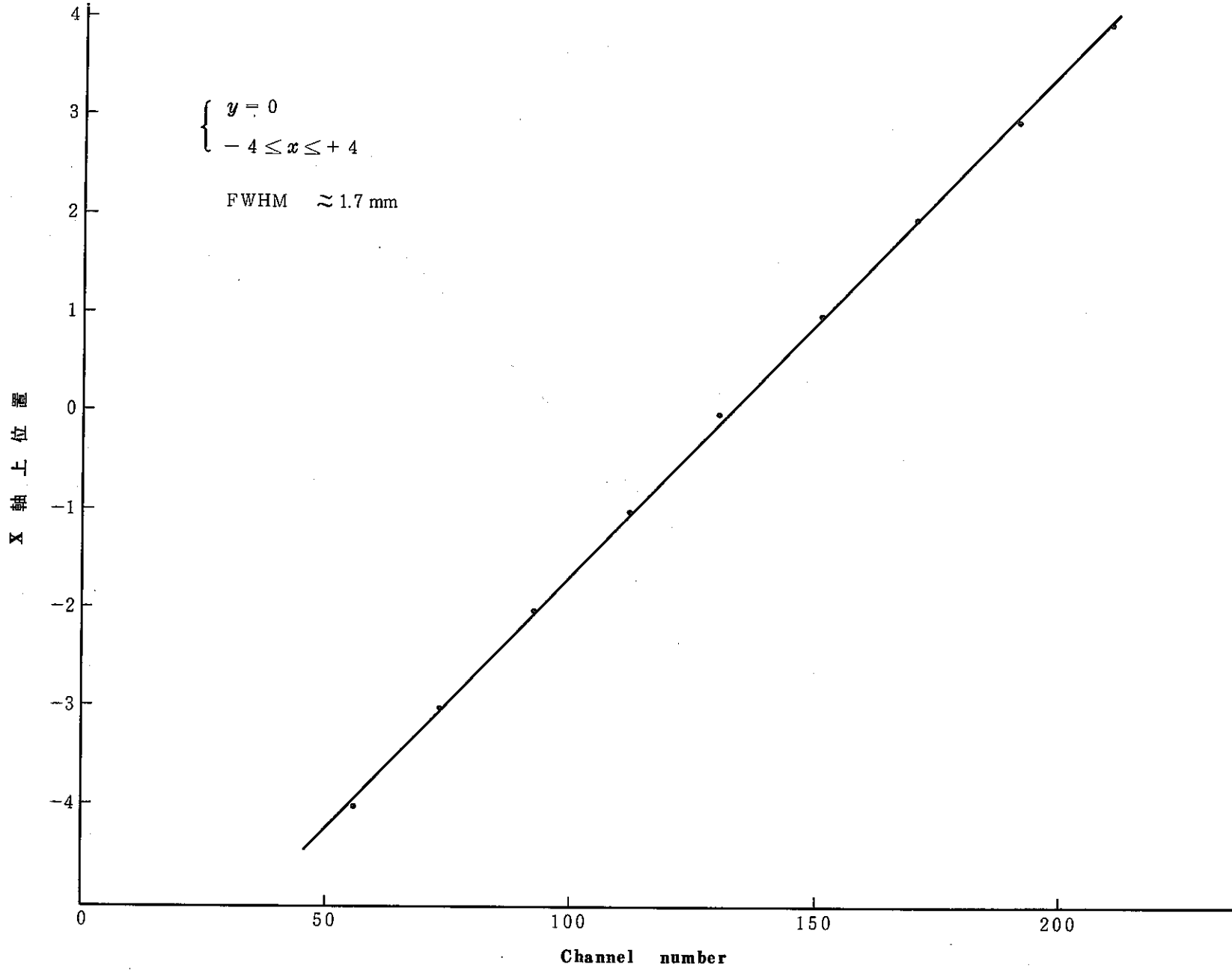


Fig. 5.4.8. X軸位置スペクトル直線性

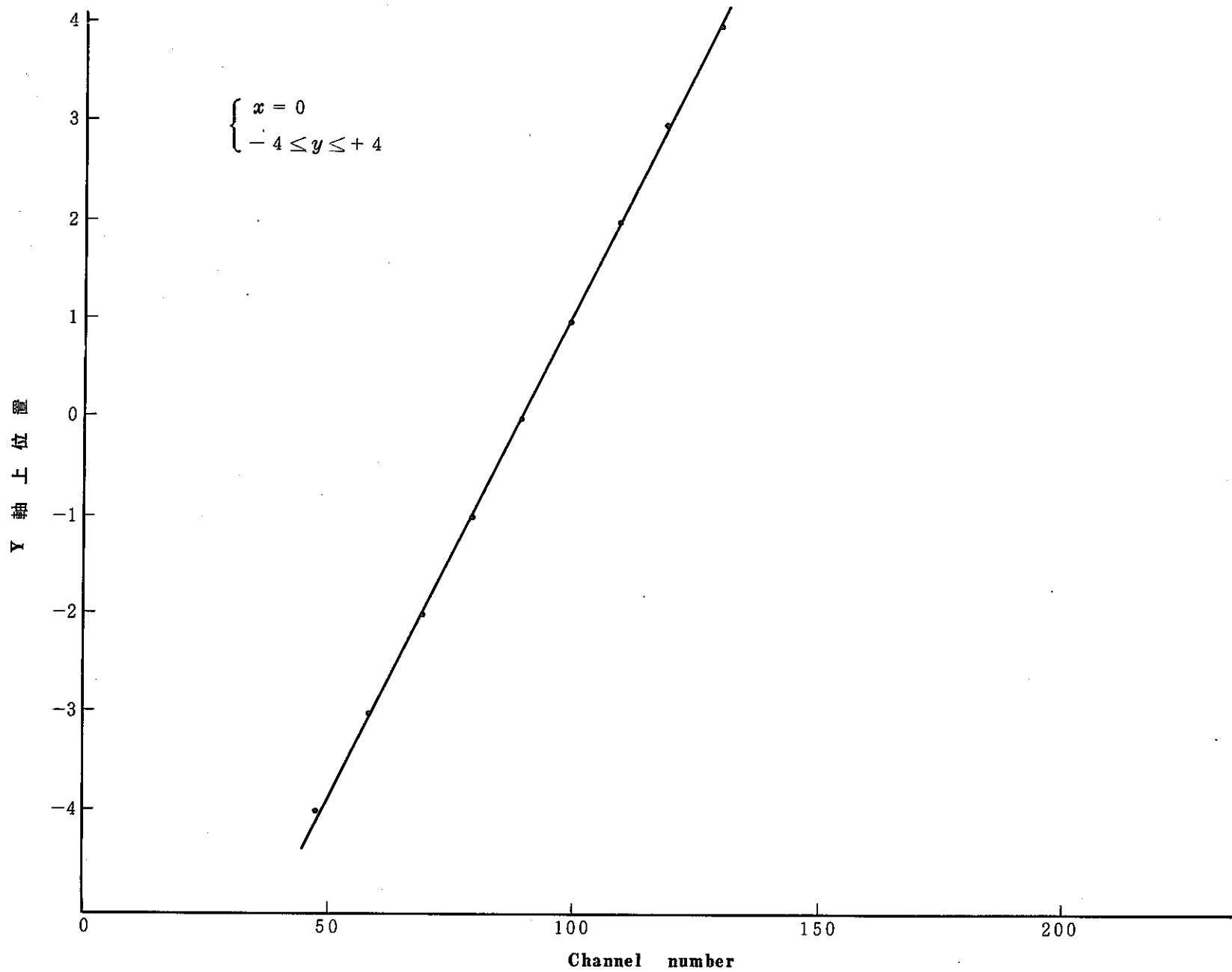


Fig. 5.4.9. Y軸位置スペクトル直線性

Table. 5. 5. 1. 接触コリメータ標準線源試験の測定条件

項 目	内 容
検出器素材・製法	N型素材(サーフェスバリアー型)
直 径	5.16 mm ϕ
厚 さ	2.0 mm
比 抵 抗	1.7×10^4 ohm-cm
バ イ ア ス 電 圧	300V
検 出 器 (R \cdot C)	1.9×10^{-6} (10k Ω \times 190PF)
波 形 整 形 時 定 数	2 μ S
空 乏 層 厚 さ (計 算)	1129 μ m
線 源	239 Pu
コ リ メ ー タ	0.4 mm厚アクリル板, 0.8 mm ϕ 直線多穴
線 源 検 出 器 距 離	検出器にポリカーボネート2 μ mフィルム2枚を 重ねその上にコリメータと線源を密着
粒 子 入 射 方 向	金 側 入 射

