

ドリフト方式位置検出器の開発

伊藤 眞^{*1}

Development of a Position-Sensitive Counter Based on Drift-Chamber Method

Shin Ito^{*1}

(Received 30 November 2001)

ABSTRACT

A position-sensitive counter with a sensitive area of $100 \times 110 \text{ mm}^2$ and a thickness of 24 mm has been developed based on the drift chamber principle. The counter is of two divisions with equal sensitive area of $50 \times 110 \text{ mm}^2$ and equal drift distance of 55 mm. In the thickness direction, the counter has multi-layered structure of 2 x 12-mm thick layers in the one division and 4 x 6-mm thick layers in the other division. Each layer is equipped with an anode wire of 10- μm or 50- μm thickness, so that the layers serve as 6 independent drift detectors. In order to study the basic counter performance in the drift direction, the energy response to 5.9-keV X rays and 8-MeV protons and the time response to 8-MeV protons have been studied by using Ar + 5% CO₂ as a counting gas. I report here, 1) the detailed wire structure of the counter, 2) the influence of the electric-field strength in the drift region and that of the drift distance upon the collection and drift time of primary electrons, and 3) the result of position-resolution measurement.

KEYWORDS

Drift Counter, Multi-Layered Drift Region, Position Resolution

*1 近畿大学原子力研究所 Atomic Energy Research Institute, Kinki University

1. はじめに

比例計数管、GM計数管などの気体検出器の開発は古く20世紀初頭にさかのぼるが、今日でも基本的な放射線検出器としての地位を少しも失っていない。1960年代CERNのG. Charpak等は、比例計数管を放射線の2次元位置分析器として極めて有用なプロポーションナルチャンバーやドリフトチャンバーに発展させた。これらは、素粒子物理学で使われる巨大な検出器をはじめ、X線構造解析、医療診断等広範な分野で大いに役立っている。Charpakは、これにより1992年ノーベル物理学賞を授けられている。

私はここ十年来、京都大学放射性同位元素総合センター等の共同研究者とともに位置感応型比例計数管の開発を行ってきた。比例領域を越えたところのガス増幅率が高い制限比例領域での検出器応答に興味を惹かれたのだが、これは特に高気圧計数ガスを用いた場合の検出器応答が複雑で理解出来ないことが多かったからである。比例計数管の動作機構は、GM計数管のそれとともに先人たちによって、徹底的に研究されてきていた。しかし、多くの先人の教科書を渉猟したが、この制限比例領域に対する満足な説明はなかった。強い空間電荷効果が著しく理解を妨げていたのである。そこで位置感応型比例計数管を自作し、比例計数管の動作機構の基礎的理解からやり直した。これは位置分解能を向上させるという本来の目的からは必然性のあることではあったが、当時は回り道をしているのではとの感を払拭できずにいた。しかし、却ってこれが功を奏し思いがけずいくつかの新たな発見につながった。特に高気圧計数ガスを用いた場合に、初期電子雲の構造変化が引金になって特定の初期電離位置の事象に対して特異的に突然高いガス増幅率の放電モードに遷移することを見出したことは大きな喜びであった。更に、位置分解能としての性能は8 keV X線に対して、有効長(97 mm)の約1/1000、100 μm (FWHM)、20-35 keVの高エネルギーX線に対して122-140 μm といった良好な位置分解能が達成された。これらの成果により、制限比例領域特有の複雑な検出器応答が見通しよく理解出来るようになったと考えている。これらについて詳しくは参考文献1-5を参照して頂きたい。

本論文では、上記の成果に立脚して初期電子のド

リフト時間から放射線の入射位置を知るドリフト方式の位置検出器を試作しその基礎的動作特性を調査した結果を報告する。この検出器は当初、単バンチモード運転の放射光マシンからの放射光X線位置検出に使用する目的で製作されたが、現在は私の中心的な研究課題である熱中性子用2次元位置検出器開発への応用を考えている。

2. ドリフト方式位置検出器の試作

Fig.1に試作した検出器全体の写真を掲げる。筐体はステンレス製で250 x 250 x 40 mm³、その中にワイヤー構造が配されている。Fig.1(b)で判る様に、ワイヤー構造中央部にステンレス製のフィールドプレートがあり、これを境にして上下に2分割されている(Fig.2に示す(a)と(b)タイプの異なるワイヤー構造からなる)。フィールドプレートにかけの高電圧用の白い碍子電極が見える。Fig.1(c)では、実験中誤って接触し緩んでしまったワイヤーが1本見える。Fig.1(f)でおおよそ判るように、ワイヤー止めの方式はコネクターを用いた半田付けであるが、いくつかの工夫がこらされている。Fig.1(g)では、電位分割用の高抵抗が見えるであろう。

Fig.2に側面から見たワイヤー配置を示す。ドリフト領域は、負電圧のかかるフィールドプレート(FP)から、9層のフィールドワイヤー(直径50 μm)層が5 mm間隔で並んでいる。1層のフィールドワイヤー層は、11本のワイヤーで構成されている。フィールドワイヤー各層は高抵抗で連結されていて、FPにかかる高負電圧を均等分割している。有感体積は図示したように24 mm厚であり、これが2つの12 mm厚層に分割されている。左右の7.5 - 8 mmは不感層となっている。

