

JAERI-M  
84-145

重イオン用ガス検出器における  
CF<sub>4</sub>ガスの特性

1984年8月

長野 賢三\*・杉山 康治・竹腰 英子

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, -Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 日立高速印刷株式会社

重イオン用ガス検出器における $\text{CF}_4$ ガスの特性

日本原子力研究所東海研究所物理部  
長野 賢三\*・杉山 康治・竹腰 英子

(1984年7月19日受理)

ENMA焦点面検出器を構成している電離箱および比例計数管における $\text{CF}_4$ ガスの特性を5 MeV  $\alpha$ 粒子および高エネルギー重イオン粒子を用いて検討した。さらにアバランシェ・カウンターにおける $\text{CF}_4$ ガスの特性を得るために、小型平行平板アバランシェ・カウンター(PPAC)およびこの変形型のものを製作し、5 MeV- $\alpha$ 粒子を用いて、アバランシェ電子のパルス波高、ガス破壊電圧、時間分解能を測定した。どの型のPPACに対しても、300 psecの時間分解能を得た。他のカウンターガス特性との比較において、電離箱、比例計数管、アバランシェ・カウンターにおける $\text{CF}_4$ ガスの特性のまとめを行った。

---

\* 昭和58年度原研特別研究生(筑波大学物理系)

Properties of  $CF_4$  Gas in Gas Detectors for Heavy Ions

Kenzo NAGANO<sup>\*</sup>, Yasuharu SUGIYAMA and Eiko TAKEKOSHI

Department of Physics,  
Tokai Research Establishment, JAERI

( Received July 19, 1984 )

Properties of  $CF_4$  gas in an ionization chamber and proportional counters constituting the ENMA focal-plane detector were examined with 5 MeV  $\alpha$  particles and high energy heavy ion particles. Besides, in order to obtain those in avalanche counters, a small-sized parallel plate avalanche counter (PPAC) and some modified PPACs were constructed, and pulse height of avalanche electrons, breakdown voltage of the gas and time resolution were measured with 5 MeV  $\alpha$  particles. A time resolution of 300 psec was obtained for each type of PPACs. Properties of  $CF_4$  gas in the ionization chamber, the proportional counter and the avalanche counters are summarized, compared with properties of other counter gases.

Keywords; Nuclear Instrument, Gas Counter, Ionization Chamber, Proportional Counter, Parallel Plate Avalanche Counter, Counter Gas

---

\* JAERI Scholarship Fellow in the fiscal year of 1983 from the University of Tsukuba

## 目 次

1. 序 .....	1
2. ENMA焦点面検出器におけるCF <sub>4</sub> ガスの特性 .....	1
2.1 5 MeV α線による測定 .....	2
2.2 高エネルギー重イオン粒子による測定 .....	3
3. 平行平板アバランシェ・カウンター(PPAC)におけるCF <sub>4</sub> ガスの特性 .....	5
3.1 アバランシェ・電子のパルス波高 .....	5
3.2 ガス破壊電圧 .....	6
3.3 時間分解能 .....	7
4. 変形型PPACの特性 .....	8
4.1 芯線型陽極・PPAC .....	8
4.2 メッシュ型陰極・芯線型陽極・PPAC .....	9
5. 議 論 .....	9
参考文献 .....	10

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Properties of $CF_4$ gas in the ENMA focal-plane detector .....	1
2.1. Measurements with 5 MeV $\alpha$ particles .....	2
2.2. Measurements with high energy heavy ion particles .....	3
3. Properties of $CF_4$ in a parallel plate avalanche counter (PPAC) .....	5
3.1. Pulse height of avalanche electrons .....	5
3.2. Breakdown voltage of the gas .....	6
3.3. Time resolution .....	7
4. Characteristics of modified PPACs .....	8
4.1. PPAC with wire-anode .....	8
4.2. PPAC with mesh-cathode and wire-anode .....	9
5. Discussions .....	9
References .....	10

## 1. 序

重イオン核物理研究において、ガス検出器は欠くことの出来ない重要な検出器である。そして、その発展は重イオン核物理の発展と密接に関わっている。一方、ガス検出器の場合には、検出器の構造と共に使用するガスの種類も重要な要素の1つである。目的と検出器の構造を考慮してガスの種類を選択する必要がある。従って、その使用にあたっては、検出器の性能と共にガスの特性をよく知っておく必要がある。

本報告では、前報告<sup>1),2),3)</sup>に述べられているメタン( $\text{CH}_4$ )とイソブタン( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )ガスによる検出器の性能とガス特性の結果を踏まえて、テトラフルオロメタン( $\text{CF}_4$ )による検出器の性能とガス特性を検討した。フッ化炭素物は比較的大きな電子捕獲断面積を持つが、反面、電子流動速度も比較的大きい。また、 $\text{CF}_4$ ガスは不燃性であり取扱上安全であるという利点がある<sup>4)</sup>。本報告は、このような $\text{CF}_4$ ガスによるENMA焦点面検出器および小型のアバランシェ・カウンターに対する性能とガスの特性の測定結果のまとめである。

## 2. ENMA焦点面検出器における $\text{CF}_4$ ガスの特性

JAERI-重イオン磁気スペクトルグラフ“ENMA”<sup>5)</sup>の焦点面検出器の基礎的特性はすでに報告されている<sup>1)</sup>。そして、この焦点面検出器は極めて安定に動作し、重イオン核反応の精密測定に常時使用中である。

当初、カウンターガスとしては、入射窓を出来るだけ薄い膜を使用したいために、低圧でエネルギー損失の大きいイソブタン( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )を用いていた。この間、可燃性ガス $\text{C}_4\text{H}_{10}$ を大量に使用するために、ガス系の“取扱マニュアル”を作成し、誤操作による薄膜窓の破損がないように、また、ガス系のリークがないように、さらに、ガス系の排気口は“屋外に強制的に排気しうる特殊ガス排気系”に接続して、常に安全に注意を払っていた。

1982年9月~12月に亘り、米国の2ヶ所の研究所において、焦点面検出器に使用していた $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ガスの爆発事故が生じた。そして、その後の処置の1つとして $\text{C}_4\text{H}_{10}$ を不燃性のテトラフルオロメタン( $\text{CF}_4$ )に切換えを行って、使用試験中である由の報告を得た<sup>4)</sup>。

ENMA焦点面検出器についても、今後長く安全使用しうるガスがあれば、交換したいと考えていた矢先であったので1983年3月に $\text{C}_4\text{H}_{10}$ から $\text{CF}_4$ に切換えを行った。以後、現在に至るまで、使用試験を行い重イオン核反応測定に充分使用しうるガスであることを確認した。

本報告では、 $\text{CF}_4$ ガスによる焦点面検出器の性能と同時に、 $\text{CF}_4$ ガスの基礎的特性を調べることを主な目的としている。

ENMA焦点面検出器の構造を図1に示す。詳細な説明は参考文献<sup>1)</sup>にゆずり、ここでは簡単に記す。平行平板型の電離箱(C;陰極, G1;第1グリッド, G2;第2グリッド,  $\Delta E_1 + \Delta E_2$  および  $\Delta E_{r1} + \Delta E_{r2} + \Delta E_{r3}$ ;陽極電極)と3個の比例計数管(P1, P2, P3)か

## 1. 序

重イオン核物理研究において、ガス検出器は欠くことの出来ない重要な検出器である。そして、その発展は重イオン核物理の発展と密接に関わっている。一方、ガス検出器の場合には、検出器の構造と共に使用するガスの種類も重要な要素の1つである。目的と検出器の構造を考慮してガスの種類を選択する必要がある。従って、その使用にあたっては、検出器の性能と共にガスの特性をよく知っておく必要がある。

本報告では、前報告<sup>1),2),3)</sup>に述べられているメタン( $\text{CH}_4$ )とイソブタン( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )ガスによる検出器の性能とガス特性の結果を踏まえて、テトラフルオロメタン( $\text{CF}_4$ )による検出器の性能とガス特性を検討した。フッ化炭素物は比較的大きな電子捕獲断面積を持つが、反面、電子流動速度も比較的大きい。また、 $\text{CF}_4$ ガスは不燃性であり取扱上安全であるという利点がある<sup>4)</sup>。本報告は、このような $\text{CF}_4$ ガスによるENMA焦点面検出器および小型のアバランシェ・カウンターに対する性能とガスの特性の測定結果のまとめである。

## 2. ENMA焦点面検出器における $\text{CF}_4$ ガスの特性

JAERI-重イオン磁気スペクトルグラフ“ENMA”<sup>5)</sup>の焦点面検出器の基礎的特性はすでに報告されている<sup>1)</sup>。そして、この焦点面検出器は極めて安定に動作し、重イオン核反応の精密測定に常時使用中である。

当初、カウンターガスとしては、入射窓を出来るだけ薄い膜を使用したいために、低圧でエネルギー損失の大きいイソブタン( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )を用いていた。この間、可燃性ガス $\text{C}_4\text{H}_{10}$ を大量に使用するために、ガス系の“取扱マニュアル”を作成し、誤操作による薄膜窓の破損がないように、また、ガス系のリークがないように、さらに、ガス系の排気口は“屋外に強制的に排気しうる特殊ガス排気系”に接続して、常に安全に注意を払っていた。