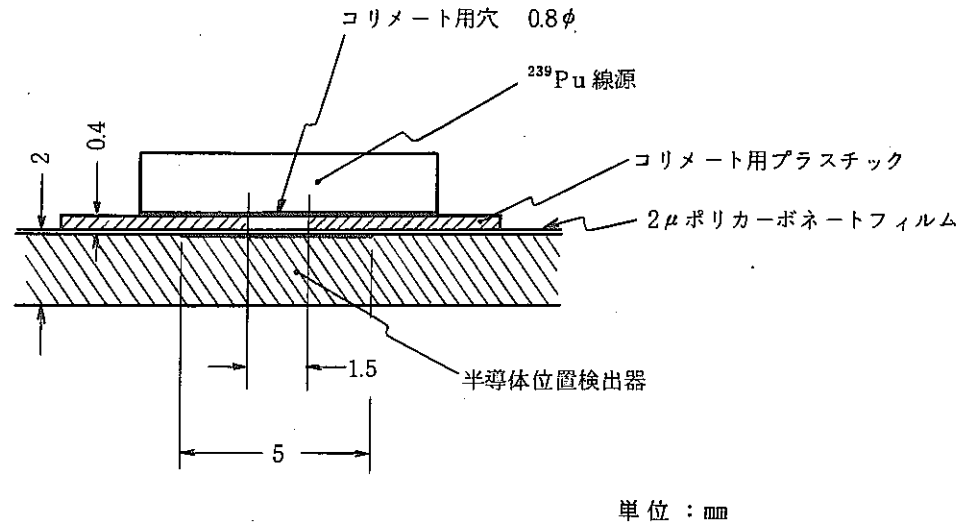


Fig. 5. 5. 1. 接触コリメート標準線源試験の配置 (断面図)

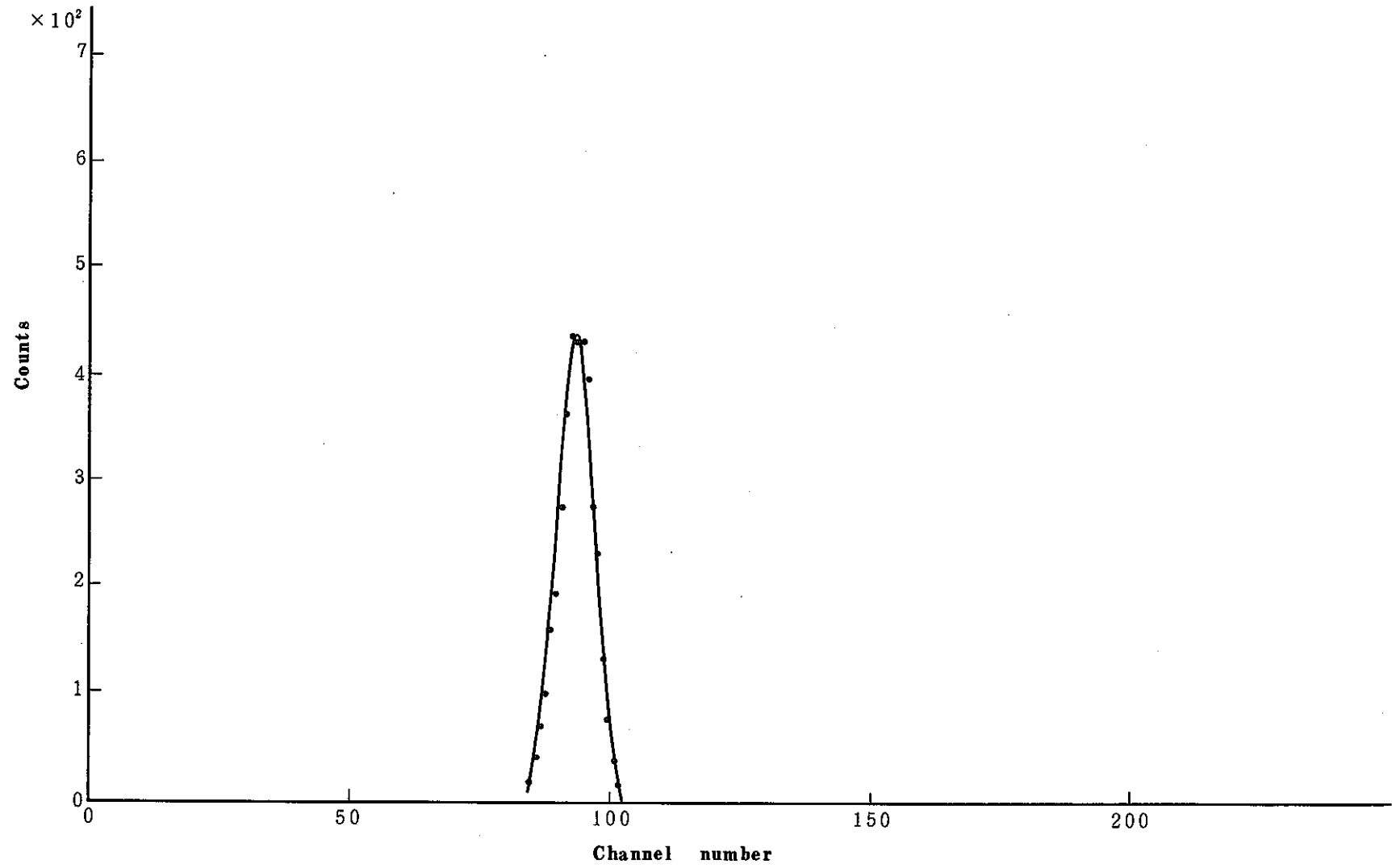


Fig. 5.5.2. ^{239}Pu コリメート線源 Y軸位置 (真空中)

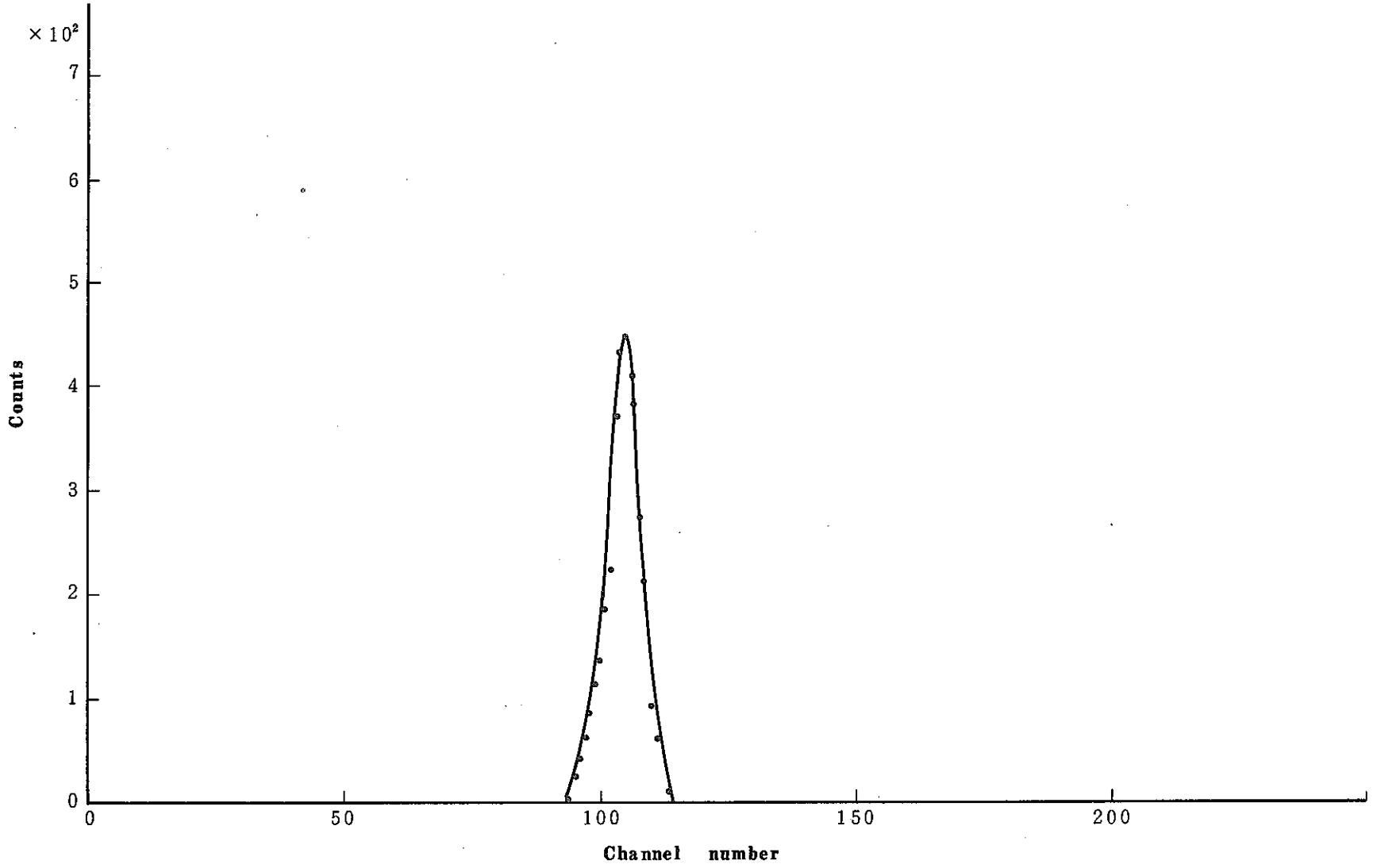


Fig. 5.5.3: ^{239}Pu コリメート線源 Y軸位置 (空气中)