アノード構造部は、(a)と(b)の2種類のタイプを製作した。(a)は12 mm層で発生した初期電子をそのまま引き受けるもので、(b)は計数率特性を向上させるために、12 mm層を2つの6 mm厚層に分割している。つまり(a)タイプは2台の、(b)タイプは4台のドリフト検出器として作動する。アノードワイヤー周辺には、この近傍の電位分布を良好なものとするためフィールドワイヤーやフォーカシングワイヤーを設置した。また、(a)タイプのアノードワイヤーの1本(入射側)は直径10 μm とし、

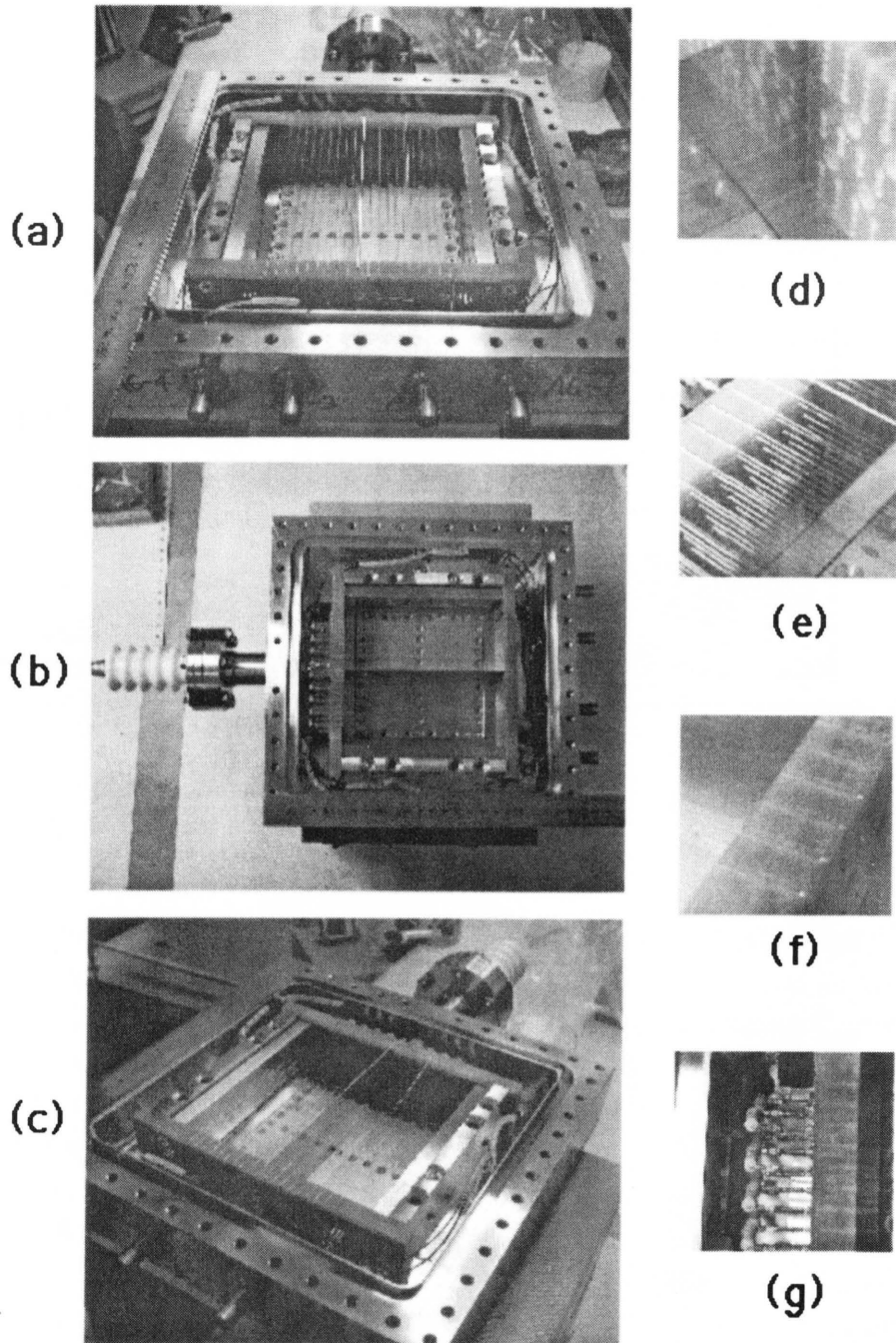


Fig. 1 試作したドリフト検出器の各部写真

他の5本のアノードワイヤーは直径 $50 \mu\text{m}$ とした。(a)と(b)タイプのドリフト検出器は、ともにドリフト距離 (FPとアノードワイヤー間の距離) が 55 mm で有感面積が約 $50 \times 110 \text{ mm}^2$ である。この2つのタイプの検出器をフィールドプレートを共通にして上下に配置し、有感面積が約 $100 \times 110 \text{ mm}^2$ の大面積化を達成した。アノードワイヤー構造部はフィールドワイヤー構造部に組み込む方式にして、アノ-