1982年9月～12月に亘り、米国の2ヶ所の研究所において、焦点面検出器に使用していた $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ガスの爆発事故が生じた。そして、その後の処置の1つとして $\text{C}_4\text{H}_{10}$ を不燃性のテトラフルオロメタン( $\text{CF}_4$ )に切換えを行って、使用試験中である由の報告を得た<sup>4)</sup>。

ENMA焦点面検出器についても、今後長く安全使用しうるガスがあれば、交換したいと考えていた矢先であったので1983年3月に $\text{C}_4\text{H}_{10}$ から $\text{CF}_4$ に切換えを行った。以後、現在に至るまで、使用試験を行い重イオン核反応測定に充分使用しうるガスであることを確認した。

本報告では、 $\text{CF}_4$ ガスによる焦点面検出器の性能と同時に、 $\text{CF}_4$ ガスの基礎的特性を調べることを主な目的としている。

ENMA焦点面検出器の構造を図1に示す。詳細な説明は参考文献<sup>1)</sup>にゆずり、ここでは簡単に記す。平行平板型の電離箱(C;陰極, G1;第1グリッド, G2;第2グリッド,  $\Delta E_1 + \Delta E_2$  および  $\Delta E_{r1} + \Delta E_{r2} + \Delta E_{r3}$ ;陽極電極)と3個の比例計数管(P1, P2, P3)か



ら構成されている。CとG1は十分に大きな静電容量のコンデンサーによりAC結合させ、いわゆるファラデーケージ型とし、陰極からE(全エネルギー)出力を取り出す。G2はFrisch gridである。 $\Delta E_1$ 、 $\Delta E_2$ からはそれぞれに、または、まとめてエネルギー損失出力を取り出す。P1、P2、P3は陽極より少しG2側に近く配置し、P1、P2は位置カウンター、P3はカウンターを通りぬけたイオンを識別するために用いる。カウンター全体の大きさは、上下の面が長辺76 cm、短辺が54.5 cmの平行四辺形(長辺間の距離38.5 cm、長辺と短辺のなす角 $45^\circ$ )であり、高さが17 cmである。

カウンターの有効領域は焦点面に沿っての長さが46 cm、奥行54.5 cm、高さが7 cmである。

## 2.1 5 MeV $\alpha$ 線による測定

5 MeV  $\alpha$ 線源( $^{241}\text{Am}-\alpha$ )を用いて、図1に示す焦点面検出器における電離箱領域での $\text{CF}_4$ ガス特性を調べた。これは電離箱の陽極とG2(Frisch grid)間の電場の強さ $E_{A,FG}$ と $\Delta E_1$ パルス波高の関係を実用的な立場から調べることを目的としたものであるが、一般的に、 $\text{CF}_4$ ガスの電離箱領域での特性を示していることになる。測定はENMA磁気スペクトログラフを用いて、実際の使用と同じ測定条件で行った。ガス圧はそれぞれ、7.5, 11.3, 15, 30, 45 torrであり、陰極電圧は-400 V、G2(Frisch grid)は信号系のクリーン・アースに接続している。図2には $\Delta E_1$ パルス波高を $E_{A,FG}/P$ ( $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{torr}^{-1}$ )の函数として示してある。各ガス圧に対する $E_{C,FG}/P$ ( $E_{C,FG}$ は陰極とFrisch grid間の電場)は1~6の範囲にあった。30 torrにおいて陰極電圧を-300 Vにしても $\Delta E_1$ の特性に変化はなかった。

30 torrと45 torrのデータにおいて、 $E/P < 2$ における $\Delta E_1$ のパルス波高の下降は、電子が電離箱のG2(Frisch grid)を効率よく通過して陽極へと向うために必要な $E_{A,FG}$ の値に達していないためである。

11.3, 15, 30, 45 torrのデータにおいて、 $E/P = 8$ 付近が $\Delta E_1$ パルス波高のプラトー領域であると言える。従って、検出器の実用的な面では、各ガス圧毎に $E/P = 8$ になるように電離箱の陽極電圧を選ぶことが必要であり、また、そうすることにより最良条件で安定に検出器を動作させることが出来る。

一方、各ガス圧に対するカーブは、電子付着性である $\text{CF}_4$ ガスのTownsendの第1電離係数( $\alpha$ )と電子の付着係数( $\eta$ )から説明することが出来る。 $E/P$ の値が比較的大きい領域( $E/P > 40$ )では、 $\text{CF}_4$ ガスに対する $(\alpha - \eta)/P$ の値が測定されている。これを図3に示す。 $\alpha/P$ の測定値は●印で、 $(\alpha - \eta)/P$ の測定値は○印で、 $\eta/P$ の測定値は▲印で示されている。<sup>7,8)</sup>(図3の他の説明は3.2ガスの破壊電圧で行う。) 図3のカーブでは、 $\text{CF}_4$ に対しては $E/P = 45$ において $(\alpha - \eta)/P = 0$ であり、ここでガス増幅率が1であることを意味している。図2の各ガス圧に対するカーブでは、 $2 < E/P < 70$ の領域の $(\alpha - \eta)/P$ 値の相対的な変化がみられる。ガス圧11.3 torrのカーブでは、 $E/P = 45$ と $E/P = 8$ の所で $\Delta E_1$ パルス波高がほぼ同じである。図3において $E/P = 45$ ではガス増幅率が1であるので、 $E/P = 8$ 付近のプラトーの所は増幅率が1であり、電離箱の使用領域であることを意味している。ガス圧11.3, 15, 30, 45 torrのカーブにおいて、 $E/P < 12$ の領域では $\Delta E_1$ のパルス波高が下降する。

このことは  $12 < E/P < 45$  の領域で  $(\alpha - \eta)/P < 0$  であることを示している。

表1に各ガス圧に対する  $E/P = 8$  付近のプラトーの波高の測定値と  $\Delta E_1$  の計算値を示す。いずれの値も 30 torr における値で規格化してある。 $\Delta E_{1P}/\Delta E_{30\text{ torr}}$  の値と  $PH_P/PH_{30\text{ torr}}$  の値の比例関係はよい。このことから、ガス圧 11.3 torr ~ 45 torr では  $E/P = 8$  付近のプラトー領域はガス増幅率 1 を保持している電離箱の使用領域であることを示している。

$CF_4$  と  $C_4H_{10}$  のパルス波高の比較は 30 torr において示してある。荷電粒子に対する阻止能の計算プログラム<sup>10)</sup>を用いて  $CF_4$ ,  $C_4H_{10}$  の 30 torr における  $\Delta E_1$  を計算すると両者ほぼ同じである。W 値 (イオン対を生成するのに必要な平均エネルギー) は  $C_4H_{10}$  に対しては 26 eV<sup>11)</sup> であるが  $CF_4$  に対しては文献がない。しかし  $\Delta E_1$  のパルス波高の比較から、 $CF_4$  の W 値も 26 eV 位として扱ってよさそうである。

## 2.2 高エネルギー重イオン粒子による測定

本節はタンデム加速器からの種々の重イオンビーム ( $^{12}C$ ,  $^{16}O$ ,  $^{35}Cl$ ,  $^{58}Ni$ ,  $^{79}Br$ ) による核反応実験で得られた検出器の性能とガス特性に関する結果のまとめである。

$\Delta E_1$  および  $E$  のパルス波高の分布の広がり (FWHM) は検出器の  $\Delta E_1$ ,  $E$  に関する分解能を表わすが、一般的にはそれらは使用したガスにも依存している。従って、それらの結果の比較検討により検出器の性能およびガスの特性が判る。

$\Delta E_1$  および  $E$  スペクトルの例を図 4 (a) と (b) に示す。 $\Delta E_1$  の FWNM は回路系ノイズ  $\delta(\Delta E_1)_{EL}$ , 衝突によるストラグリング  $\delta(\Delta E_1)_{COLL}$ , イオン電荷のゆらぎによるストラグリング  $\delta(\Delta E_1)_{CH \cdot FL}$  などにもとづく。 $E$  の FWHM は回路系ノイズ  $\delta E_{EL}$ , 衝突によるストラグリング  $\delta E_{COLL}$ , イオンの電荷のゆらぎによるストラグリング  $\delta E_{CH \cdot FL}$ , 入射窓の厚さ (ENMA 焦点面検出器の場合には、カウンターの前面に入射窓, ガス層, 電磁波シールド膜, ガス層が入る) の不均一さによる広がり (それぞれの厚さに対して 10% の不均一さを仮定した)  $\delta E_{V.D.S}$  などにもとづく。衝突によるストラグリングおよびイオンの電荷のゆらぎによるストラグリングの計算には Kusterer et al<sup>12)</sup> による式を用いた。

$$\delta(\Delta E)_{COLL} = 29.4 \cdot \bar{q} \cdot [z_T \cdot \rho \cdot x/A]^{\frac{1}{2}} \text{ (keV)}$$

$$\bar{q} = [S(E)/S_p(E/A)]$$

ここで、 $\bar{q}$  はイオンの有効電荷,  $z_T$  は使用ガスの電荷,  $A$  は使用ガスの質量数,  $\rho$  は使用ガスの密度 ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ ),  $x$  はイオンの行路 ( $\text{cm}$ ),  $S(E)$  はイオンの阻止能,  $S_p(E/A)$  は陽子の阻止能である。

$\Delta E$  が大きい時は次式を用いた。

$$\delta(\Delta E)_{COLL} = 0.929 \left[ \text{MeV} \cdot \text{cm} \cdot \text{mol}^{-1/2} \right]$$

$$\times \left[ \frac{z_T}{A} \cdot \frac{\Delta E}{S_p(E/P)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{S(E-\Delta E)}{S(E)}$$