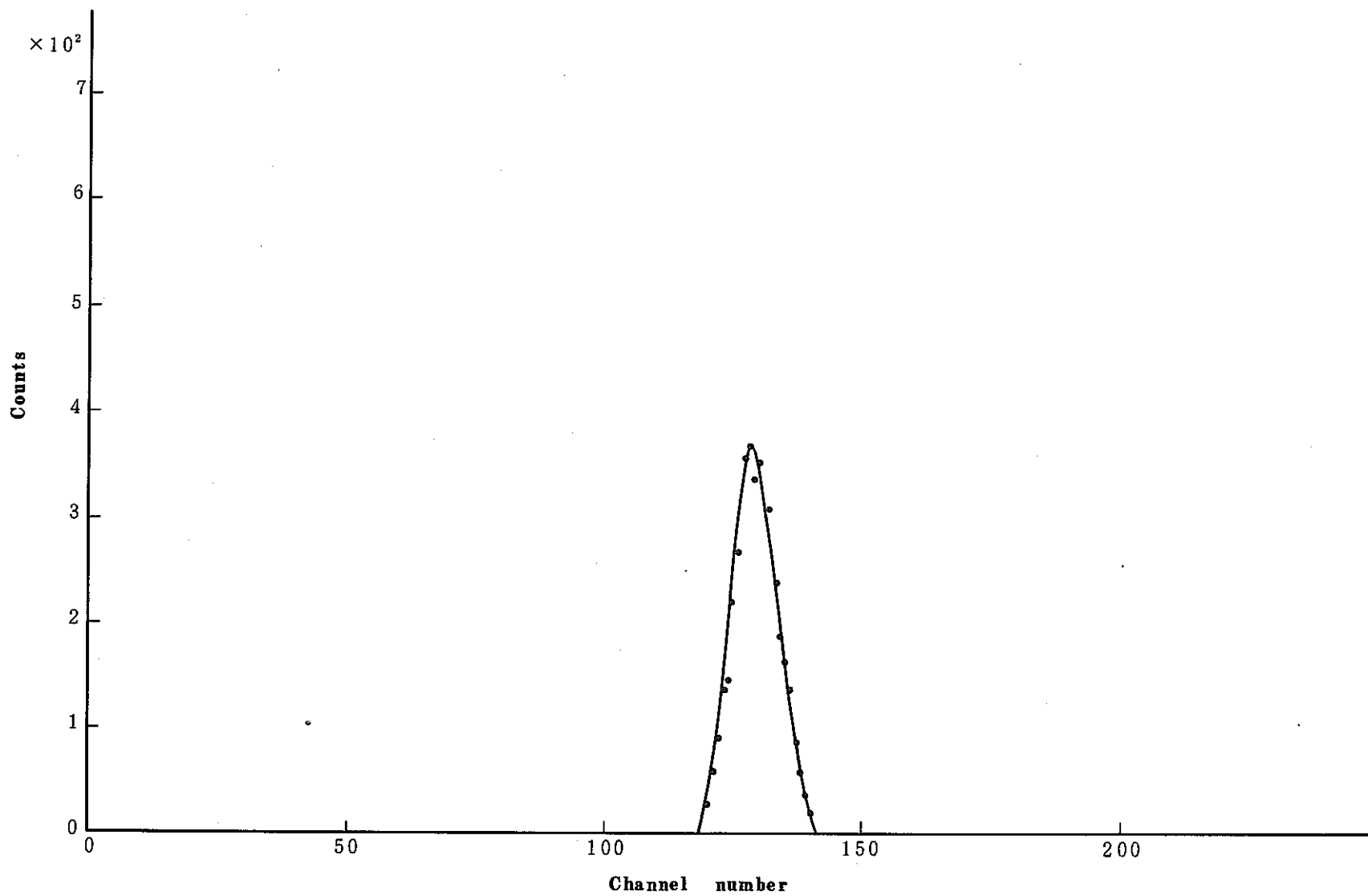


Fig. 5.5.4. ^{239}Pu コリメート線源 X軸位置 (真空中)

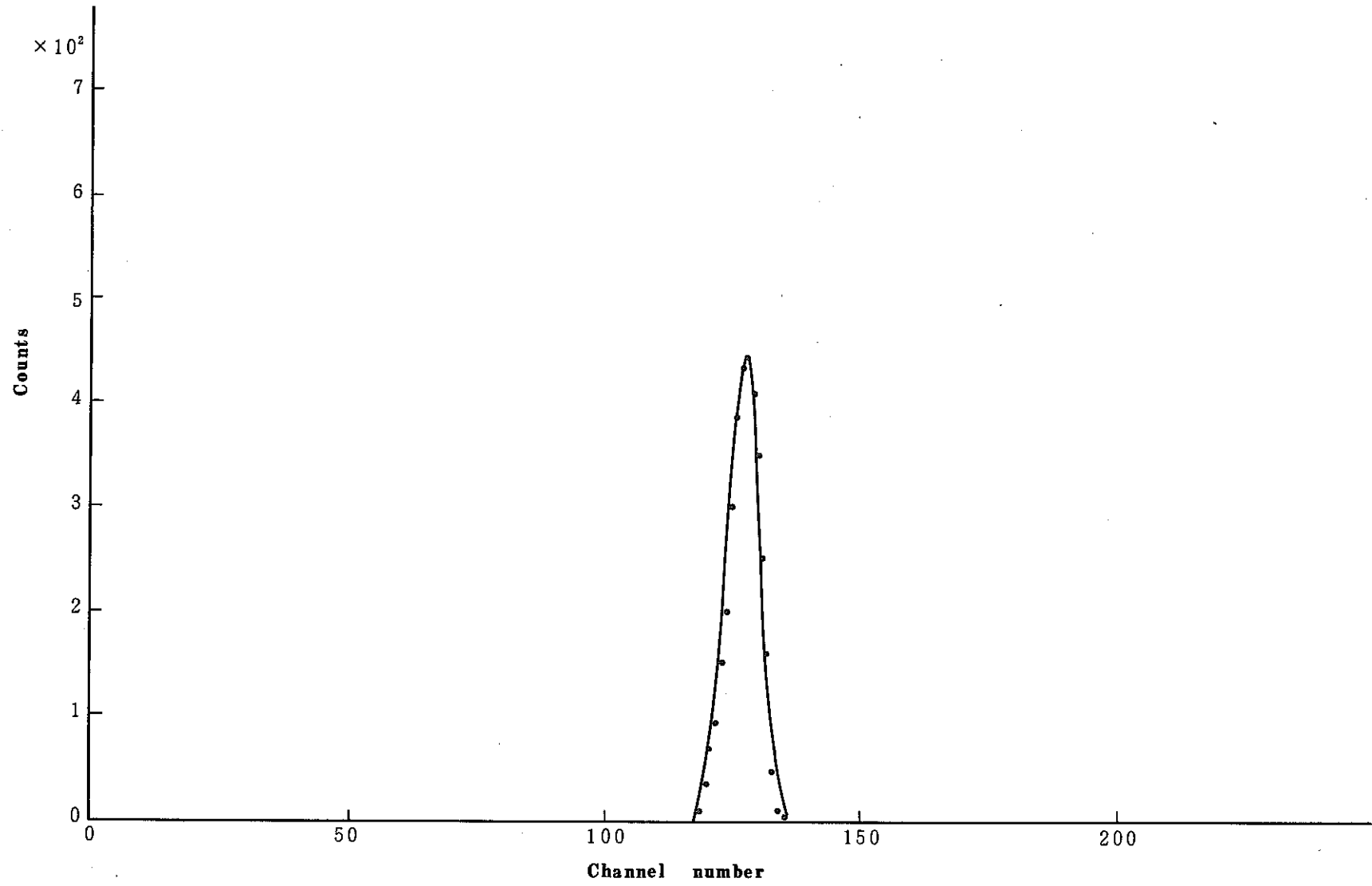


Fig. 5. 5. 5. ²³⁹Pu コリメート線源 X軸位置 (空气中)