ドワイヤー構造部のみ取り外せるようにした。これはアノードワイヤーの張り替え変更を容易に行うためである。フィールドワイヤー数はアノードワイヤー構造部を含めて(a)タイプで105本、(b)タイプで109本、フォーカシングワイヤー数は(a)タイプで3本、(b)タイプで5本、アノードワイヤー数は(a)タイプで2本、(b)タイプで4本となり、ワイヤー総数228本である。

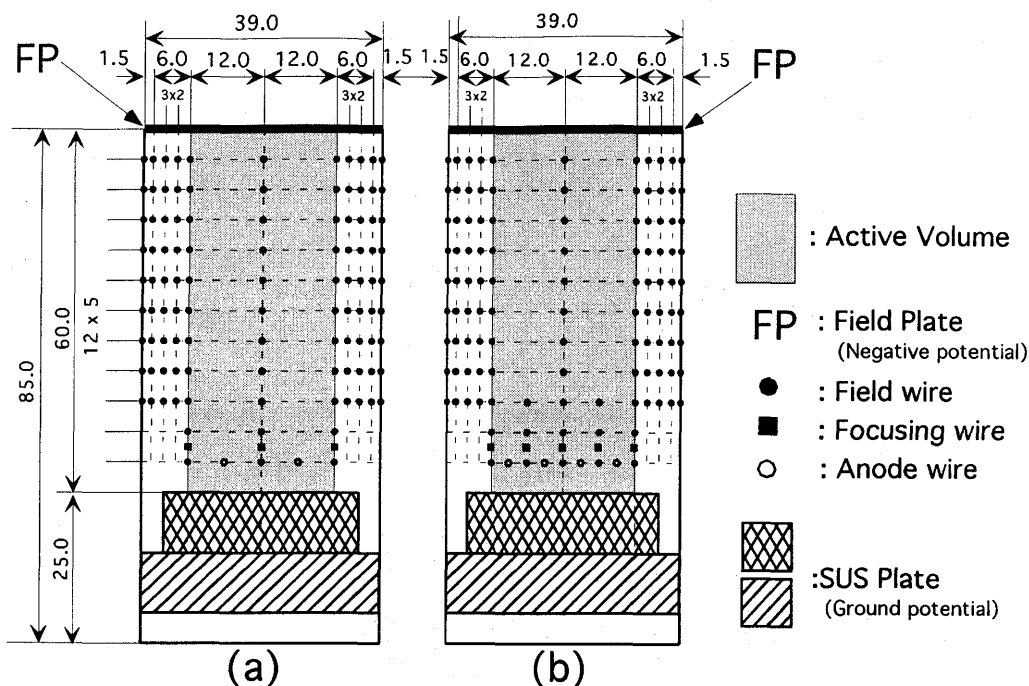


Fig. 2 ワイヤ配置

Fig. 1の背面に見えるのは、陽子入射専用の真鍮製窓である。12.5 μm 厚のカプトン膜を2枚の真鍮板にサンドイッチし、検出器内部と外界を密封している。この真鍮板に、10 mm 間隔で2次的に0.5 - 2 mm ϕ の入射孔を開けてある。中央部のみは、約4 mm ϕ の入射孔を開けた。Fig. 1(a)、(b)、(c)にはこの約4.0 mm ϕ の入射孔が見える。これらの入射孔を陽子ビームを通過させることにより2次的に検出器性能をスキャン出来る。単なる大面積カプトン膜では検出器内部の高気圧に耐えられないのでこの様な窓を製作した。X線入射の場合は、窓は130 x 130 mm 2 、5 mm 厚ベリリウム圧延板を入射側及び背面側両面に配した。

筐体（特に窓部分）との絶縁を確保するため、入射面窓とフィールドワイヤ構造間、及び背面窓とフィールドワイヤ構造間に125 μm 厚のテフロンシートを挿入し、放電を防止している。したがってX線入射の場合は5 mm 厚ベリリウム、陽子入射の場合は12.5 μm 厚カプトン膜を透過し、両者は更に125 μm 厚のテフロンシート、7.5 - 8 mm 厚の不感層を通過して、24 mm 厚有感体積に入ることになる。

3. X線に対するエネルギー応答

まず ^{55}Fe 線源からの5.9 keV X線を用いて、本検出器のエネルギー応答を調査した。12 mm 厚層の結果をFig. 3に示す。A12-1は12 mm 厚層のうちアノードワイヤの芯線直径10 μm の方であり、X線入射側に配してある。A12-2は芯線直径50 μm の12 mm 厚層である。計数ガスは1.5気圧Ar + 5% CO $_2$ であり、ドリフト距離 $X = 15$ mmの位置からX線を入射させた。A12-1、A12-2のアノードワイヤにかかる電圧を固定して、フィールドプレート(FP)にかかる電圧を変化させて波高分布を測定した。Fig. 3から判るようにエネルギー応答は極めて良好である。各スペクトルに光電ピークとエスケープピークが明瞭に観測されている。フィールドプレート電圧を増加させると、A12-1、A12-2ともにガス増幅率が増加している。単位時間当たりのイベント数はほぼ一定であった。このガス増幅率の増加が「フィールドプレート電圧を上昇させることによって初期電子数(約200)を有効的に収集できるために生じている」とは考えていない。この様な初期電子ドリフト過程での電子損失が大きい場合には、光電ピークとエスケ