一方、半経験式として

$$\delta(\Delta E)_{\text{CH}\cdot\text{FL}} = k \cdot z_p^{\frac{1}{2}} \cdot (\Delta E)^{\gamma} \cdot S(E - \Delta E) / S(E) \quad (\text{keV})$$

ここで、 $z_p$  はイオンの電荷であり、 $\gamma = 0.53$ <sup>13)</sup>、 $k_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 32$ <sup>13)</sup>である。 $k_{\text{CF}_4}$  の値は既知でないため、 $k_{\text{CF}_4} = k_{\text{C}_4\text{H}_{10}}$  と仮定した。

表2には $\Delta E_1$ に対するそれぞれのストラグリングの値、これらのストラグリングからの全寄与 $\delta(\Delta E_1)_{\text{TH}}$ 、測定値のFWHM $\delta(\Delta E)_{\text{EXP}}$ を示す。また、表3にはEに対するそれぞれのストラグリングの値、これらのストラグリングからの全寄与 $\delta E_{\text{TH}}$ 、測定値のFWHM $\delta E_{\text{EXP}}$ を示す。測定値のFWHMの値は、図4(a)、(b)において示される値を用いた。これらの値はP1、P2により45°に入射するイオンの行路差の小さい範囲でゲイトしたものである。

$\delta(\Delta E_1)_{\text{EXP}}$ は $\delta(\Delta E_1)_{\text{TH}}$ とほぼ一致しており、 $\delta(\Delta E_1)_{\text{EXP}}$ への主な寄与は $\delta(\Delta E_1)_{\text{CH}\cdot\text{FL}}$ である。 $\delta E_{\text{EXP}}$ への主な寄与は $\delta E_{\text{V.D.S}}$ である。カウンターガス $\text{C}_4\text{H}_{10}$ と $\text{CF}_4$ に対する $^{35}\text{Cl}$  (150 MeV)の $\delta(\Delta E_1)_{\text{EXP}} / \Delta E_1$ には差異がない。しかし、 $^{60}\text{Ni}$ ターゲット、 $\text{CF}_4$ に対する $\delta E_{\text{EXP}} / E$ は $^{197}\text{Au}$ 、 $\text{C}_4\text{H}_{10}$ に対する $\delta E_{\text{EXP}} / E$ よりもかなり大きい。これはガスの差異によるものではなく、ターゲットの差異による運動学的拡がりによるものと考えられる。焦点面に沿ってこの拡がりP1、P2ゲイトスペクトルを $\delta E_{\text{EXP}}$ として用いているので或程度補正が既になされているが、まだこの種の補正が充分でないのかも知れない。また、像の高さ方向への拡がり不明で補正されていないので、これがかなり大きいものと考えられる<sup>5)</sup>。

種々の重イオンについての $\{ \delta(\Delta E_1)_{\text{EXP}}^2 - \delta(\Delta E_1)_{\text{EL}}^2 \}^{1/2} = \alpha$ とすると、 $\alpha$ は主にイオンの電荷のゆらぎによるストラグリング $\delta(\Delta E_1)_{\text{CH}\cdot\text{FL}}$ にもとづく。このストラグリングの寄与を補正した値 $\alpha_{\text{RED}}$  REDUCED DISTRIBUTION WIDTH に対しては半経験式がある。

$$\alpha_{\text{RED}} = \alpha \cdot \frac{S(E_0)}{S(E_0 - \Delta E_1)} \left[ \frac{z_p^{1/3} + z_T^{1/3}}{z_p} \right]^{1/2} = k \cdot \Delta E_1^{0.53}$$

上式で $z_p$ はイオンの原子番号、 $z_T$ は使用ガスの原子番号、 $S(E)$ は阻止能、 $E_0$ は入射エネルギー、 $k$ はパラメータである。 $\text{C}_4\text{H}_{10}$ に対しては $z_T = 6$ 、 $\text{CF}_4$ に対しては $z_T = 6 \sim 9$ と仮定した。図5にENMA焦点面検出器( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ と $\text{CF}_4$ ガスの場合)と他の小型の電離箱に対する比較を示す。 $k = 80$ の実線(A)はC、Cl、Niのデータに対して、45°入射における $\Delta E$ 電極内の行路差と多重散乱の補正を行った値 $\otimes$ を通る直線である。 $k = 67$ の点線(B)はDaresburyの電離箱の $\text{C}_4\text{H}_{10}$ に対するデータ<sup>14)</sup>を通る直線である。ENMA焦点面検出器(JAERI Focal Plane Detector)に対する $k$ が多少大きい。ENMAスペクトログラフからのイオンの行路差の補正がまだ不充分であるかも知れない。また、像の高さ方向の補正が不明であるが多分必要であろう<sup>5)</sup>。ENMA焦点面検出器の特性に対しては、 $\text{C}_4\text{H}_{10}$ と $\text{CF}_4$ の場合の差異は認められない。

比例計数管領域における特性は、重イオン反応粒子による比例計数管の陽極電圧に対するパルス波高の増大を測定することにより調べた。この測定はJAERI 125を低インピーダンス用に改良した前置増幅器と主増幅器(0.25  $\mu\text{sec} \times 0.25 \mu\text{sec}$ の時定数)の組合せによる出力をオシロスコープに接続し、これらを観測することによりパルス波高を読み取った。従って、

パルス波高の小さい所では読み取り誤差が相対的に大きい。

CF<sub>4</sub>およびC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>ガス中のパルス波高をDiethorn plotすることによりP 1比例計数管のガス増幅特性を得た。これを図6に示す。

$$\frac{\ln M \cdot \ln (B/A)}{V} = \frac{\ln 2}{\Delta V} \left\{ \ln \left[ \frac{V}{P \cdot A \cdot \ln (B/A)} \right] - \ln K \right\},$$

上式においてMはガス増幅率、Vは陽極電圧(VOLT)、Bは陰極の半径(cm)、Aは陽極芯線の半径(cm)、Pはガス圧(bar)である。ΔVは逐次イオン化を生じる間に電子が通過する距離にかかっている電位差、Kは逐次イオン化を生じる最小のE/P(Eは電場の強さ、Pはガス圧)である。

焦点面検出器の比例計数管はG 2 (Frisch grid)側に開口しており、電子はこの開口部から芯線に向う。この開口部にはΔE出力とのクロストークを避けるために2本の50 μmの金鍍金したタングステンのシールド線が張られ、比例計数管の陰極と共にクリーン・アース系に接続している。比例計数管の開口部付近の電場の様子を図7に示す。このような開口部から比例計数管に入る電子の数の絶対値を計算することはむずかしい。そこで、開口部の4 mmの半分、すなわち、シールド線の内側だけの電子が芯線方向に向うとして計算した。図6においてln 2/ΔVの値はC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>とCF<sub>4</sub>に対してはほぼ同じであるが、M=1(ガス増幅がない場合)と測定値を結ぶ直線との交点、すなわち、ln Kの値はC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>に較べCF<sub>4</sub>の場合の方が大きい。このことは、CF<sub>4</sub>は電子付着性であり、2.1節で述べたように、12 < E/P < 45の領域では、(α-η)/P < 0であり、明らかに電子がトラップされることにより説明することが出来る。CF<sub>4</sub>に対しては、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>に較べて見かけ上のMが小さくなっている。一定のE/Pに対する比例計数管の芯線陽極の出力は、CF<sub>4</sub>の場合はC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>の場合に比較して約1/3であった。

### 3. 平行平板アバランシェ・カウンター(PPAC)におけるCF<sub>4</sub>ガスの特性

#### 3.1 パルス波高

小型平行平板アバランシェ・カウンター(PPAC)についての詳細と、それを用いたCH<sub>4</sub>およびC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>ガス特性は参考文献<sup>2,3)</sup>で報告されている。基礎的部分は省略し、図8にPPACの構造図、図9にカウンター系の概観図を示す。また、テストベンチにおけるガス操作系を図10に示す。図9のカウンター系は図10の真空箱中に装着して測定を行う。ガス操作系の全般は参考文献<sup>1)</sup>とほぼ同様である。真空箱およびガス系の全体は300 ℓ/secのターボモレキュラーポンプ系で常に(1~5) × 10<sup>-6</sup> torrに排気し、測定時にガスを充填した。ターボモレキュラーポンプと真空箱およびガス操作系は静電的に絶縁フランジで絶縁した。ポンプ系は一般電源および一般アースを、また、測定系(真空箱、ガス操作系、カウンター系)はクリーン電源およびクリーン・アース系を用いた。カウンター系の陰極をグランドにする際には、真空箱内で真

パルス波高の小さい所では読み取り誤差が相対的に大きい。

CF<sub>4</sub>およびC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>ガス中のパルス波高をDiethorn plotすることによりP 1比例計数管のガス増幅特性を得た。これを図6に示す。

$$\frac{\ln M \cdot \ln (B/A)}{V} = \frac{\ln 2}{\Delta V} \left\{ \ln \left[ \frac{V}{P \cdot A \cdot \ln (B/A)} \right] - \ln K \right\},$$

上式においてMはガス増幅率、Vは陽極電圧(VOLT)、Bは陰極の半径(cm)、Aは陽極芯線の半径(cm)、Pはガス圧(bar)である。ΔVは逐次イオン化を生じる間に電子が通過する距離にかかっている電位差、Kは逐次イオン化を生じる最小のE/P(Eは電場の強さ、Pはガス圧)である。