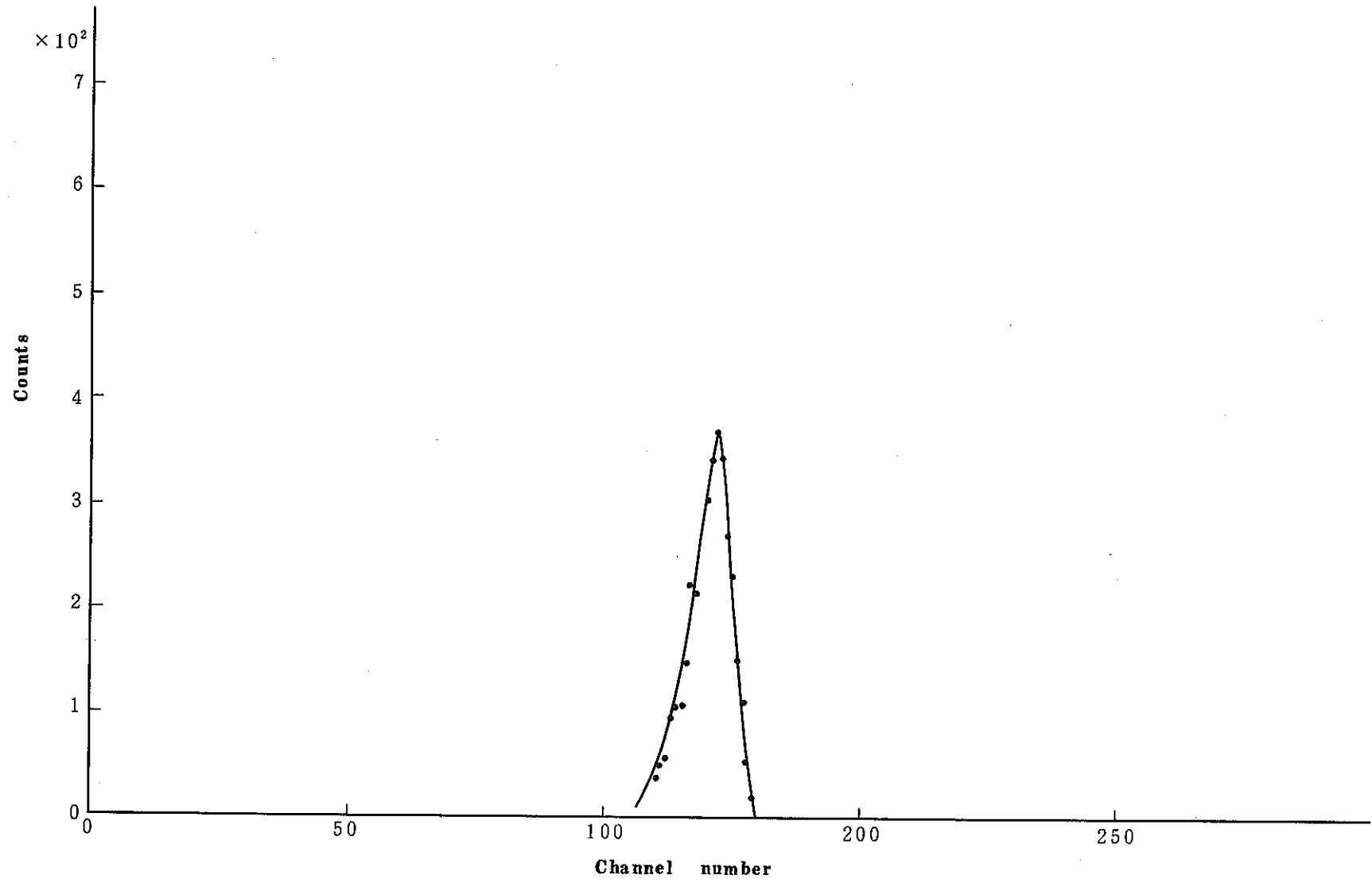
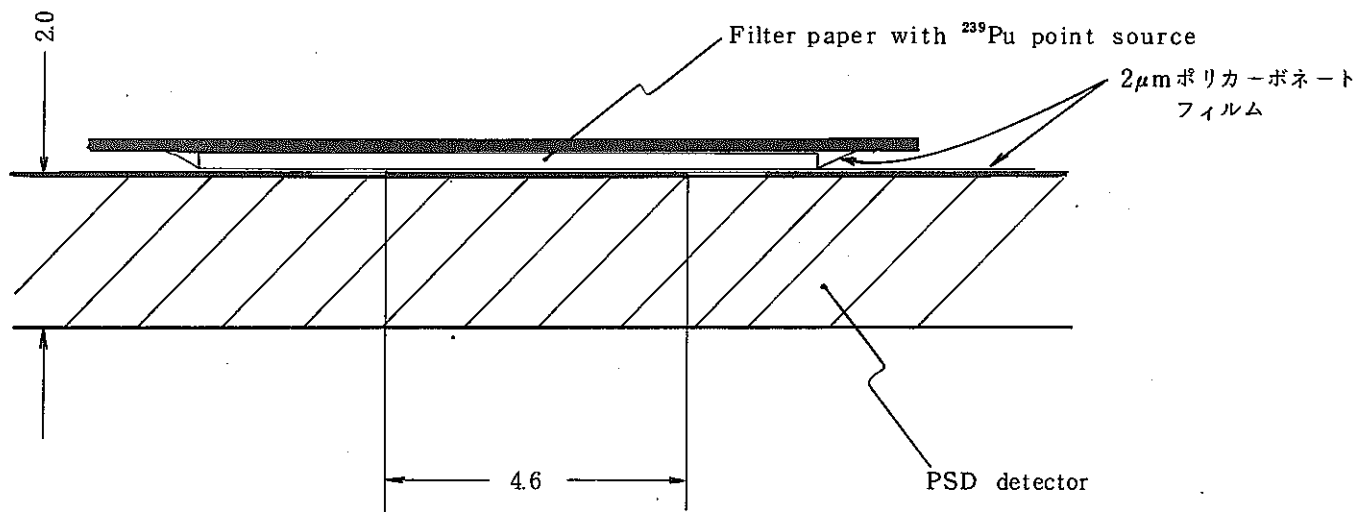


Fig. 5.5.6. 空气中エネルギースペクトル (真空中)

Table. 5. 6. 1 ^{239}Pu サンプルテストの測定条件

項 目	内 容
検 出 器 素 材	N型素材 (サーフェスバリアー型)
直 径	5 1.6 mm ϕ
厚 さ	2.0 mm
比 抵 抗	1.7×10^4 oh - cm
バ イ ア ス 電 圧	300 V
検 出 器 (R \cdot C)	1.9×10^{-6} (10 k Ω \times 190 PF)
波 形 整 形 時 定 数	2 μ S
空 乏 層 厚 さ (計 算)	1 1 2 9 μ m
線 源	^{239}Pu 粒子サンプル試料
コ リ メ ー タ	0.4 mm厚アクリル板, 0.8 mm ϕ 穴
線 源 検 出 器 距 離	検出器にポリカーボネート 2 μ m フィルム 2 枚 を重ねその上に試料を密着
粒 子 入 射 方 向	金 側 入 射



単位 : mm

Fig. 5.6.1. ^{239}Pu サンプル試験における配置 (断面図)