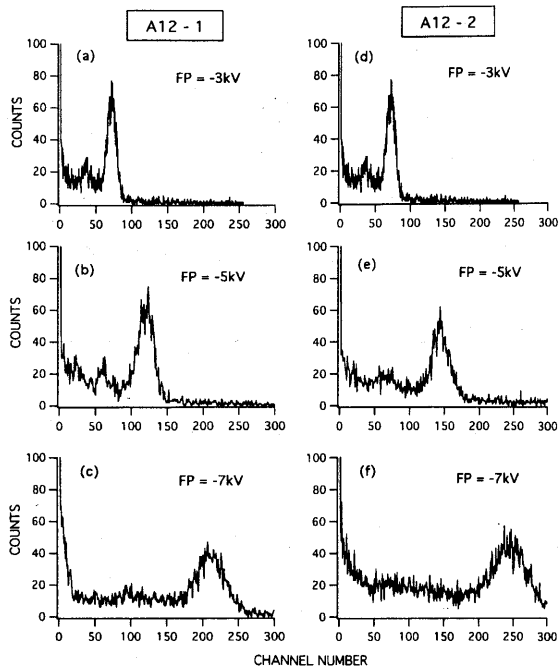


Fig. 3 5.9-keV X線に対する Energy Response. Field Plate (FP) 電圧依存性 (A12-1HV=1.2kV, A12-2HV=1.8kV, X=15 mm, 1.5-atm. Ar+5%CO₂)

ープピークは明瞭には観測出来ない可能性が高いからである。現在の所、フィールドプレート電圧を増加することによって、負の電位がアノードワイヤー構造上部に侵入しアノードワイヤー近傍の電界強度が変化するためと考えている。しかし、初期電子ドリフト過程での電子損失がフィールドプレート電圧に常に一定の割合で依存すれば、観測結果を説明出来る。この様な電子損失があったとしてもガス増幅率としては十分大きくすることが出来、有効な時間信号が得られることが判った。

4. 陽子ビームに対するエネルギー応答

京都大学理学部タンデムバンデグラフ加速器から得られる 8 MeV 陽子ビームを使用して、上記ドリフト検出器の性能調査を行った。陽子ビームはダイレクトビームを適当にコリメートした後、12.5 μm 厚のカプトン膜を通して大気へ導出し、更にカプトン膜直後で 0.1 mm^φ のコリメータを通した。検出器はカプトン膜から約 25 - 35 mm 離れた大気中に設置した。検出器を通過したビームを PIPS 検出器でとらえている。

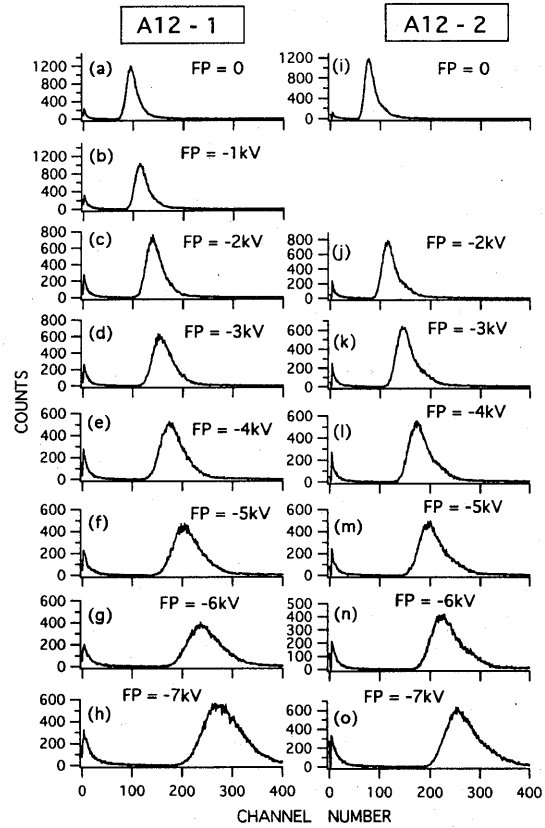


Fig. 4 8-MeV Proton に対する Energy Response. Field Plate (FP) 電圧依存性 (A12-1HV=1.1kV, A12-2HV=1.54kV, X=15 mm, 1.5-atm. Ar+5%CO₂)

