

比例計数管の製作

波多野 佑亮

2003年4月9日

第 1 章

比例計数管の原理

比例計数管はガス入りの放射線検出器で、1940年代後半に導入された。構造としては、検出器にガスが入っていて(主に不活性ガス)、陽極の芯線に高電圧がかけられるようになっている。

放射線とガスが相互作用して、放射線のエネルギーに比例した数の1次イオン対が作られる(ここでは $Ar \rightarrow Ar^+ + e^-$)。この電荷が移動する間に中性ガス分子と多数の衝突をする。イオンは重いので移動度が小さく、衝突間にほとんどエネルギーを得ることが出来ない。逆に、自由電子は印加電場によって容易に加速され、衝突時には大きな運動エネルギーを持ちうる。このエネルギーが中性ガス分子の電離エネルギーより大きい場合にはイオン対がさらに作られる。この2次電離過程で作られた電子も電場により加速され、中性ガス分子と衝突し、イオン対を作る。そして最終的には陽極に集まる。

このように、放射線との相互作用で作られた一次イオン対が電場によって増幅され2次イオン対が多数作られる。印加電圧によっては(比例領域)、この2次イオン対は1次電子対の数に比例する。つまり、放射線のエネルギーに比例するので、最終的に得られた電荷を測定することで、放射線のエネルギーを測定することが出来る。

1.1 ガス増幅

1.1.1 電子なだれ

単位長さあたりに電子の数が増加する割合は、 n を電子数として

$$\frac{dn}{dx} = \alpha n \quad (1.1)$$

で表せる。ここで α はガスに対する第一タウンゼンド係数である。この値は閾値以下の電場に対して 0 であり、電場の増加と共に増加する。平行平板の配置のように空間的に一定の電場であれば α は定数である。この式の解

$$n(x) = n(0)e^{\alpha x} \quad (1.2)$$

より電子密度が距離と共に指数関数的に成長する。

円筒形状の場合は、電子は電子なだれの進行する方向に向かって増大していて、距離による電子密度の成長はより急になる。

1.1.2 動作領域

閾値以下の電場だとガス増幅が起こらないので、最初に作られたイオン対の数がそのまま検出される (電離飽和領域)。ただしイオンの再結合を抑制するだけの電場は必要である。

閾値に達すると、ある範囲の電場でガス増幅は直線性を保ち、最初に作られたイオンに比例した電荷が検出される (比例領域)。

さらに電場が大きくなると、陽イオンが空間電荷を形成して、制限比例領域 ガイガーミュラー領域へなっていく。ガイガーミュラー領域では入射放射線で作られた最初のイオン対の数に無関係におなじ電荷が検出される。

1.2 構造

多くの比例計数管は、円筒形状に作られる。計数管の外側全体を陰極として接地し、中心に張った細い線を陽極として電圧をかける。このような極性にして電子を中心軸線に集める理由は、次の 2 点から必要になる。

(1) ガス増幅には大きな値の電場が必要である。

(2) 最初の放射線相互作用で作られた全イオン対に対して一様な増幅を実現するには、ガスの全体積に比べてガス増幅の領域をごく小さい体積に制限する必要がある。もしガス増幅の範囲内で一次イオン対が作られたら、作られた場所によって最終的に得られる電荷が違ってきてしまうからである。

円筒形状の比例計数管での半径 r での電場は

$$E(r) = \frac{V}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (1.3)$$

で与えられる。ここで

V = 印加電圧 a = 陽極線の半径 b = 陰極の半径

である。したがって半径 r の小さいところでは大きな値の電場が得られる。

1.2.1 入射窓

一様な資料の X 線の透過率は、

$$\frac{I}{I_0} = \exp[-\tau(E, x)] = \exp(-\mu\rho x) \quad (1.4)$$

で表される、すなわち光学的厚さは

$$\tau = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1.5)$$

である。ここで I = 透過した X 線光子、 I_0 = 入射した X 線光子である。

また、 μ = 質量吸収係数、 ρ = 物質の密度、 x = 物質の厚さである。

Cromer らによれば、ベリリウムの質量吸収係数はベリリウムの K 吸収端 (0.12keV) より高いエネルギーの範囲では、エネルギーの関数として

$$\mu = 567.1E^{-3.02} \quad \text{ただし } E \text{ の単位は } keV$$

と近似できる。Mn の K_α 線のエネルギー $5.9keV$ に対しては

$$\mu = 567.1 \times (5.9)^{-3.02} = 2.66cm^2/g$$

よって今回用いた $50\mu m$ のベリリウム膜に対して ($\rho = 1.85gcm^{-1}$)、透過率は

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu\rho x) = \exp(-2.66 \times 1.85 \times 5.0 \times 10^{-3}) = 97.5\%$$