焦点面検出器の比例計数管はG 2 (Frisch grid)側に開口しており、電子はこの開口部から芯線に向う。この開口部にはΔE出力とのクロストークを避けるために2本の50 μmの金鍍金したタングステンのシールド線が張られ、比例計数管の陰極と共にクリーン・アース系に接続している。比例計数管の開口部付近の電場の様子を図7に示す。このような開口部から比例計数管に入る電子の数の絶対値を計算することはむずかしい。そこで、開口部の4 mmの半分、すなわち、シールド線の内側だけの電子が芯線方向に向うとして計算した。図6においてln 2/ΔVの値はC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>とCF<sub>4</sub>に対してはほぼ同じであるが、M=1(ガス増幅がない場合)と測定値を結ぶ直線との交点、すなわち、ln Kの値はC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>に較べCF<sub>4</sub>の場合の方が大きい。このことは、CF<sub>4</sub>は電子付着性であり、2.1節で述べたように、12 < E/P < 45の領域では、(α-η)/P < 0であり、明らかに電子がトラップされることにより説明することが出来る。CF<sub>4</sub>に対しては、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>に較べて見かけ上のMが小さくなっている。一定のE/Pに対する比例計数管の芯線陽極の出力は、CF<sub>4</sub>の場合はC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>の場合に比較して約1/3であった。

### 3. 平行平板アバランシェ・カウンター(PPAC)におけるCF<sub>4</sub>ガスの特性

#### 3.1 パルス波高

小型平行平板アバランシェ・カウンター(PPAC)についての詳細と、それを用いたCH<sub>4</sub>およびC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>ガス特性は参考文献<sup>2,3)</sup>で報告されている。基礎的部分は省略し、図8にPPACの構造図、図9にカウンター系の概観図を示す。また、テストベンチにおけるガス操作系を図10に示す。図9のカウンター系は図10の真空箱中に装着して測定を行う。ガス操作系の全般は参考文献<sup>1)</sup>とほぼ同様である。真空箱およびガス系の全体は300 l/secのターボモレキュラーポンプ系で常に(1~5) × 10<sup>-6</sup> torrに排気し、測定時にガスを充填した。ターボモレキュラーポンプと真空箱およびガス操作系は静電的に絶縁フランジで絶縁した。ポンプ系は一般電源および一般アースを、また、測定系(真空箱、ガス操作系、カウンター系)はクリーン電源およびクリーン・アース系を用いた。カウンター系の陰極をグランドにする際には、真空箱内で真

空箱自体に確実に接続しなければならない。接続が確実にない場合には、カウンター系は高周波的に高インピーダンスとなり、ターボモレキュラーポンプの電源部（スイッチング、レギュレーターなど）からの高周波をピックアップして、ノイズレベルが高くなり測定が困難となる。

図11にPPAC系の時間分解能測定用回路を示す。この測定系において、ファースト・アンプ（ORTEC, AN 302/NL）をカスケード状4段に接続した場合の回路のノイズレベルは（50～60）mVであった。また、PPACの陽極側の出力抵抗（デカップリング、コンデンサーの後の抵抗）は、カウンターにより多少異なるが（50～120）Ωとすると適切に整形することが出来た。このときPPACの静電容量は空気1気圧下で約60 pFであった。

PPACの陽極電圧の函数として、PPAC陽極出力のパルス波高の測定を行った。CF<sub>4</sub>ガス圧、30～60 torrの範囲で行い、陽極電圧はガス破壊電圧に近くなって、パルス波形がくずれ始める所まで上げた。測定結果を図12に示す。図中に参考文献から引用したCH<sub>4</sub>とC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>の結果も同時に比較してある。パルス波高の測定はPPACの出力をファースト・アンプで増幅し、それをオシロスコープに接続し、そのパルス波高を読み取った。図12のパルス波高はPPACからの直接出力に換算してある。図13の写真にはパルス波形の例を示す。

### 3.2 ガス破壊電圧

ガス破壊電圧はもっとも基本的なガス特性の一つであるが、その定義については測定法により必ずしも同じでない。本報告では、ガス破壊電圧を以下のように定義した。

PPACの陽極電圧を徐々に上昇して行くと、先ず電子による速い成分のパルスが見えてくるが、陽極電圧がガス破壊電圧に近くなってくると、パルスの裾野部分が持ち上ってくる。さらに陽極電圧をゆっくり上げて行くと、突然大きなパルスが見えてきて放電状態となる。この時の陽極電圧をガス破壊電圧とする。この現象は臨界的であり再現性もよい。

測定はPPACのファーストアンプ出力をオシロスコープに接続し、それを見ながら徐々に陽極電圧を上げ、ガス破壊電圧（V<sub>s</sub>）を確認した。CF<sub>4</sub>ガス圧は20～60 torrまで10 torr毎に変えた。その結果を図14に示す。図示方法は

$$\text{Log } V_s = b \cdot \frac{PD}{V_s} \text{Log } e - \log \left( \frac{a}{\ln(r^{-1})} \right)$$

の式にもとづく<sup>3)</sup>。ここでPはガス圧（torr）、DはPPACのギャップ（cm）、rはTownsendの第2係数である。aとbは使用ガスに依存する。図14において、CF<sub>4</sub>の結果はCH<sub>4</sub>およびC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>の結果と共に比較することが出来る。表4に各ガスに対するLog（a/ln（r<sup>-1</sup>））とbの値を示す。

2.1の図3では、CF<sub>4</sub>に対してE/Pの函数としてのα/P或は（α-η）/Pの測定値に注目してきた。図14の結果および表4から各ガスに対するLog（a/ln（r<sup>-1</sup>））とbの値が得られている。一方

$$\alpha/P = a \cdot (E/P) \cdot \exp(-b/(E/P))$$

の式から  $r$  の値が既知であれば、図3における  $CF_4$ 、 $CH_4$  に対する  $\alpha/P$  の値が計算出来る。そして測定値との比較において、 $E/P$  の広範囲における  $\alpha/P$  の値の妥当性が検討しうる。これを行うために先ず  $r$  の値を推定した。この方法は図15で示されるように、 $E/P$  の函数として PPAC の出力の測定値をプロットし、破線で示される計算値との比較を行って各ガスに対する  $r$  の値を推定した。出力の計算には次式を用いた。

$$V_e = 0.16 \left( \frac{\Delta E}{CW} \right) \cdot \left( \frac{\exp(\alpha D)}{(\alpha D)^2} \right)$$

ここで  $V_e$  は PPAC 陽極出力 (mV)、 $\Delta E$  は PPAC ギャップにおけるエネルギー損失 (keV)、 $C$  は PPAC の静電容量 (PF)、 $W$  はイオン-電子対を生じるために必要な平均エネルギー (eV)、 $\alpha$  は前述通り Townsend の第1電離係数 (ions.  $cm^{-1}$ )、 $D$  は PPAC のギャップ (cm) である。各ガスに対して得られた  $r$  の推定値が図15中に指示されている。これらの値と表4の値を用いて、図3に示すように、 $30 < E/P < 80$  に対する  $CF_4$  (……),  $CH_4$  (—),  $C_4H_{10}$  (—) に対する  $\alpha/P$  の値が得られた。これらの値は測定値 ( $CF_4$ ,  $CH_4$ ) とよい一致を示している。このことは PPAC 領域では  $CF_4$  に対しては電子付着性が無視されるということを示している。  $12 < E/P < 45$  においては、2.1で述べたように  $(\alpha - \eta)/P < 0$  であり、明らかに電子付着が生じている。  $E/P > 45$  では  $(\alpha - \eta)/P > 0$  となっているが、 $E/P = 85$  付近まで  $\eta \approx 0$  であり、電子付着がまだ続いていると考えられる。一方、 $CF_4$  ガス中において電子衝突により形成される負イオンとその形成過程、負イオンを形成する電子のエネルギー、断面積のデータが報告されている<sup>17)</sup>。このデータに従うと電子エネルギー 4.5 eV ~ 7.5 eV の間で電子付着が生じる。  $12 < E/P < 45$  のあたりは電子エネルギー 4.5 eV 付近に対応しているのであろう。

$CF_4$  ガスの電子付着は電離箱領域では影響がなく、比例計数管領域になるに従って影響が現われ、或程度  $E/P$  が大きくなり PPAC 領域に達すると、この影響は無視されるということが判明した。

### 3.3 時間分解能

PPAC の特性としてもっとも重要なものは時間分解能である。パルスの立上り時間は電子の流動速度 ( $w$ ) と PPAC のギャップ ( $D$ ) により決まる。 $CF_4$  ガスの場合電子の流動速度は十分に大きい。 $E/P$  ( $V \cdot cm^{-1} \cdot torr$ ) = 40, 60, 80 に対して、 $w$  ( $10^7$  cm/sec) = 1.5, 2.0, 2.7 である<sup>17)</sup>。しかしパルス波高が小さい場合、パルス波形の裾野部分と“信号対ノイズの比”が問題となってきて、これらが時間分解能の限界を与えることになる。

測定はガス圧 60 torr において、陽極電圧をパルス波形がくずれない所まで最大に上げて行った。測定回路は図11に示す。パルスの立上り時間は図13に示すように約 4 nsec であった。(使用したオッシロスコープはテクトロニクス 465 B であり、最小の立上り時間は 3.5 nsec である。) C.F.D のディスクリミネーション・レベルにより多少の分解能の差が見られるが、1組(2個)の PPAC に対する時間分解能として約 400 psec が得られた。1個の PPAC