Fig. 4 に Fig. 3 と同様の陽子ビームに対するエネルギー応答を示す。ガス増幅率を 5.9keV X線の場合と比較することによって、本実験条件 (125 μm 厚のテフロンシートを主とするエネルギーロス) での 12 mm 層での陽子のエネルギーロスは、約 23keV であり、この程度の X線が検出された場合の応答をほぼ反映している。A12-1、A12-2 ともに、陽子ビームに対してもエネルギー応答は良好と考えている。十分なガス増幅率を確保出来、しっかりしたピーク構造を形成する。スペクトラムシェイプも A12-1 と A12-2 間に大きな差異は無い。ガス増幅率のフィールドプレート電圧依存性は 5.9keV X線の場合 (Fig. 3) と同様であり、解釈も同じと考えている。ただし、FP = 0 でもしっかりしたピークが A12-1、A12-2 ともに出現することは、今後の課題ではあるが、本研究主目的からははずれると思われたので詳しくは調査しなかった。

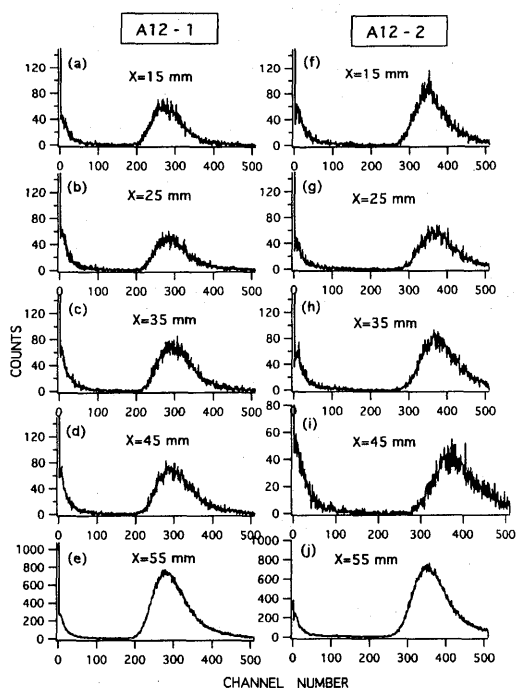


Fig. 5 8-MeV Protonに対する Energy Response. Drift Distance (X) 依存性 (A12-1HV=1.1kV, A12-2HV=1.8kV, FP=-6.5kV, 1.5-atm. Ar+5%CO₂)

Fig. 5 にエネルギー応答のドリフト距離 (X) 依存性を示した。FP = -6.5 kV の条件のもとで、X = 15 - 55 mm の範囲で A12-1、A12-2 の波高分布を測定した。この結果、A12-1、A12-2 とともにガス増幅率がドリフト距離にほとんど依存せず一定であるという極めて良好な検出器特性が得られた。このことは初期電子数を 55 mm までのドリフト過程で損失することなしに掃引していることを証明していて、§ 3 で述べた「フィールドプレート電圧を上昇させることによって初期電子数 (約 200) を有効的に収集できる」という考えがやはり成立していないことを強く示唆している。なぜならば、フィールドプレート電圧の変化によって初期電子数損失が起こるならば、ドリフト距離の変化によってもこの損失が起こると考えられるからである。

Fig. 6 に相対的検出効率のフィールドプレート電圧、ドリフト距離依存性の調査結果を示す。これらは、検出されたイベントに対して A12-1、A12-2 とともに、フィールドプレート電圧、ドリフト距離依存性はほとんど無く、初期電子が生成されれば確実に

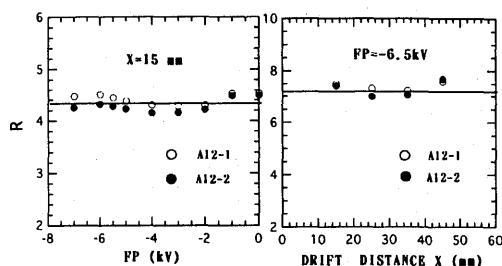


Fig. 6 検出効率 (相対的) の Field Plate 電圧 (FP) 及び Drift Distance (X) 依存性. (8-MeV Proton, 1.5-atm. Ar+5%CO₂, A12-1HV=1.1kV, A12-2HV=1.8kV)

検出できることを示している。フィールドプレート電圧依存性 (左図) とドリフト距離依存性 (右図) で $R = (\text{A12-1, A12-2 のピーク面積} / \text{PIPS 検出器で測定されたドリフト検出器を通過した陽子数})$ の値が異なるのは、両者の測定でドリフト検出器のビームに対するアラインメントが異なるためである。つまり、PIPS 検出器は入射面及び背面の真鍮窓にある孔を通過した陽子を検出するため、例え同じ数の陽子がドリフト検出器内部に入射してもアラインメントによって R は変化する。しかし、本測定では R の絶対値は本質的ではない。また、ドリフト距離依存性 (右図) で X = 55 mm のデータが無いのは、X = 55 mm ではフィールドプレートが § 2 で説明した様に (a)、(b) タイプに共通に存在し、ドリフト検出器に入射した陽子は (a)、(b) タイプ両方に侵入する。このため X = 55 mm に対応する正しい R は求められない。(Fig. 12 で説明するように、X = 55 mm ではこのフィールドプレートの存在によって X = 55 mm 以上のイベントが存在しないため、位置スペクトルに鋭いカットオフが出現し、ドリフト検出器固有の位置分解能評価に利用出来る。)