となる。

1.2.2 ガスについて

平均自由行程は断面積を σ 、数密度を n とすると

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} \quad (1.6)$$

で与えられる。

例えば、Ar ガス (1.1atm) の数密度 $n = 2.76 \times 10^{19}$ 個 cm^{-3} 、1KeV の X 線に対する断面積を $\sigma_x = 2.2 \times 10^{-19} cm^2$ とすると、平均自由行程 λ_x は

$$\lambda_x = \frac{1}{n\sigma_x} = \frac{1}{2.76 \times 10^{19} \times 2.2 \times 10^{-19}} = 0.16 cm$$

となる。

Ar ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$) は第一イオン化エネルギーは 15.76eV だが、Pr ガスの平均電離エネルギーは $W = 26.4eV$ である。

電子のエネルギーが 26.4eV での電離断面積は

$$\sigma_e = 1.5 \times 10^{-16} cm^2$$

である。よって平均自由行程は

$$\lambda_e = \frac{1}{n\sigma_e} = \frac{1}{2.76 \times 10^{19} \times 1.5 \times 10^{-16}} = 2.4 \times 10^{-4} cm \quad (a)$$

となる。

したがって、電子なだれが起きるためには最低でも $2.4 \times 10^{-6} m$ の間に 26.4V の電位差が必要である。つまり最低でも電場の値が

$$\frac{W}{\lambda_e} = \frac{26.4}{2.4 \times 10^{-6}} = 11 \times 10^6 V/m \quad (b)$$

ないと電子なだれは起こりえないのである。

今回つくった比例計数管では $a = 15 \mu m = 15 \times 10^{-6} m$ 、 $b = 1.2 mm = 1.2 \times 10^{-3} m$ であるので、電場は

$$E(r) = \frac{V}{6.7r}$$

で表せる。陽極表面において、(a) の値に達するには

$$V > 6.7 \times 15 \times 10^{-6} \times 11 \times 10^6 = 1100V \quad (c)$$

あればよいことになる。

ただし (b) 式の仮定は正確ではなく、実際の電場の閾値は $10^6 V/m$ 位である。

1.3 比例計数管の性能

1.3.1 ガス増幅率

n_0 個の 1 次イオン対によって作られた全電荷 Q は

$$Q = n_0 e M \quad M = \text{平均ガス増幅率} \quad (1.7)$$

(6.1) 式より $\frac{dn}{n} = \alpha dx \Rightarrow \int_0^1 \frac{dn}{n} = \int_0^1 \alpha dx \Rightarrow \ln \frac{n_1}{n_0} = \int \alpha dx$
平均ガス増幅率; $M = \frac{n_1}{n_0}$ なので、一般に

$$\ln M = \int_a^{r_c} \alpha(r) dr \quad (1.8)$$

と書かれる。円筒形状比例計数管の電場 (1.3) を代入すると

$$\ln M = \frac{V}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \int_{E(a)}^{E(r_c)} \frac{\alpha(E)}{E} \frac{dE}{E} \quad (1.9)$$

Diethorn によると、 α と E の間の比例関係を仮定して

$$\ln M = \frac{V}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \frac{\ln 2}{\Delta V} \left[\ln \frac{V}{pa\left(\frac{b}{a}\right)} - \ln K \right] \quad (1.10)$$

1.3.2 エネルギー分解能

n_0 個の一次イオン対が引き起こした電子なだれは n_0 個ある。 i 番目の一次電子による増幅率を A_i とすると、すべてのなだれに対する平均増幅率は

$$M = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} A_i \equiv \bar{A} \quad (1.11)$$

となる、また i 番目のなだれが寄与する電荷は eA_i あるので

$$Q = n_0 e M \quad (1.12)$$

となる。 n_0 と M の両方が変動するので、入射放射線のエネルギーが同じでも Q はパルスごとにゆらぐ。誤差伝播公式を用いると、 Q の相対分散は

$$\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{n_0}}{n_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2 \quad (1.13)$$

なだれは各々独立であると仮定すると () に誤差伝播公式を適用して

$$\sigma_M^2 = \left(\frac{1}{n_0}\right)^2 \sum_{i=1}^{n_0} \sigma_{A_i}^2 = \frac{1}{n_0} \sigma_A^2 \quad (1.14)$$

となるので

$$\underbrace{\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2}_{\text{パルス波高の相対分散}} = \underbrace{\left(\frac{\sigma_{n_0}}{n_0}\right)^2}_{\text{一次イオン対のゆらぎ}} + \underbrace{\frac{1}{n_0} \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2}_{\text{単一電子の増幅率の分散}} \quad (1.15)$$