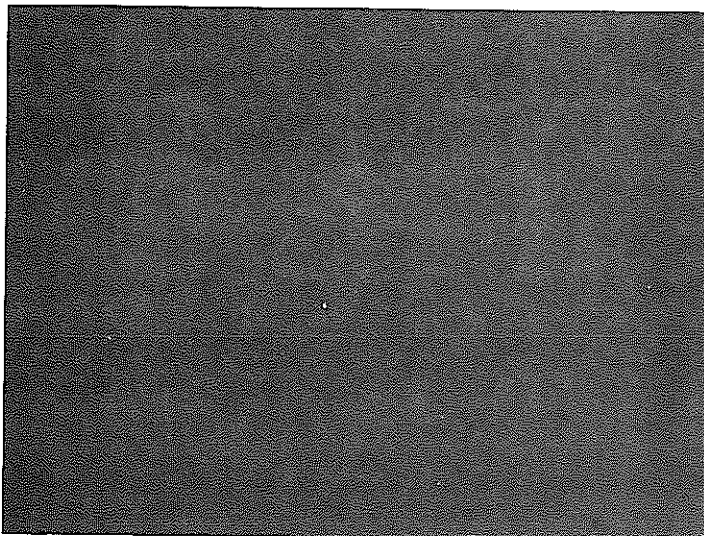


Fig. 5.6.2. ZnS(Ag) autoradiograph of the ^{239}Pu point source sample

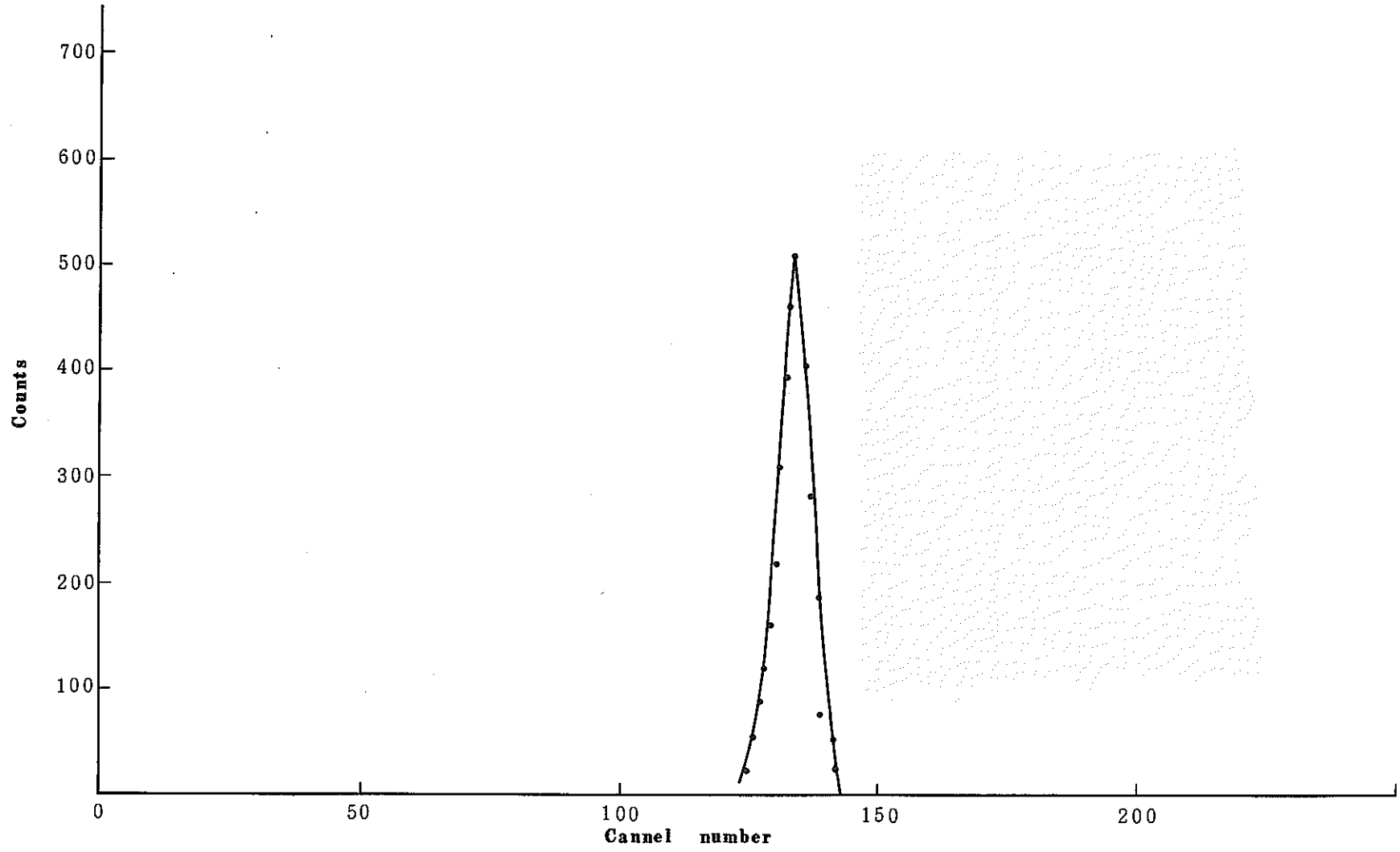


Fig. 5.6.3. Position spectrum of Y co-ordinate axis

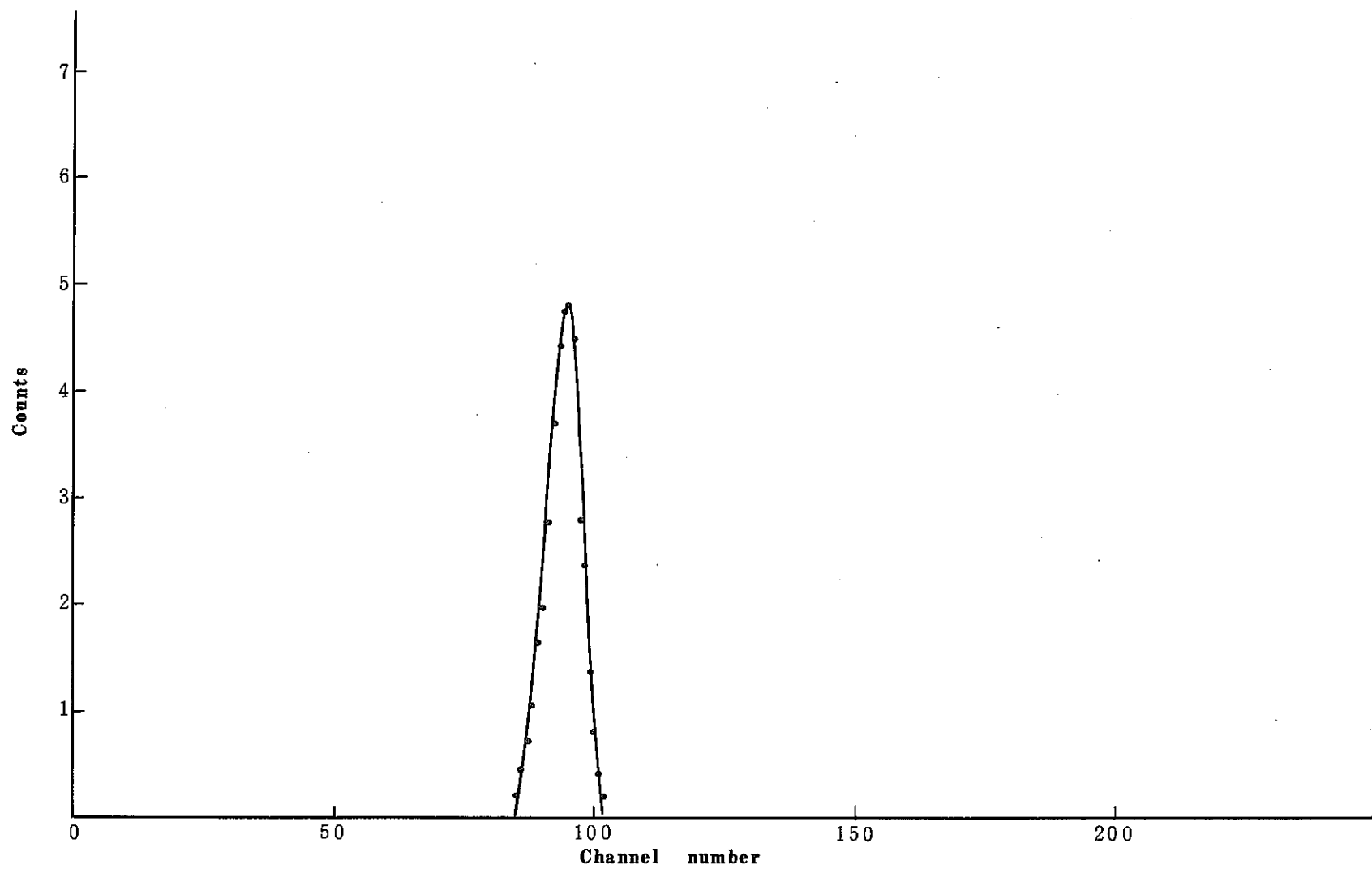


Fig. 5.6.4 Position spectrum of X co-ordinate axis

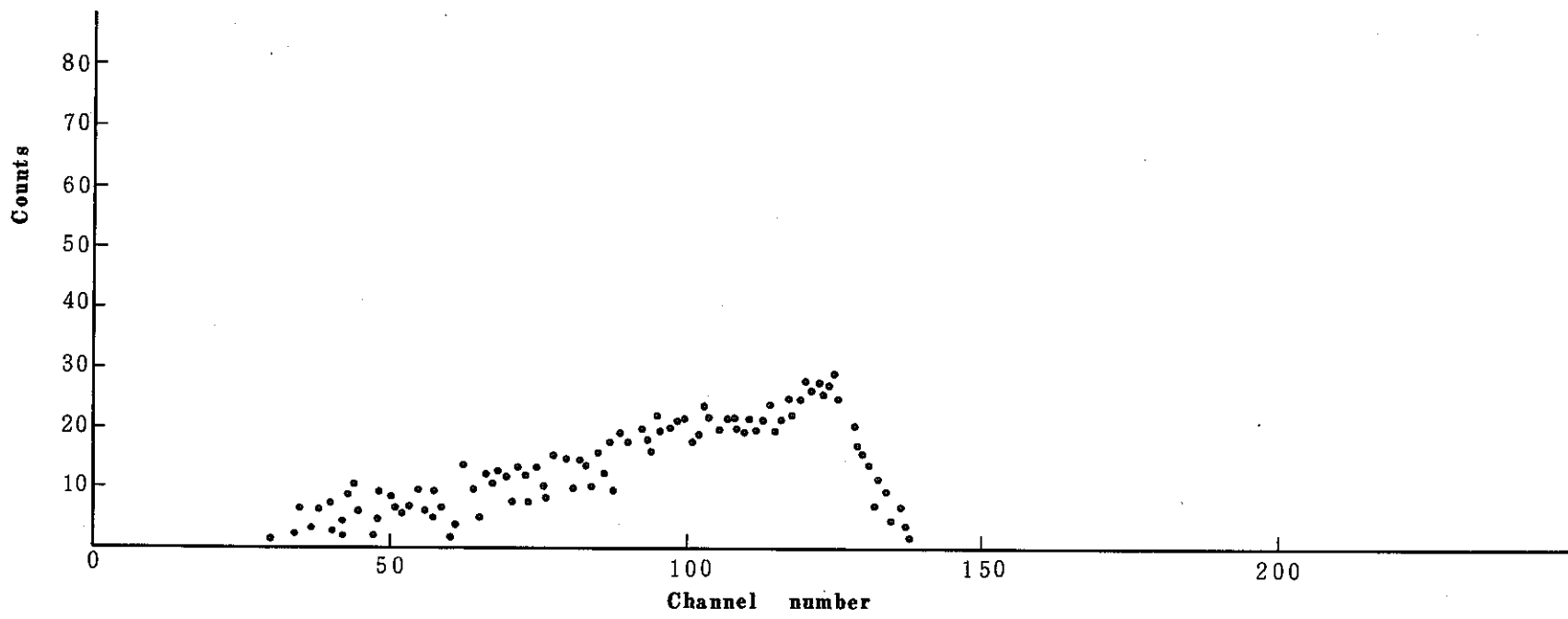


Fig. 5.6.5. ^{239}Pu ENERGY SPECTRUM (SAMPLED AT R125)