Fig. 7 に 3 気圧 Ar + 5% CO₂ の時のエネルギー応答を掲げた。スペクトラムシェイプは、Fig. 4 (1.5 気圧 Ar + 5% CO₂) と同様に A12-1 と A12-2 間に大きな差異は無いと言って良いだろう。ガス増幅率は十分確保できることが判ったが、フィールドプレート電圧が -11 kV までしかかからず、それ以上では放電が起こり絶縁特性の向上が課題として残った。

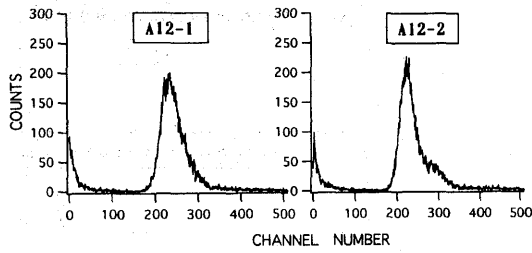


Fig. 7 3-atm. Ar+5%CO₂ の場合の Energy Response. (8-MeV Proton, X=15 mm, A12-1HV =1.25kV, A12-2HV=2.02kV, FP=-11kV)

5. 陽子ビームに対する時間応答

デジタルオシロスコープを用いて、製作したドリフト検出器からの時間信号を詳しく観測した。ドリフト検出器を通過した陽子を PIPS 検出器でとらえ、事象スタート時間信号を得ている。

Fig. 8 にフィールドプレート電圧 (FP) を変化させた時の、12 mm 厚層からの時間信号波形観測結果を掲げた。A12-1 (アノード芯線 10 μm^φ) からの信号を A12-1T、A12-2 (アノード芯線 50 μm^φ) からの信号を A12-2T としている。この結果から、A12-2T のほうが A12-1T よりも約 2 倍ほど波高の立上りが遅いことが判った。A12-1 層と A12-2 層とで初期電子雲の時間分布にこのような差異があることは考えにくい。また、6 mm 厚層 (アノード芯線 50 μm^φ) からの時間信号波形観測でも A12-2T と同様の立上りの遅い信号が観測されている。これらのことから、この立上りの違いはアノード芯線直径の差異による放電モードの違いに起因すると考えられる。ドリフト検出器の時間信号としては A12-1T の様な立上りの早い方が好ましく、アノード芯線直径は 10 μm とすべきであることが判った。更に、FP = -1kV では FP = -6kV と比較して、A12-1T、A12-2T ともに立上りが遅くなっている。このことは FP が小さい時には、初期電子雲の時間分布が広がることを示しているようにも見える。しかし、FP = -2kV では既に FP = -6kV とほぼ同じ立上がりであること、及びドリフト距離を大きくしても FP = -6kV では立上がりは変化しないことを確認しているので、少なくとも FP = -6kV では初期電子雲の時間分布の効果は無視できると考えている。

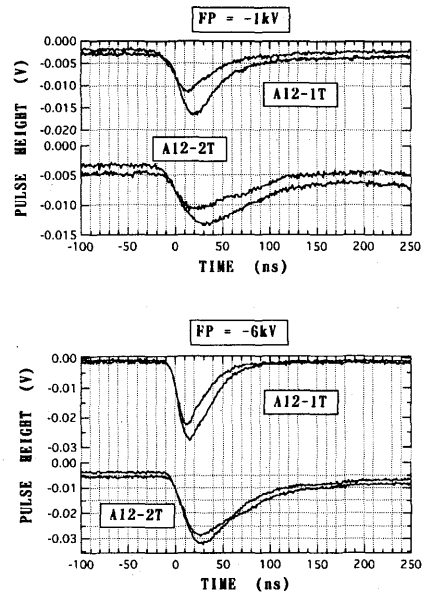


Fig. 8 Field Plate 電圧 FP=-1kV 及び -6kV の場合の波形観測結果 (8-MeV Proton, A12-1HV=1.1KV, A12-2HV=1.54KV, X=15 mm, 1.5-atm. Ar+5%CO₂)

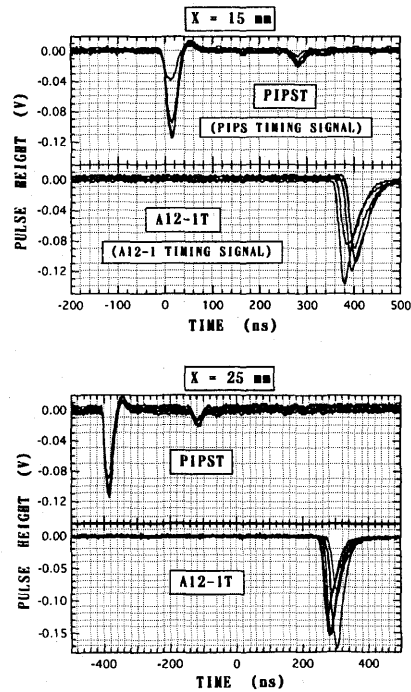


Fig. 9 Drift Distance X=15 及び 25 mm の場合の波形観測結果 (8-MeV Proton, A12-1HV=1.1KV, A12-2HV=1.8KV, FP=-6.5KV, 1.5-atm. Ar+5%CO₂)