となる。

一次イオン対の分散はファノ因子を用いると

$$\sigma_{n_0}^2 = F n_0$$

となるので

$$\left(\frac{\sigma_{n_0}}{n_0}\right)^2 = \frac{F}{n_0} \quad (1.16)$$

となる。

単一電子なだれの変動は

$$\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 \cong b \quad (1.17)$$

と表す。

PR ガスでは $F = 0.17$ 、 $b = 0.50$ である。

上式を用いて () 式を書き直すと

$$\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2 = \frac{1}{n_0} (F + b) \quad (1.18)$$

$n_0 = \frac{E}{W}$ であるので

$$\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right) = \left[\frac{W (F + b)}{E} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.19)$$

となる。

エネルギー分解能の定義は相対標準偏差の 2.35 倍であたえられるので、今回のよう

に検出ガスとして PR ガスを用いた場合、5.9keV におけるエネルギー分解能の統計限界は

$$2.35 \times \left[\frac{26.4 \times (0.17 + 0.50)}{5900} \right]^{\frac{1}{2}} = 12.9\%$$

となる。

エスケープイベント

放射線と相互作用し K 殻電子を放出した Ar 原子では、外殻の電子が空いている K 殻に遷移する。このとき軌エネルギーの差の分だけのエネルギーが、(1) フォトンとして放出される、(2) 外殻の電子にエネルギーを与えて放出する (Auger 電子) かのどちらかの方法で与えられる。(2) のときは、電子がエネルギーを失うまで周りのガス分子と衝突し電離させ、その電子も検出される。(1) のときはフォトンが Ar 原子と相互作用すれば (2) のときと同様の電荷が検出されるのだが、Ar 原子と相互作用せずに検出器に吸収されることもある。このとき、フォトンのエネルギーの分が最終的に検出されずに、低いエネルギーとして計測される。

例えばアルゴンの $K\alpha$ 線によるものなら 2.94keV 低いエネルギーが計測される。

第 2 章

比例計数管の製作

2.1 設計

設計図を最後のページに示す。今回比例計数管本体を新島真空株式会社に発注した。

2.2 部品

比例計数管を作る部品としては、主に

- 本体 (ステンレス)
- ベリリウム膜
- タングステン線 (芯線)
- ハーメチックシール
- インジウム

が必要である。

今回はベリリウム膜は厚さ 50 μm のものを使い、タングステン線は直径 30 μm のものを使った。

ハーメチックシールはコパールとガラスで出来ている。ガラス部分が比例計数管本体と芯線の電位を分ける仕組みになっている。コパールはガラスと熱膨張率が等し

い金属である。

インジウムは常温で非常にやわらかい金属で、原子番号 49、融点は 429.32K と低い
ため、ホットプレートでも溶かすことができる。

2.3 組み立て

分解図後に示す。組み立ては、エポキシ系接着材の Araldite をつけた。

2.3.1 芯線張り

50g 重の張力をかけて芯線をはった。このとき、最初ハーメチックシールははんだ
がつかなかったため、内側を 1.0mm のドリルで削って、外側を紙やすりで削った。

2.3.2 ベリリウム膜

本体とベリリウムを接着剤でつけただけでは電気が流れないので、銀ペーストを
周りに少量塗った。

2.3.3 インジウムシール

本体と蓋の間隙をインジウムを使って埋めた。

2.3.4 ベーキング

比例計数管内部の不純物を除去するために、100 でベーキングを 4 日間行った。
今回真空チェンバーが CCD で使われていたため封じ切りにすることが出来なかつ
た。小型の真空釜のなかに比例計数管を入れ、釜ごと恒温槽に入れ、白金抵抗温度
計を比例計数管に付け、温度を確認しながら行った。

第 3 章

性能評価・結果・考察

3.1 印加電圧と pulse height

今回作った比例計数管を使った実験での、オシロスコープの pulse height の読みと印加電圧の関係をグラフにした。このグラフより、印加電圧を上げると指数関数的に pulse height が大きくなることがわかる。これは増幅率の式 (1.10) において増幅率が印加電圧と共に指数関数的に大きくなることによるものである。

3.2 エネルギー分解能

印加電圧 1600V で Mn の $K\alpha$ 線を当てて MCA で得られたヒストグラムを後に示す。このグラフのメインピークのエネルギーは 5.9keV であり、低エネルギー側にあるピークはエスケープイベントによるものである。

エネルギー分解能の統計的限界は前に求めたが、ここでは実験結果をもとに比例計数管のエネルギー分解能を求める。

方法としては MCA で得たヒストグラムをガウス分布にフィットして、その標準偏差から反値幅 (FWHM) を求め、エネルギー分解能を得る。ガウス関数は

$$G(x) = A \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - x_0}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