当りの時間分解能は 280 psec である。

時間分解能はパルス波形（信号対ノイズの比）と測定回路系の性能で決まる。ファーストアンプ 1 段時のパルサーによる時間分解能は 50 psec であった。ガス圧 60 torr，陽極電圧 +1000 V， $\alpha$  線を 3 mm にコリメートしてかカウンター系に入射した場合のタイムスペクトルを図 16 に示す。図 12 に示すように  $\text{CF}_4$  と  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  に対する PPAC の時間分解能は，ガス圧を定めると  $\text{CF}_4$  に較べ  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  のガス破壊電圧がかなり高いために“ノイズに対する信号の比”が大きくなり， $\text{C}_4\text{H}_{10}$  の方がより短い時間分解能を得ることが出来る。エネルギー損失の大きい重イオン反応粒子に対しては， $\text{CF}_4$  ガスによる PPAC の時間分解能を向上させることが出来る。

## 4. 変形型 PPAC の特性

### 4.1 芯線型陽極・PPAC

PPAC は 2 章で述べた ENMA 焦点面検出器の前に設置する計画であるが，焦点面検出器の前におけるエネルギー損失を出来るだけ小さくしたい。即ち，PPAC の使用面から見た時，ガス圧を低く保ち（例えば 30 torr）PPAC のパルス波高を出来るだけ大きくしたい。この場合，陽極を芯線にして局所的に電場を強くしてガス増幅率をかせぐのも一つの方法である。しかし他方では，芯線から離れた所では，電場が弱くなるので 2.1 に述べたように  $\text{CF}_4$  ガスに対しては電子付着の影響が現われるという欠点がある。図 17 に芯線型陽極の略図を示す。使用した芯線は金鍍金した  $10\ \mu\text{m}$  直径のタングステン線であり，1 mm 間隔に張った。芯線面と陰極板のギャップはそれぞれ 1.6 mm であり，陰極は 3 章と同一のものである。

前節と同様に  $\text{CF}_4$  ガスによるパルス波高と時間分解能の測定を行った。PPAC の標準型（3 章で述べた型のもの）から変形させた種々の型の PPAC に対して特性を比較した。これらのまとめを図 18 に示す。A は標準型であり，陰極・陽極ギャップは 1.6 mm，B も標準型であり，陰極・陽極ギャップは 3.2 mm である。C は B の変形型であり芯線面を中間バイアス電極にした場合であり，中間バイアス面と両極とのギャップは 1.6 mm である。D は B の変形型であり芯線型陽極をもち，陰極と陽極のギャップは 1.6 mm である。D と A を比較すると，D の方が電場が芯線近くで強く，芯線から離れた所では弱いために，パルスの立上り時間は A の場合の約 1.5 倍となり，6 nsec であった。時間分解能は A の場合（但しガス圧は 60 torr）とほぼ同じであり，2 個の PPAC で 400 psec，1 個当り 280 psec となる。時間分解能は“信号対ノイズ比”で決まるので，パルス波高が高く得られる型の方が望ましい。図 18 に示した型の PPAC の中でガス圧 30 torr の場合，陽極電圧を一定とすると，A よりも D，B よりも C の方がパルス波高が大きくなる。従って C のような芯線中間バイアス電極または D のような芯線型陽極をもつ PPAC の方が標準型よりもゲインが高い。



当りの時間分解能は 280 psec である。

時間分解能はパルス波形（信号対ノイズの比）と測定回路系の性能で決まる。ファーストアンプ 1 段時のパルサーによる時間分解能は 50 psec であった。ガス圧 60 torr，陽極電圧 +1000 V， $\alpha$  線を 3 mm にコリメートしてかカウンター系に入射した場合のタイムスペクトルを図 16 に示す。図 12 に示すように  $\text{CF}_4$  と  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  に対する PPAC の時間分解能は，ガス圧を定めると  $\text{CF}_4$  に較べ  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  のガス破壊電圧がかなり高いために“ノイズに対する信号の比”が大きくなり， $\text{C}_4\text{H}_{10}$  の方がより短い時間分解能を得ることが出来る。エネルギー損失の大きい重イオン反応粒子に対しては， $\text{CF}_4$  ガスによる PPAC の時間分解能を向上させることが出来る。

## 4. 変形型 PPAC の特性

### 4.1 芯線型陽極・PPAC

PPAC は 2 章で述べた ENMA 焦点面検出器の前に設置する計画であるが，焦点面検出器の前におけるエネルギー損失を出来るだけ小さくしたい。即ち，PPAC の使用面から見た時，ガス圧を低く保ち（例えば 30 torr）PPAC のパルス波高を出来るだけ大きくしたい。この場合，陽極を芯線にして局所的に電場を強くしてガス増幅率をかせぐのも一つの方法である。しかし他方では，芯線から離れた所では，電場が弱くなるので 2.1 に述べたように  $\text{CF}_4$  ガスに対しては電子付着の影響が現われるという欠点がある。図 17 に芯線型陽極の略図を示す。使用した芯線は金鍍金した  $10\ \mu\text{m}$  直径のタングステン線であり，1 mm 間隔に張った。芯線面と陰極板のギャップはそれぞれ 1.6 mm であり，陰極は 3 章と同一のものである。

前節と同様に  $\text{CF}_4$  ガスによるパルス波高と時間分解能の測定を行った。PPAC の標準型（3 章で述べた型のもの）から変形させた種々の型の PPAC に対して特性を比較した。これらのまとめを図 18 に示す。A は標準型であり，陰極・陽極ギャップは 1.6 mm，B も標準型であり，陰極・陽極ギャップは 3.2 mm である。C は B の変形型であり芯線面を中間バイアス電極にした場合であり，中間バイアス面と両極とのギャップは 1.6 mm である。D は B の変形型であり芯線型陽極をもち，陰極と陽極のギャップは 1.6 mm である。D と A を比較すると，D の方が電場が芯線近くで強く，芯線から離れた所では弱いために，パルスの立上り時間は A の場合の約 1.5 倍となり，6 nsec であった。時間分解能は A の場合（但しガス圧は 60 torr）とほぼ同じであり，2 個の PPAC で 400 psec，1 個当り 280 psec となる。時間分解能は“信号対ノイズ比”で決まるので，パルス波高が高く得られる型の方が望ましい。図 18 に示した型の PPAC の中でガス圧 30 torr の場合，陽極電圧を一定とすると，A よりも D，B よりも C の方がパルス波高が大きくなる。従って C のような芯線中間バイアス電極または D のような芯線型陽極をもつ PPAC の方が標準型よりもゲインが高い。

## 4.2 メッシュ型陰極・芯線型陽極・PPAC

4.1までは、陰極は3章のPPACと同じポリエスル薄膜(2 $\mu$ m)にAlを蒸着したものであった。重イオン反応粒子の電極膜によるエネルギー損失を除く方法として、導体・薄膜陰極をメッシュに交換し、陽極を芯線型としてPPACを製作し、パルス波高および時間分解能を測定した。陰極メッシュは30 $\mu$ mメッシュ線、1mm $\times$ 1mmメッシュ、透過率98%のSUS製である。図19にメッシュ型陰極の略図を示す。測定結果は図18にまとめてあり、E型として図示してある。この場合のパルス波高は陽極電圧が低い時には全体的に小さく、Aに比較して約2/3であるが、中には大きなパルスも観測された。また、小放電が起り易く、メッシュに付着したゴミには要注意である。パルスの立上り時間はDの場合とほぼ同じ6nsecであった。カウンターチェンバー内のグラウンドがPPACの陰極(グラウンド)に近い場合には、電場のもれの影響が出てきて、パルスの後半の降り側が持ち上る。陰極とチェンバーのグラウンド間に、2 $\mu$ mのポリエステル薄膜を入れるとこの影響はなくなった。チェンバーのグラウンド側からくる電子の影響であったと解釈された。1組のカウンター系にした場合、片側の陽極にのみ電圧をかけると、他の一方の陽極に正のパルスが観測された。しかし両陽極に電圧をかけると問題はなかった。得られた分解能は図20で示されるように2個のPPACに対して(400~450)psecであった。1個当たり(280~320)psecである。