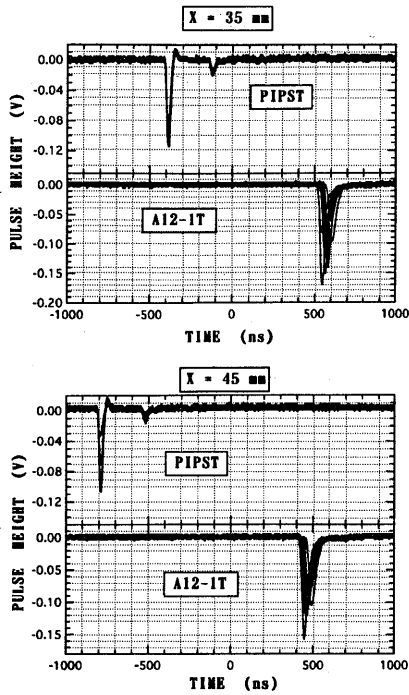


Fig. 10 Drift Distance X=35 及び 45 mm の場合の波形観測結果 (測定条件は Fig. 9 と同じ)

Fig. 9、Fig. 10、Fig. 11 にドリフト距離 (X) を変化した場合の A12-1T の波形観測結果を掲げている。PIPS 検出器からの時間信号 (PIPST) をトリガーにして A12-1T を観測している。両信号の時間差が、X によって変化する様子が良く理解出来る。同時に A12-1T の時間的ふらつき (Time Jitter) についてもおおよそ把握できる。(デジタルオシロスコープによる観測は、多くのパルスの幾つかをランダムに取り込み表示したもので、表示されていないパルスが多くあることには注意が必要であるが、Fig. 8 - 11 に表示した波形はほぼ代表的なものである。) また、X = 15 - 45 mm までの A12-1T の波高を見れば判る通り、ドリフト距離が大きくなっても波高は減衰しないという本検出器のドリフト検出器としての良好な性能を実証している。これは Fig. 5 に示したエネルギー応答の結果と一致する。X = 55 mm での A12-1T の波高が小さく見えるが Fig. 5 のデータから、これはデジタルオシロスコープが偶然に小さいパルスのみを取り込んだためである。

Fig. 12 上段に PIPST をスタート信号とし、A12-1T をストップ信号として TAC を用いて得た時間差 (位

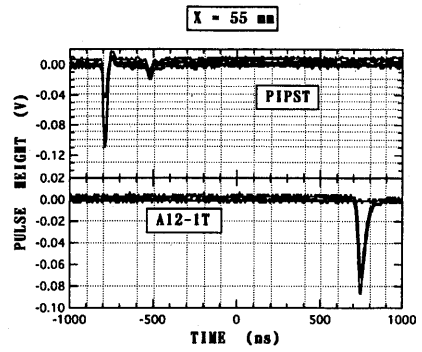


Fig. 11 Drift Distance X=55 mm の場合の波形観測結果 (測定条件は Fig. 9 と同じ)

置) スペクトルを示す。TAC のレンジは 2 μsec であり、1.95 nsec/channel となっている。耐計数率特性を調査した結果少なくとも 10^4 cps までは時間スペクトルに変化はなかった。デジタルオシロスコープによる観測でも A12-1T 信号に特に歪んだ信号は存在せず良好な耐計数率特性を確認した。ドリフト距離 X に対するピーク位置の変化は良い比例性を示し、位置校正値として $67.9 \mu\text{m}/\text{channel}$ が得られた。ドリフト距離 10 mm の変化に対して、時間変化 287.2 nsec となり、これから初期電子のドリフト速度を求めると $3.5 \text{ cm}/\mu\text{sec}$ となる。この値は文献値 $3.7 \text{ cm}/\mu\text{sec}$ と良く一致する。また、陽子ビームに対する位置 (時間) 分解能を評価すると、 0.82 mm (FWHM) (23.4 nsec) となる。しかし、この位置分解能は検出器固有のものではない。陽子線が細束化されていないことによる入射位置のバラツキが圧倒的にこの位置分解能を支配している。この入射位置のバラツキは、(1) 加速器との真空を切っている $12.5 \mu\text{m}$ 厚のカプトン膜、(2) 約 25 - 35 mm 厚の大気、(3) 検出器窓に使用している $12.5 \mu\text{m}$ 厚のカプトン膜、(4) 検出器内部の絶縁用 $125 \mu\text{m}$ 厚のテフロンシートによる小角散乱によってビームが広がることに起因している。特に (4) の効果は大きいと思われる。