表 3.1: エネルギー分解能と印加電圧

印加電圧	エネルギー分解能
1400V	20%
1500V	19%
1600V	19%
1700V	19%
1800V	20%
1900V	25%
1950V	47%

で与えられる。

この関数が $\frac{1}{2}A$ になる $(x - x_0) = N$ は

$$\frac{1}{2} = \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{N}{\sigma} \right)^2 \right]$$

$$N^2 = -2\sigma^2 \ln \frac{1}{2} = 2\sigma^2 \ln 2 = 1.39\sigma^2$$

$$2N = FWHM = 2.35\sigma \quad (3.2)$$

となる。これより σ と x_0 がわかればエネルギー分解能

$$R = \frac{FWHM}{x_0} = \frac{2.35\sigma}{x_0} \quad (3.3)$$

を求めることが出来る。

この方法で得られたエネルギー分解能を表に示す。

この表からわかるように、1900V から極端にエネルギー分解能が悪くなる。これは、印加電圧が大きくなると電場による電子の増幅をおこす領域が増えるため、増幅のゆらぎが増えるからだと考えられる。

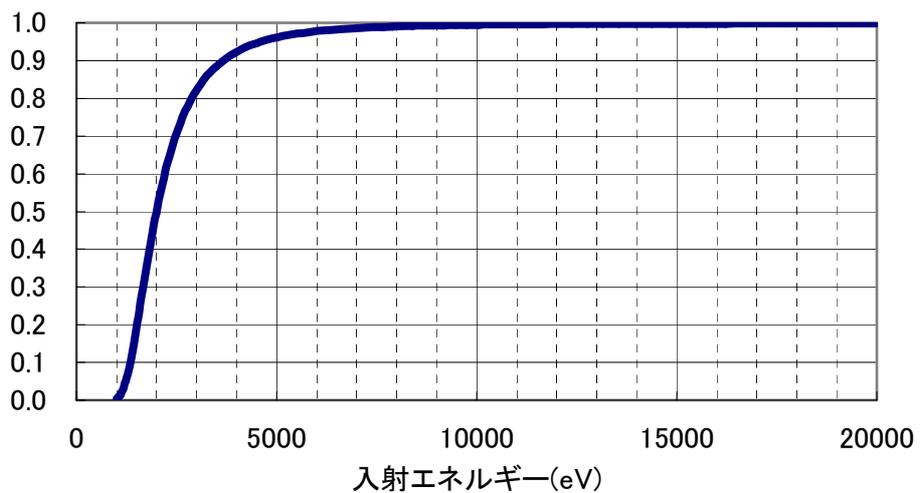
3.3 今後の課題

2003年3月現在この比例計数管は封じ切りになっていないので、使用するときにはPRガスを流しながら使わなくてはならない。使いやすくするためにも封じきり

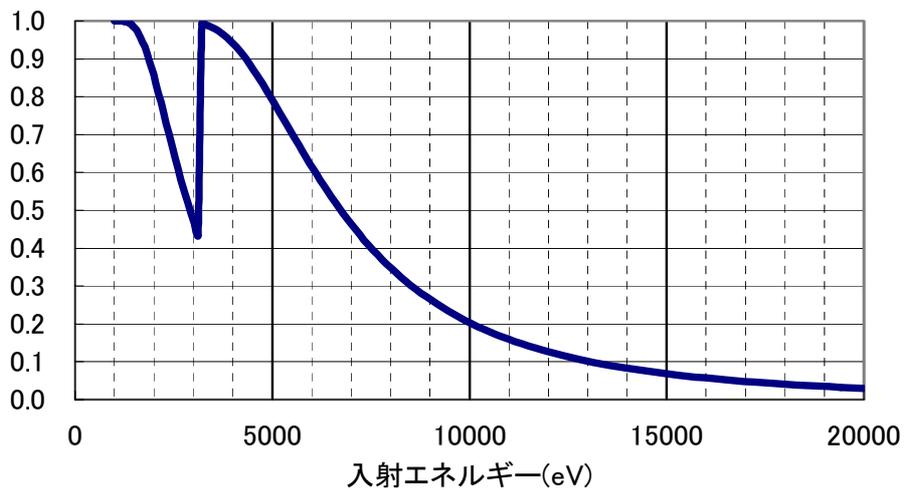
にした方が良くと思う。

今回実験で使用したメインアンプが course gain の値によっては (特に 200) かなり怪しい動作を示すので、他の装置で動かすのが賢明であると思う。他の値でも 0ch を 0keV で考え、メインピークを 5.9keV で考えてエネルギーのスケールとするとエスケープのピークの位置がずれることがある。

厚さ50 μ mのBe膜の透過率



1気圧2.4cmのPRガスの吸収率



検出効率