Table. 5. 7. 1. 接触劣化試験成績 分解能単位 (Kev)

試験方法	1 回目	2 回目	3. 回目	4 回目
直接接触法	7 4 5	7 4 0	7 4 5	7 4 4
間接接触法	7 4 4	7 4 7	7 4 4	7 4 4

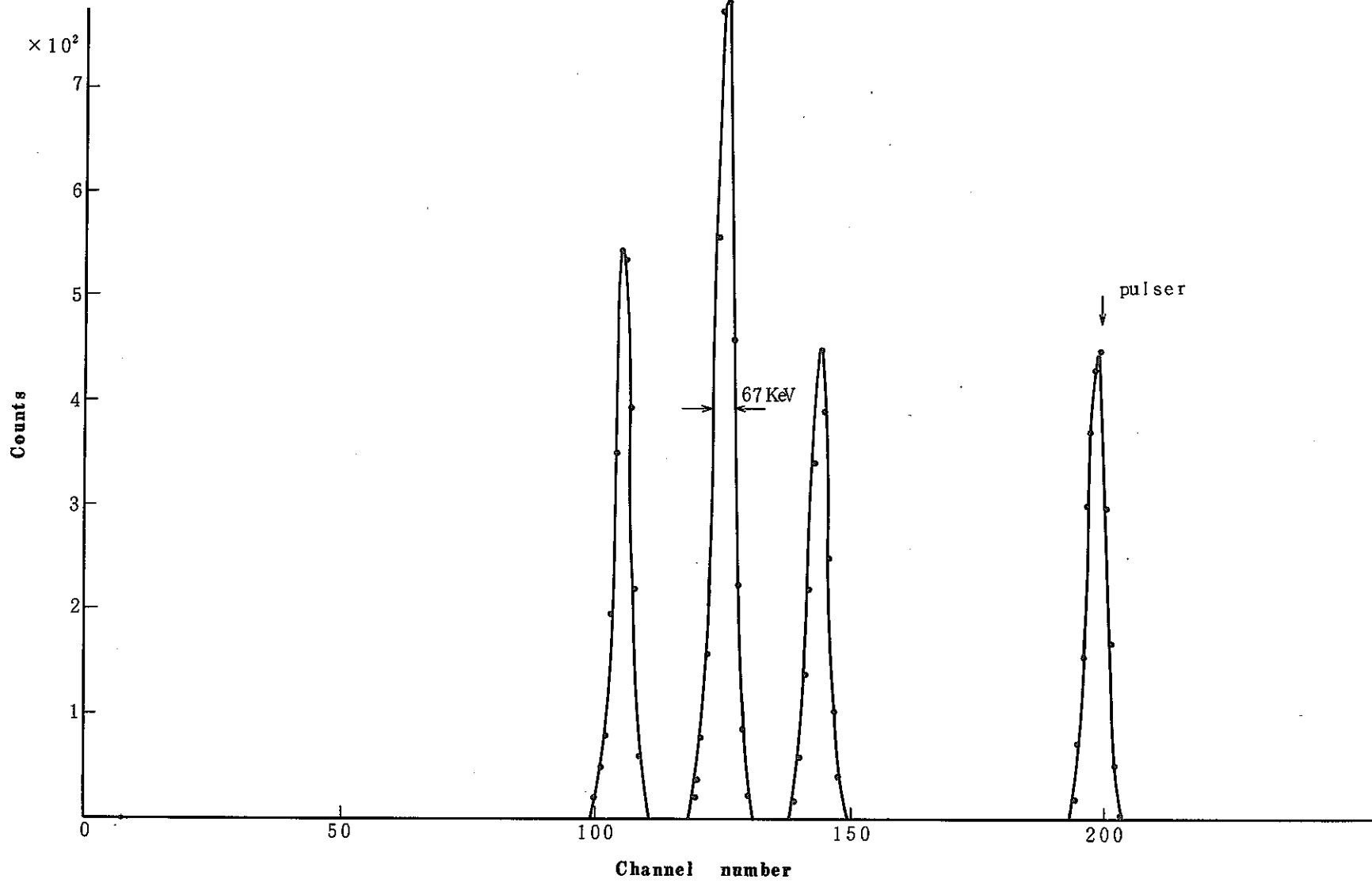


Fig. 5.7.1. 真空中エネルギースペクトル

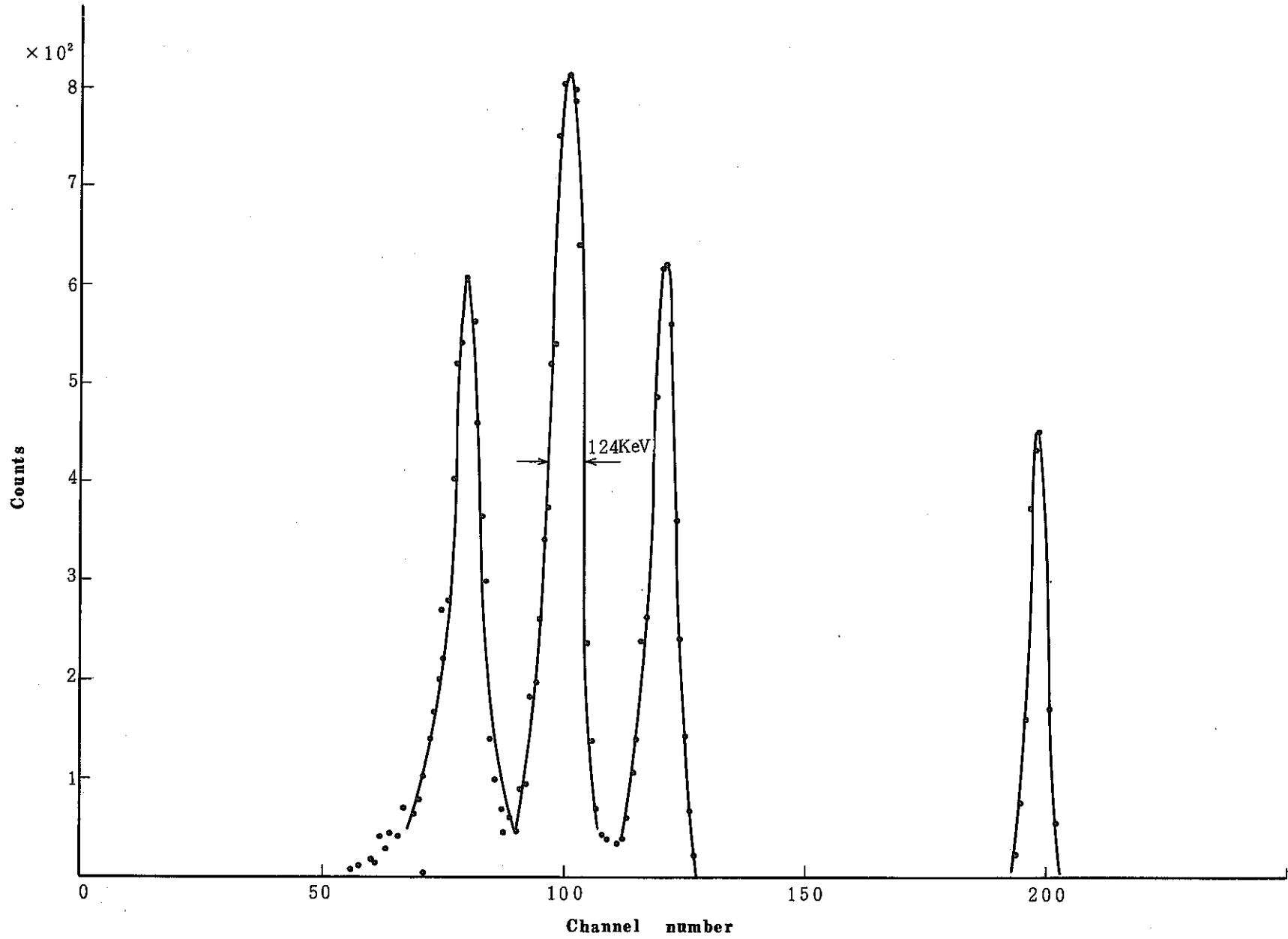


Fig. 5.7.2 マイラを挿入した場合のエネルギースペクトル

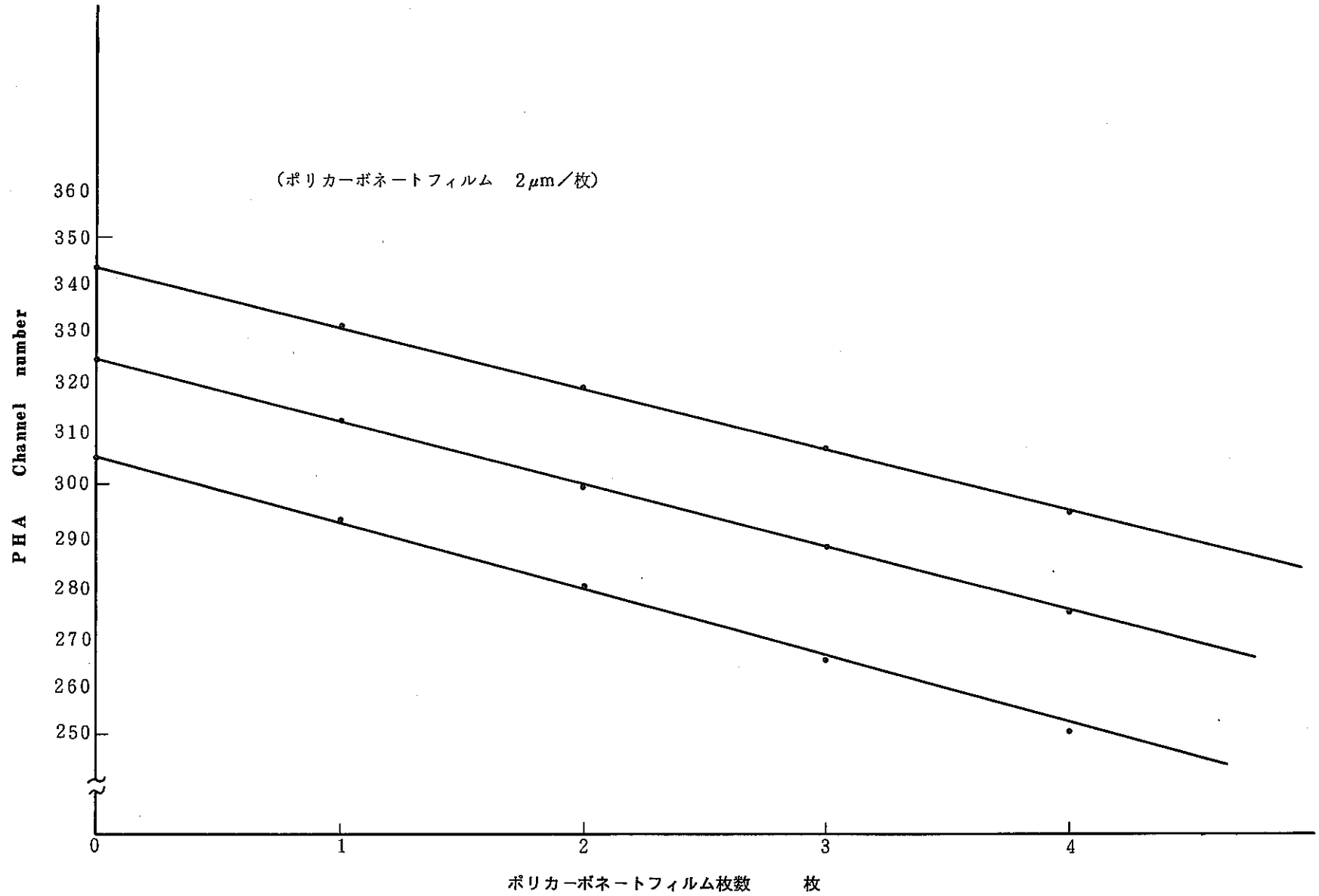


Fig. 5.7.3. フィルム挿入した場合のチャンネルシフト (ポリカーボネートフィルム 2 μ m/枚)

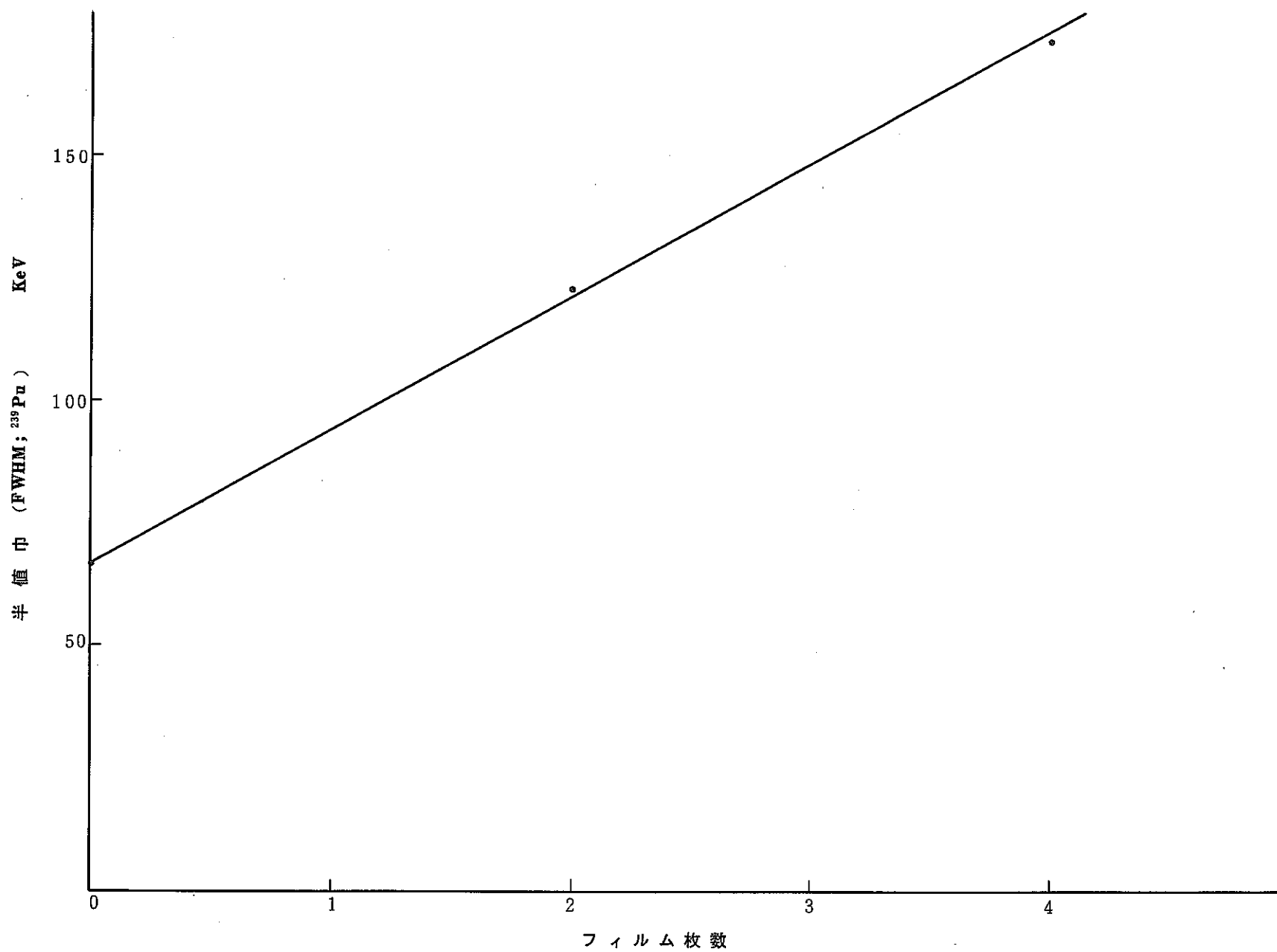


Fig. 5.7.4 フィルム挿入した場合の半値巾の増加

6. 今後の課題

今回の共同研究の目的は、半導体放射線位置検出器が放射性粒子の粒径を測定するのに利用可能かどうかを5mm巾電極を用いたチェッカーボード方式位置検出器を試作して調べることであった。試験結果は良好であった。

試験の結果今後次の課題について検討する必要がある。

6.1 位置検出器について

- 1.1 実用上必要と思われる程度（～1mm程度）の位置分解能のある位置検出器を試作検討する。
- 1.2 第1報で述べた、低抗性薄膜を検出器につけた電荷分割型の検出器について調査する。
- 1.3 検出器の表面処理方法について、より強度のある方式の可能性を検討する。

6.2 試料について

- 2.1 放射性粒子の表面密度を検討し、表面密度と検出器の適合性を検討する。
- 2.2 試料のエネルギー特性を劣化させないように検出器に試料を接触させる方法を検討する。