検出器固有の位置分解能が 0.82 mm よりはるかに小さいことを示すデータを Fig. 12 下段に示す。上段のスペクトルで P5 のピーク (X = 55 mm) と P4 のピーク (X = 45 mm) を重ねてあるが、P5 のピークに鋭いカットオフが見られる。これはフィールドプレートの存在によって X = 55 mm 以上のイベントが存在しないためである。(§ 2 で説明した様にフィールドプレートが (a)、(b) タイプに共通に存在し、

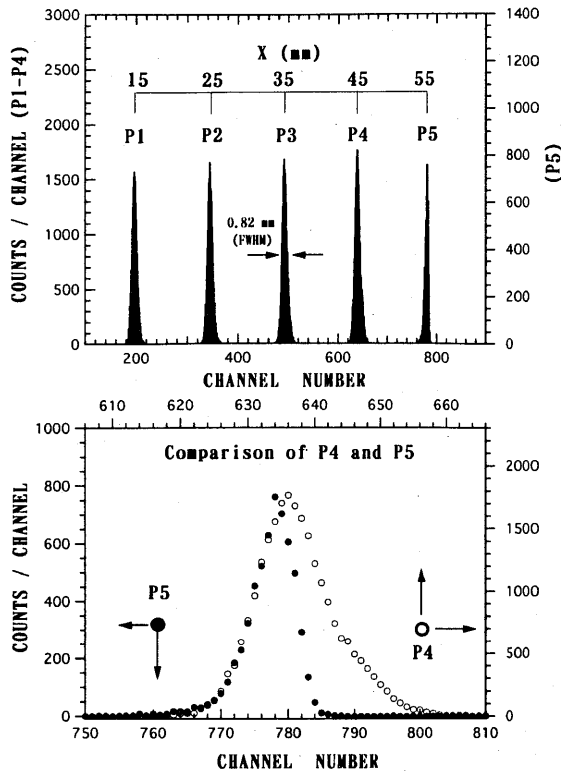


Fig. 12 位置 (時間) スペクトル
(測定条件は Fig. 9 と同じ, 1.95 ns/Channel)

X = 55 mm でドリフト検出器に入射した陽子は (a)、(b) タイプ両方に侵入する。) したがって、P5 スペクトルの高位置側半分のプロファイルがこの検出器の固有の位置分解能を反映していて、おおよそ 0.3 mm の位置分解能は現状でも達成されている。更に、時間信号処理回路を調整すれば確実に位置分解能が向上することは判っているので、0.2 mm 以下の位置分解能は十分可能である。

6. まとめ

ドリフト距離 55 mm で有感厚みが 24 mm の検出器 2 台を一体化した有感面積 $100 \times 110 \text{ mm}^2$ の大面積位置検出器を試作した。有感厚みが 24 mm の有感厚み層は $4 \times 6 \text{ mm}$ 層、或いは $2 \times 12 \text{ mm}$ 層に多層化されていて、それぞれ 4 台、2 台の検出器として独立に作動することが示された。X 線、陽子線を用いた基礎特性調査の結果、エネルギー応答性、時間応答性は良好であり有感体積での平坦な電位分布が実現されていることが判った。位置分解能は 0.3 mm 程度であったが、ビームコリメーション、エレクトロニクス調整によって更に改良出来ると考えられる。

現在近大原子炉において、これから大きく発展する高度中性子利用科学に役立つため、熱中性子用 1 次元位置感応型比例計数管の開発を行っている。既に良好な位置分解能を得ることに成功しているの、更に 2 次元位置検出器の開発に進む予定である。本研究の成果はこのための貴重な技術的ノウハウや基礎データを提供すると考えている。

本論文は平成 9-11 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B) (2)、課題番号 09559010、研究代表者 伊藤眞) を受け遂行された研究で得られたデータの一部をまとめたものである。加速器実験では京大放射性同位元素総合センター戸崎充男氏、福井工業高等専門学校前多信博氏、データ収集電子回路系ではセイコー・イーゲーアンドジー社小野浩氏にご協力を頂いた。ここに深く感謝致します。

REFERENCES

1. S. Ito, M. Tosaki, and N. Maeda;
Effect of self-induced space charge in a high pressure position-sensitive proportional counter, Nucl. Instr. and Meth. **A368** (1996) 738 - 744.
2. S. Ito, M. Tosaki, N. Maeda, R. Katano, and Y. Isozumi; Gas amplification of proportional and SQS modes observed as a function of the radial distance of the position of primary ionization, Nucl. Instr. and Meth. **A348** (1994) 297 - 302.
3. S. Ito, R. Katano, and Y. Isozumi;
Evidence for the effect of electron diffusion on gas amplification process in gas-filled wire counter, Nucl. Instr. and Meth. **A324** (1993) 141 - 144.
4. S. Ito, M. Tosaki, N. Maeda, N. Takahashi, R. Katano, and Y. Isozumi; Application of a pressurized position-sensitive proportional counter to x-ray measurement, Nucl. Instr. and Meth. **B75** (1993) 112 - 115.
5. S. Ito, M. Tosaki, N. Maeda, R. Katano, and Y. Isozumi; Behavior of SQS mode observed as a function of the radial distance of the position of primary ionization, Nucl. Instr. and Meth. **A329** (1993) 564 - 566.