## 5. 議 論

はじめに、本文の記述に沿った議論をし、次に、全体を通したまとめの議論を行う。先ずENMA焦点面検出器の電離箱部分におけるCF<sub>4</sub>ガスの特性測定では、 $12 < E_{A \cdot PG} / P < 45$  (V $\cdot$ cm<sup>-1</sup> $\cdot$ torr<sup>-1</sup>)の範囲で $(\alpha - \eta) / P < 0$ であり、明らかに電子付着の影響が現われることが判明した。しかし、 $E / P = 8$ 付近が $\Delta E_1$ パルス波高のプラトー領域であり、ガス増幅率が1である。従って $E / P = 8$ になるように電離箱の陽極電圧を選び、最良条件で安定に電離箱を動作させなければならない。重イオン反応粒子による電離箱部の測定、即ち、 $\Delta E_1$ とEの測定では、 $\Delta E_1$ とEの分解能の解析から、焦点面検出器の動作が理想的状態に近いことが判る。一方、検出器の改良面から見た場合、カウンターの窓とカウンター前面までのデッド・スペースにおけるエネルギー損失を少なくすれば、Eの分解能を更に向上させることが出来る。図5に示す $\alpha_{RED} = k \Delta E_1^{0.53}$ の直線フィットにおいて、ENMA焦点面検出器に対する直線Aと、他所の小型電離箱に対する直線Bとの差異(Aに対しては $k = 80$ 、Bに対しては $k = 67$ )は使用ガスに依存するよりも、構造の差異と焦点面検出器であるための反応粒子の運動学的な広がりからきていると考えられる。ENMA焦点面検出器の $\Delta E_1$ およびE分解能という点では、CF<sub>4</sub>ガスはC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>ガスと同等であり、何ら問題ないと言える。CF<sub>4</sub>ガスの比例計数管領域における特性は、重イオン反応粒子による焦点面検出器の比例計数管のガス増幅率測定を行って調べた。図6におけるCF<sub>4</sub>、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>ガスに対するDiethorn plotの比較から、 $\Delta V$ はどちらもほぼ同じであるが、KはCF<sub>4</sub>の方がC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>に比較して大きい。このことはCF<sub>4</sub>は電子付着性であり、前述

## 4.2 メッシュ型陰極・芯線型陽極・PPAC

4.1までは、陰極は3章のPPACと同じポリエスル薄膜(2 $\mu$ m)にA $\theta$ を蒸着したものであった。重イオン反応粒子の電極膜によるエネルギー損失を除く方法として、導体・薄膜陰極をメッシュに交換し、陽極を芯線型としてPPACを製作し、パルス波高および時間分解能を測定した。陰極メッシュは30 $\mu$ mメッシュ線、1mm $\times$ 1mmメッシュ、透過率98%のSUS製である。図19にメッシュ型陰極の略図を示す。測定結果は図18にまとめてあり、E型として図示してある。この場合のパルス波高は陽極電圧が低い時には全体的に小さく、Aに比較して約2/3であるが、中には大きなパルスも観測された。また、小放電が起り易く、メッシュに付着したゴミには要注意である。パルスの立上り時間はDの場合とほぼ同じ6nsecであった。カウンターチェンバー内のグラウンドがPPACの陰極(グラウンド)に近い場合には、電場のものの影響が出てきて、パルスの後半の降り側が持ち上る。陰極とチェンバーのグラウンド間に、2 $\mu$ mのポリエステル薄膜を入れるとこの影響はなくなった。チェンバーのグラウンド側からくる電子の影響であったと解釈された。1組のカウンター系にした場合、片側の陽極にのみ電圧をかけると、他の一方の陽極に正のパルスが観測された。しかし両陽極に電圧をかけると問題はなかった。得られた分解能は図20で示されるように2個のPPACに対して(400~450)psecであった。1個当たり(280~320)psecである。

## 5. 議 論

はじめに、本文の記述に沿った議論をし、次に、全体を通したまとめの議論を行う。先ずENMA焦点面検出器の電離箱部分におけるCF<sub>4</sub>ガスの特性測定では、 $12 < E_{A \cdot RD} / P < 45$  (V $\cdot$ cm<sup>-1</sup> $\cdot$ torr<sup>-1</sup>)の範囲で $(\alpha - \eta) / P < 0$ であり、明らかに電子付着の影響が現われることが判明した。しかし、 $E / P = 8$ 付近が $\Delta E_1$ パルス波高のプラトー領域であり、ガス増幅率が1である。従って $E / P = 8$ になるように電離箱の陽極電圧を選び、最良条件で安定に電離箱を動作させなければならない。重イオン反応粒子による電離箱部の測定、即ち、 $\Delta E_1$ とEの測定では、 $\Delta E_1$ とEの分解能の解析から、焦点面検出器の動作が理想的状態に近いことが判る。一方、検出器の改良面から見た場合、カウンターの窓とカウンター前面までのデッド・スペースにおけるエネルギー損失を少なくすれば、Eの分解能を更に向上させることが出来る。図5に示す $\alpha_{RED} = k \Delta E_1^{0.53}$ の直線フィットにおいて、ENMA焦点面検出器に対する直線Aと、他所の小型電離箱に対する直線Bとの差異(Aに対しては $k = 80$ 、Bに対しては $k = 67$ )は使用ガスに依存するよりも、構造の差異と焦点面検出器であるための反応粒子の運動学的な広がりからきていると考えられる。ENMA焦点面検出器の $\Delta E_1$ およびE分解能という点では、CF<sub>4</sub>ガスはC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>ガスと同等であり、何ら問題ないと言える。CF<sub>4</sub>ガスの比例計数管領域における特性は、重イオン反応粒子による焦点面検出器の比例計数管のガス増幅率測定を行って調べた。図6におけるCF<sub>4</sub>、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>ガスに対するDiethorn plotの比較から、 $\Delta V$ はどちらもほぼ同じであるが、KはCF<sub>4</sub>の方がC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>に比較して大きい。このことはCF<sub>4</sub>は電子付着性であり、前述

したように、 $12 < E/P < 45$  の領域では  $(\alpha - \eta)/P < 0$  であり、明らかに電子がトラップされることにより説明することが出来る。CF<sub>4</sub> に対しては C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> に比較して、見かけ上の M が小さくなっている。一定の E/P に対して比例計数管の芯線陽極の出力は、CF<sub>4</sub> の場合は C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> の場合に比較して約 1/3 であった。CF<sub>4</sub> ガスの電子付着性の不利さは広い比例領域を經由する芯線陽極比例計数管に現われる。しかし重イオン反応粒子などのエネルギー損失の大きい場合には、この不利さは問題にならない。

3章および4章に記した P P A C におけるパルス波高およびガス破壊電圧の測定から、CF<sub>4</sub> ガスのアバランシェ領域の特性をまとめる。アバランシェ領域では Townsend の第1電離係数  $\alpha$  は十分に大きく、比例領域の前段で現われた電子付着性はもはや問題ではない。しかしガス破壊電圧は CF<sub>4</sub> は C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> よりも低く、CH<sub>4</sub> とほぼ同じ傾向を示す。有利な点は電子流動速度が CF<sub>4</sub> は C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> および CH<sub>4</sub> よりも大きく、パルスの立上りが十分に速いために、時間分解能は比較的よい。本報告のように 5 MeV  $\alpha$  線による測定では“信号対ノイズ比”が時間分解能の限界となっている。しかし重イオン反応粒子の場合には時間分解能は充分向上する。芯線型陽極とメッシュ型陰極 P P A C による時間検出器の実用の点では、透過率、電場の一様性、電場のもれなどに関して問題が残っているが、逐次解決出来る問題である。

結論として言えることは、ENMA 焦点面検出器、平行平板アバランシェカウンタでは、CF<sub>4</sub> ガスにより種々の点で充分な分解能が得られたが、本報告で述べているようなガス特性を考慮した使用法をすれば、CF<sub>4</sub> ガスの不燃性、電子流動速度の大きいことなどの特徴を生かすことが出来る。焦点面検出器の特性に関しては、実験の目的により必要とされる分解能は異なるが、当面の目的に必要とされる分解能は得られていると言える。また、これに P P A C の変形型の時間検出器の付加も可能である。

## 参 考 文 献

- 1). 沢田正康, 杉山康治, 竹腰英子 : JAERI-M 83-014 (1983)
- 2). 渋谷 陽, 竹腰英子 : JAERI-M 8425 (1979)
- 3). 妻木孝治, 福沢文雄, 竹腰英子 : JAERI-M 8884 (1980)
- 4). K. E. Rehm, W. Kutschera and D. G. Kovar  
ANL Annual Report (1982/1983) p.119
- 5). Y. Sugiyama, N. Shikazono, H. Ikezoe and H. Ikegami, Nucl. Instr. and Meth. 187 (1981) 25 ; Y. Sugiyama, N. Shikazono, T. Sato and H. Ikegami, Nucl. Instr. and Meth. 215 (1983) 17
- 6). O. Bunemann, T. E. Cranshaw and J. A. Harvey, Can. J. Res. A27 (1949) 191
- 7). S. E. Bozin and C. C. Goodyear, J. Phys. D1 (1968) 327
- 8). M. S. Naidu and A. N. Prasad, J. Phys. D: Appl. Phys. 5 (1972) 983
- 9). A. E. Heylen, J. Chem. Phys. 38 (1972) 765

したように、 $12 < E/P < 45$  の領域では  $(\alpha - \eta)/P < 0$  であり、明らかに電子がトラップされることにより説明することが出来る。CF<sub>4</sub> に対しては C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> に比較して、見かけ上の M が小さくなっている。一定の E/P に対して比例計数管の芯線陽極の出力は、CF<sub>4</sub> の場合は C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> の場合に比較して約 1/3 であった。CF<sub>4</sub> ガスの電子付着性の不利さは広い比例領域を經由する芯線陽極比例計数管に現われる。しかし重イオン反応粒子などのエネルギー損失の大きい場合には、この不利さは問題にならない。