6.3 データ処理回路について

- 3.1 データ処理回路は現在製作中であるが、検出器とあわせて特性を検討する。

以上のように、それぞれの項目について検討する必要がある。

7. 参 考 文 献

- 1) 例えば 道家忠義 : 日本物理学会誌 33 (1978) 215
 " " " 418
- 2) 例えば 中本淳, 永田勝明, 菊池順, 道家忠義 : 応用物理 44 (1975) 1215 の
 参考文献 その後に開発されたものについては各論の所に引用する。
- 3) 詳しくは F. Cappellani and G. Restelli : Semiconductor Detectors (North-
 Holland Pub., Amsterdam, 1968)
 W.J. Price : Nuclear Radiation Detection (McGraw-Hill, Inc New York,
 1964) (邦訳あり)
 山崎文男編 : 放射線 (共立出版, 1973) 等
- 4) 白石文夫 : 理工学における同位元素研究発表会 27a-I-7 (1979)
- 5) S. Kalbitzer and W. Melzer : NIM. 56 (1967) 301
- 6) W.R. Kuhlmann, K.H. Lauterjung and B. Schimmer : NIM. 40 (1966) 109
- 7) W. Melzer and F. Puhlhofer : NIM. 60 (1968) 201
- 8) C.J. Borkowski and M.K. Kopp : RSI 39 (1968) 1515
- 9) A. Doehring, S. Kalbizer and W. Melzer : NIM. 59 (1968) 40
- 10) R.B. Owen and M.L. Awcock : IEEE NS-15 No.3 (1968) 290
- 11) J.R. Gigante : NIM. 111 (1973) 345
- 12) E. Elad and R. Sareen : IEEE NS-21 No.1 (1974) 75
- 13) A. Nakamoto, K. Nagata, J. Kikuchi, T. Doke : NIM. 130 (1975) 475
- 14) S. Kalbitzer, R. Bader, W. Melzer and W. Stumpf : NIM. 54 (1967) 323
- 15) 中本淳, 菊池順, 永田勝明 : 一次宇宙線シンポジウム (1977) CRL-報告-
 22-77-2, P. 13
- 16) J.T. Walton, G.S. Hubbard, E.E. Haller and H.A. Sommer : IEEE NS-26
 No.1 (1979) 334
- 17) W.K. Hofker, D.P. Oosthoek, A.M.E. Hoeberechts, R. van Dantzig,
 K. Mulder, J.E.J. Oberski, L.A.Ch. Koersts, J.H. Dieperink, E. Kok and
 R.F. Rumphorst : IEEE NS-13 No.3 (1966) 208
- 18) J.A.D. Boer, A.M.E. Hoeberechts, W.K. Hofker, D.P. Oosthoek, K. Mulder,
 L.A.Ch. Koersts, R. Van Kamtzig, J.E.J. Oberski, J.H. Dieperink, E. Kok
 and R.F. Rumphorst : NIM 92 (1971) 173
- 19) U. Biebl and F. Parak : NIM 112 (1973) 455
- 20) 塩谷亘弘, 中本淳, 道家忠義 : 放射線 4 No.3 (1977) 30
- 21) W.L. BROWN et al. IEEE, NS-7, No.3, (1970), 329
- 22) G.N. TAYLOR et al. IEEE, NS-24, No.1, (1970), 497
- 23) J.E. Lamport, G.M. Mason, M.A. Perkins and A.J. Tuzzolino :

- NIM 134 (1976) 71
- 24) M.S. Gerber, D.W. Miller, P.A. Schlosser, J.W. Steidley and A.H. Deutchman : IEEE NS-24 No.1 (1977) 182 Ge(Li)
 - 25) 例えば R.J. Fox and C.J. Borkowski : IRE NS-9 No.3 (1962) 213,
N.H. Hansen : IRE NS-9 No.3 (1962) 217
現在米国ではこの名称で市販されている。
 - 26) 簡単には沸点 $\sim 110^{\circ}\text{C}$ 前後のシリコン油の中で電圧をかけ素材自身の発熱を利用して行なう。
 - 27) E. Laegsgaard, F.W. Martin and W.M. Gibson : IEEE NS-15 No.3 (1968) 239,
NIM 60 (1968) 24
 - 28) E.J. Ludwing : RSI 36 (1965) 1175
 - 29) Position sensing by charge division IEEE, NS-23, No.1 (1976) 251, by V. REDKA. et. al.
 - 30) Position sensing semiconductor detectors AERE-R-5393, (1957), by R.B. OWEN. et. al.
 - 31) 放射線位置検出器による放射性粒子粒径測定法の開発
PNCT841-79-02 (1979) 63P 中田啓, 金盛正至

付 録

位置検出器の試験方法には

- ① 標準 (α , β 線) による試験
- ② LED光パルスによる試験
- ③ 位置試験用パルサーによる試験

の3つの方法が考えられるが、この中で、今回試験に使用したのは、①の標準線源が大部分である。しかし、この試験方法は線源強度が小さく試験に時間がかかるという面で欠点があり、②、③の方法を準備する必要がある。

LED光パルサーによる試験を大面積の検出器に対して実施したので結果をTable 1及びFig 1に示す。

Table 1 LEDパルサーによる76mm ϕ の位置検出器試験

項 目	内 容
検出器素材	N型素材 (サーフェスバリアー型)
直 径	76.8 mm
厚 さ	300 μ m
比 抵 抗	1500 ohm-cm
バイアス電圧	90 V
検出器 (R・C)	3.9×10^{-5} (2631 pF \times 15k Ω)
波形整形時定数	4 μ sec
空乏層厚さ (計算)	185 μ m
線 源	^{241}Am
コリメータ	なし
線源検出器距離	——
粒子入射方向	——

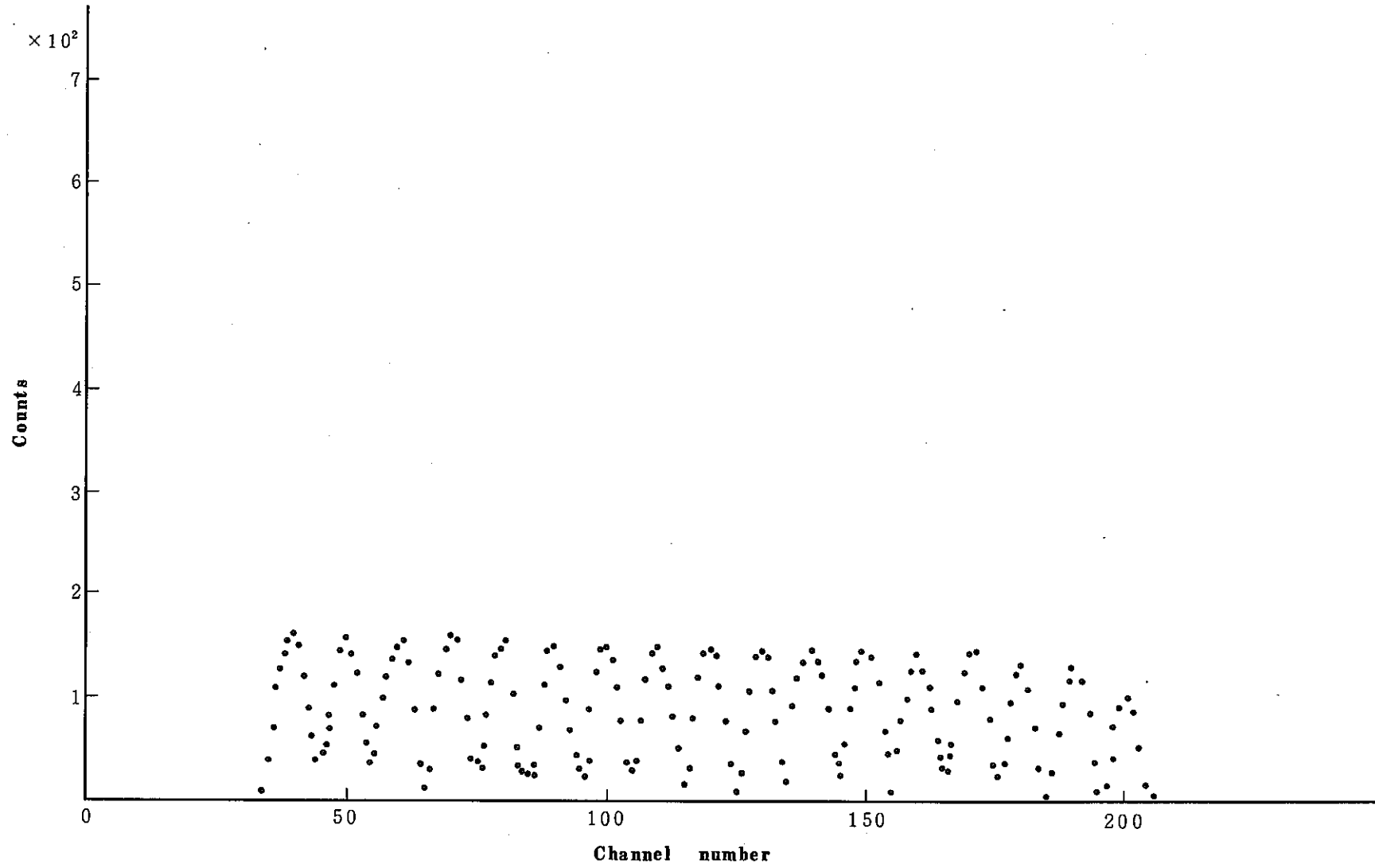


Fig -1 LEDパルサーによる76mm ϕ 検出器位置パルススペクトル