3章および4章に記した P P A C におけるパルス波高およびガス破壊電圧の測定から、CF<sub>4</sub> ガスのアバランシェ領域の特性をまとめる。アバランシェ領域では Townsend の第1電離係数  $\alpha$  は十分に大きく、比例領域の前段で現われた電子付着性はもはや問題ではない。しかしガス破壊電圧は CF<sub>4</sub> は C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> よりも低く、CH<sub>4</sub> とほぼ同じ傾向を示す。有利な点は電子流動速度が CF<sub>4</sub> は C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> および CH<sub>4</sub> よりも大きく、パルスの立上りが十分に速いために、時間分解能は比較的よい。本報告のように 5 MeV  $\alpha$  線による測定では“信号対ノイズ比”が時間分解能の限界となっている。しかし重イオン反応粒子の場合には時間分解能は充分向上する。芯線型陽極とメッシュ型陰極 P P A C による時間検出器の実用の点では、透過率、電場の一様性、電場のもれなどに関して問題が残っているが、逐次解決出来る問題である。

結論として言えることは、ENMA 焦点面検出器、平行平板アバランシェカウンタでは、CF<sub>4</sub> ガスにより種々の点で充分な分解能が得られたが、本報告で述べているようなガス特性を考慮した使用法をすれば、CF<sub>4</sub> ガスの不燃性、電子流動速度の大きいことなどの特徴を生かすことが出来る。焦点面検出器の特性に関しては、実験の目的により必要とされる分解能は異なるが、当面の目的に必要とされる分解能は得られていると言える。また、これに P P A C の変形型の時間検出器の付加も可能である。

## 参 考 文 献

- 1). 沢田正康, 杉山康治, 竹腰英子 : JAERI-M 83-014 (1983)
- 2). 渋谷 陽, 竹腰英子 : JAERI-M 8425 (1979)
- 3). 妻木孝治, 福沢文雄, 竹腰英子 : JAERI-M 8884 (1980)
- 4). K. E. Rehm, W. Kutschera and D. G. Kovar  
ANL Annual Report (1982/1983) p.119
- 5). Y. Sugiyama, N. Shikazono, H. Ikezoe and H. Ikegami, Nucl. Instr. and Meth. 187 (1981) 25 ; Y. Sugiyama, N. Shikazono, T. Sato and H. Ikegami, Nucl. Instr. and Meth. 215 (1983) 17
- 6). O. Bunemann, T. E. Cranshaw and J. A. Harvey, Can. J. Res. A27 (1949) 191
- 7). S. E. Bozin and C. C. Goodyear, J. Phys. D1 (1968) 327
- 8). M. S. Naidu and A. N. Prasad, J. Phys. D: Appl. Phys. 5 (1972) 983
- 9). A. E. Heylen, J. Chem. Phys. 38 (1972) 765

- 10). 原研, R I 製造技術課・畑健太郎氏のプログラム OSCAR による。  
(J. F. Ziegler, Stopping Powers and Ranges in All Element Matter  
vol.4 (Pergamon Press 1977) にもとづく)
- 11). L. G. Christophorou, Atomic and Molecular Radiation Physics, Wiley-  
Interscience, New York, 1971
- 12). K. Kusterer, J. Betz, H. L. Harney, B. Heck, LIU Ken Pao and F. Port,  
Nucl. Instr. and Meth. 177 (1980) 485
- 13). H. Schmidt-Böcking and H. Hornung, Z. Physik A286 (1978) 253
- 14). A. N. James, P. A. Butler, T. P. Morrison, J. Simpson and K. A. Connel,  
DL/NUC/P168E, Daresbury Report December (1982)
- 15). 原研エレクトロニクス課・金子記一氏製作。
- 16). W. Diethorn, NTO-6628 (1956)
- 17). L. G. Christophorou, D. L. McCorkle, D. V. Maxey and J. G. Carter,  
Nucl. Instr. and Meth. 163 (1979) 141

表1 各ガス圧(P)に対する $E/P = 8$ 付近のプラトリーの波高の測定値 $PH_P$ と $\Delta E_1$ の計算値 $\Delta E_{1P}$ の比較。P = 30 torrの値で規格化してある。

P (torr)	$PH_P / PH_{30}$	$\Delta E_{1P} / \Delta E_{1 \cdot 30}$
7.5	0.22	0.20
11.3	0.34	0.31
15.	0.46	0.46
30.	1.0	1.0
45.	1.67	1.77

表2  $\Delta E_1$  カウンターにおけるエネルギー損失分解能。計算値と測定値の比較を示す。各記号は本文に記す。

ガス	ターゲット	イオン (入射エネルギー)	$\Delta E_1$ (MeV)	$\delta(\Delta E_1)_{EL}$ (keV)	$\delta(\Delta E_1)_{COLL}$ (keV)	$\delta(\Delta E_1)_{CH \cdot FL}$ (keV)	$\delta(\Delta E_1)_{TH}$ (keV)	$\delta(\Delta E_1)_{EXP}$ (keV)
$C_4H_{10}$	$^{197}Au$ ( $20 \mu g / cm^2$ )	$^{35}Cl$ (150 MeV)	12.3	40	220	520	570	600
$CF_4$	$^{60}Ni$ ( $100 \mu g / cm^2$ )	$^{35}Cl$ (150 MeV)	12.9	80	250	530	590	640

表3 Eカウンターにおけるエネルギー分解能。  
計算値と測定値の比較を示す。各記号は本文に記す。

ガス	ターゲット	イオン (入射エネルギー)	デット・スペース におけるエネルギー -損失 (MeV)	$\delta E_{EL}$ (keV)	$\delta E_{COLL}$ (keV)	$\delta E_{CH\cdot FI}$ (keV)	$\delta E_{VDS}$ (keV)	$\delta E_{TH}$ (keV)	$\delta E_{EXP}$ (keV)
$C_4H_{10}$	$^{197}Au$ ( $20 \mu g/cm^2$ )	$^{35}Cl$ (150 MeV)	23.3	400	320	710	1070	1380	1630
$CF_4$	$^{60}Ni$ ( $100 \mu g/cm^2$ )	$^{35}Cl$ (150 MeV)	24.4	530	330	730	1080	1450	2200

表4 各ガスに対する  $\text{Log}(a/\ell n(r^{-1}))$  と b の値。

ガス	$\text{Log}(a/\ell n(r^{-1}))$	b
$CH_4^{3)}$	-2.59	138
$C_4H_{10}^{3)}$	-2.64	184
$CF_4$	-2.68	90.2



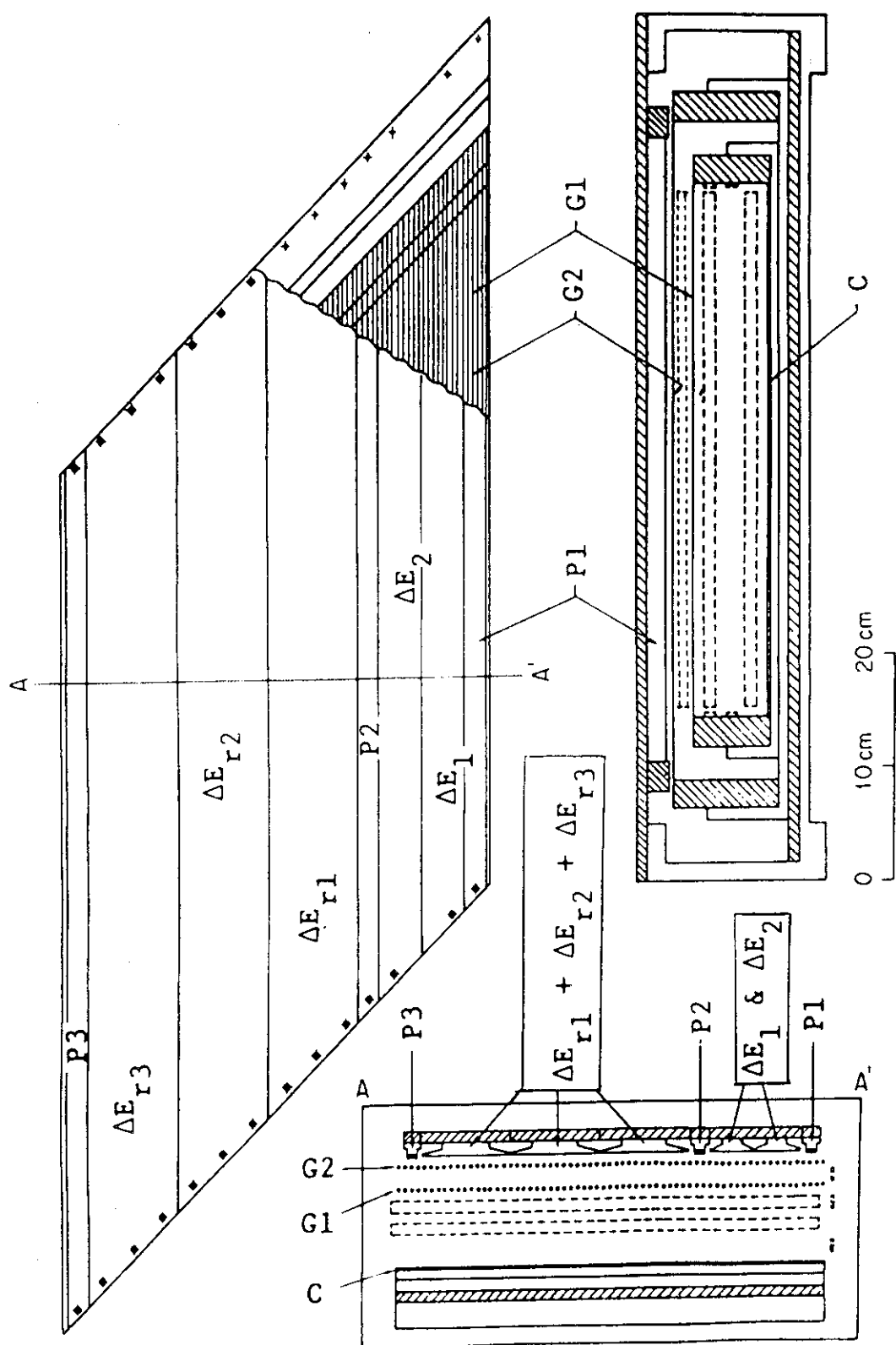


図1 カウンター縮尺図

C, 陰極; G1, 第1グリッド; G2, 第2グリッド (Frisch Grid); P1, 前段比例計数管 (位置カウンタ);  $\Delta E_{r1}$ ,  $\Delta E_{r2}$ , 陽極 ( $\Delta E$ カウンタ); P2, 中段比例計数管 (位置カウンタ);  $\Delta E_{r1} + \Delta E_{r2} + \Delta E_{r3}$ , 陽極 (残存エネルギー  $E_r$  カウンタ); P3, 後段比例計数管 (通過イオン識別用)。CはG1とAC結合することによりEカウンタを形成する。破線は電場補償の位置を示す。斜線は絶縁材料を示す。

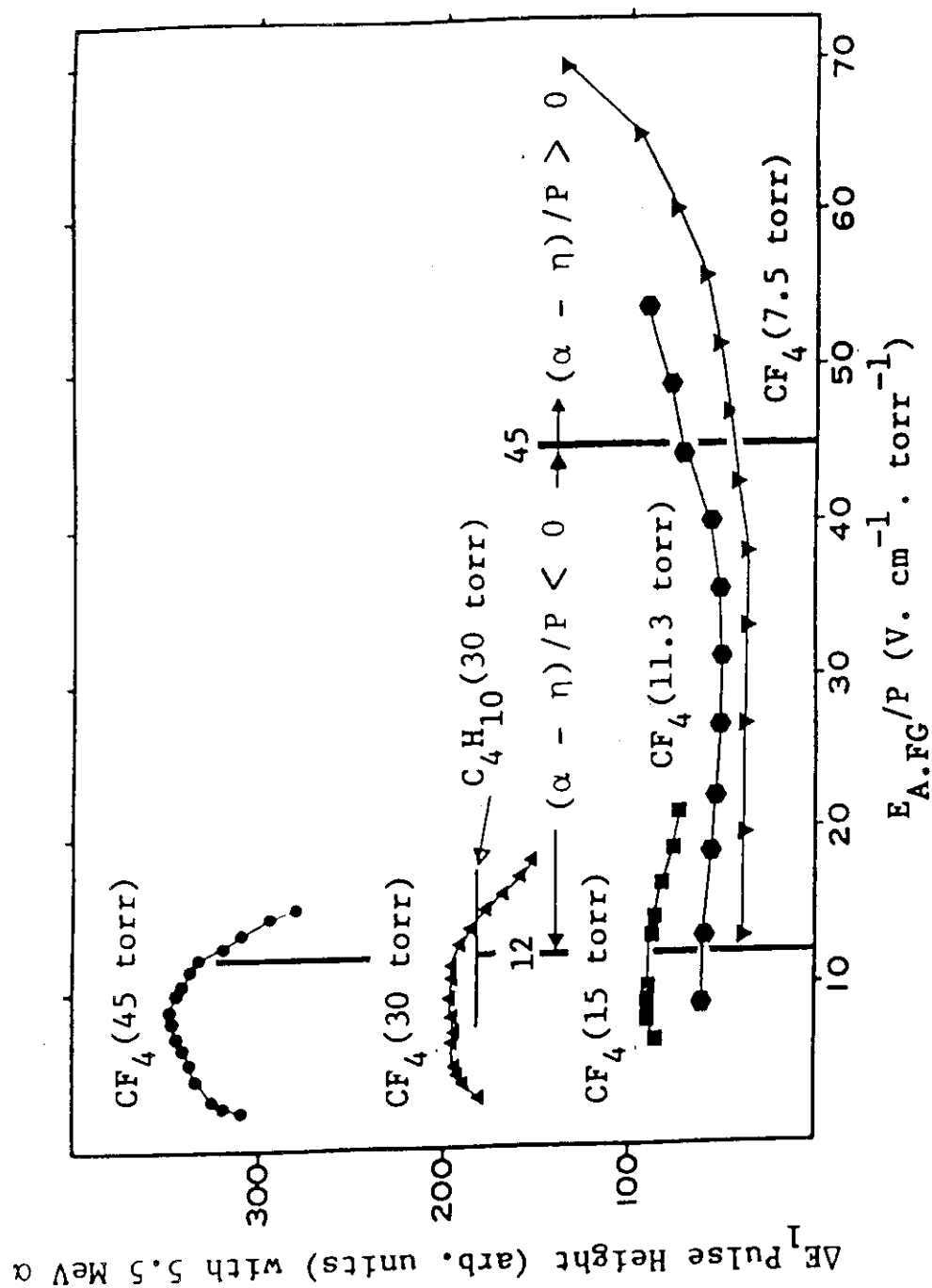


図2  $E_{A.FG}/P$  ( $V \cdot cm^{-1} \cdot torr^{-1}$ ) の函数としての  $\Delta E_1$  パルス波高。  $E_{C.FG}/P$  の値は 1 ~ 6 の範囲で測定した。

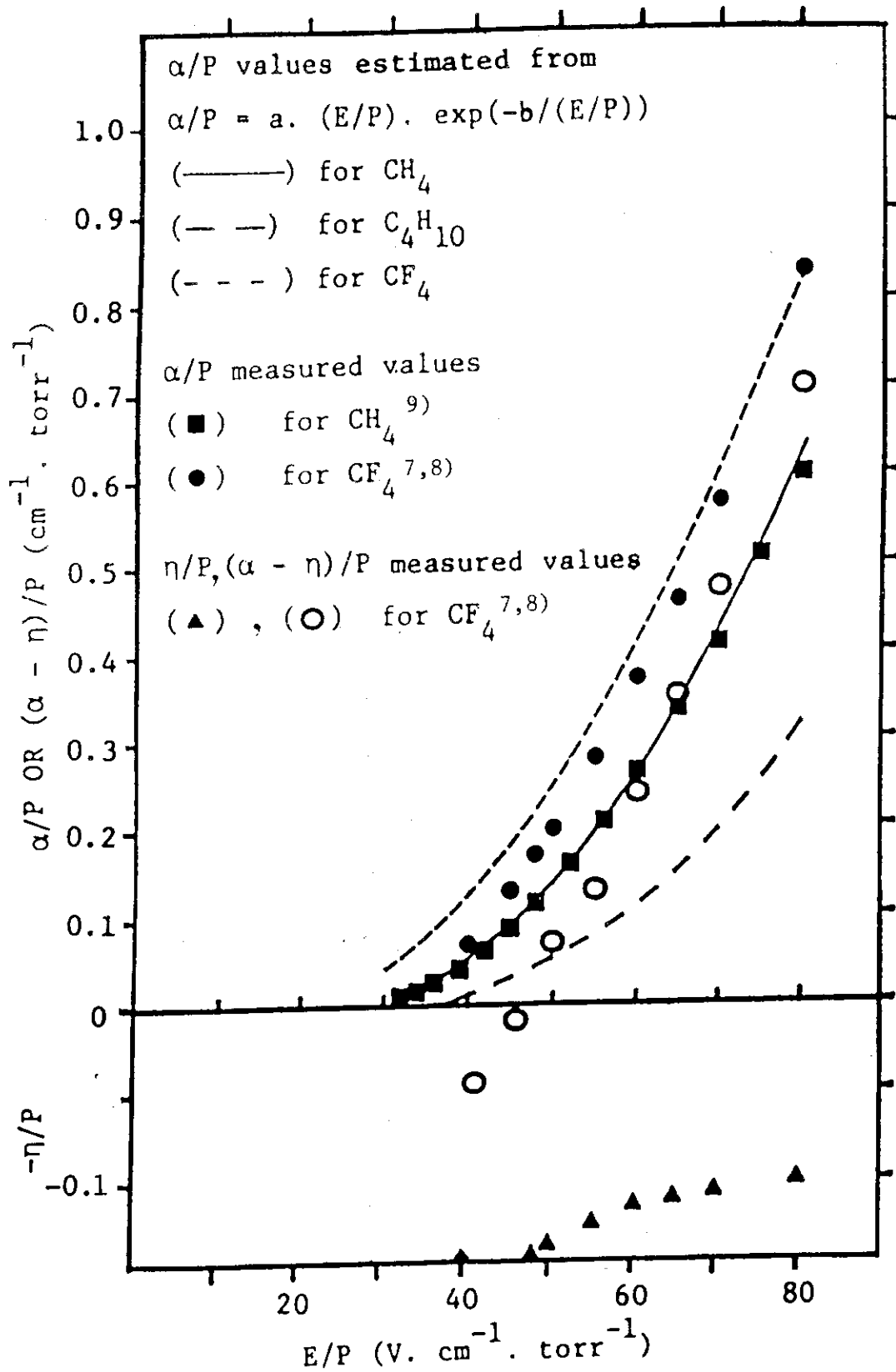


図3  $E/P$  ( $\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{torr}^{-1}$ )の函数としての  $\alpha/P$ ,  $(\alpha - \eta)/P$ ,  $\eta/P$ の値。

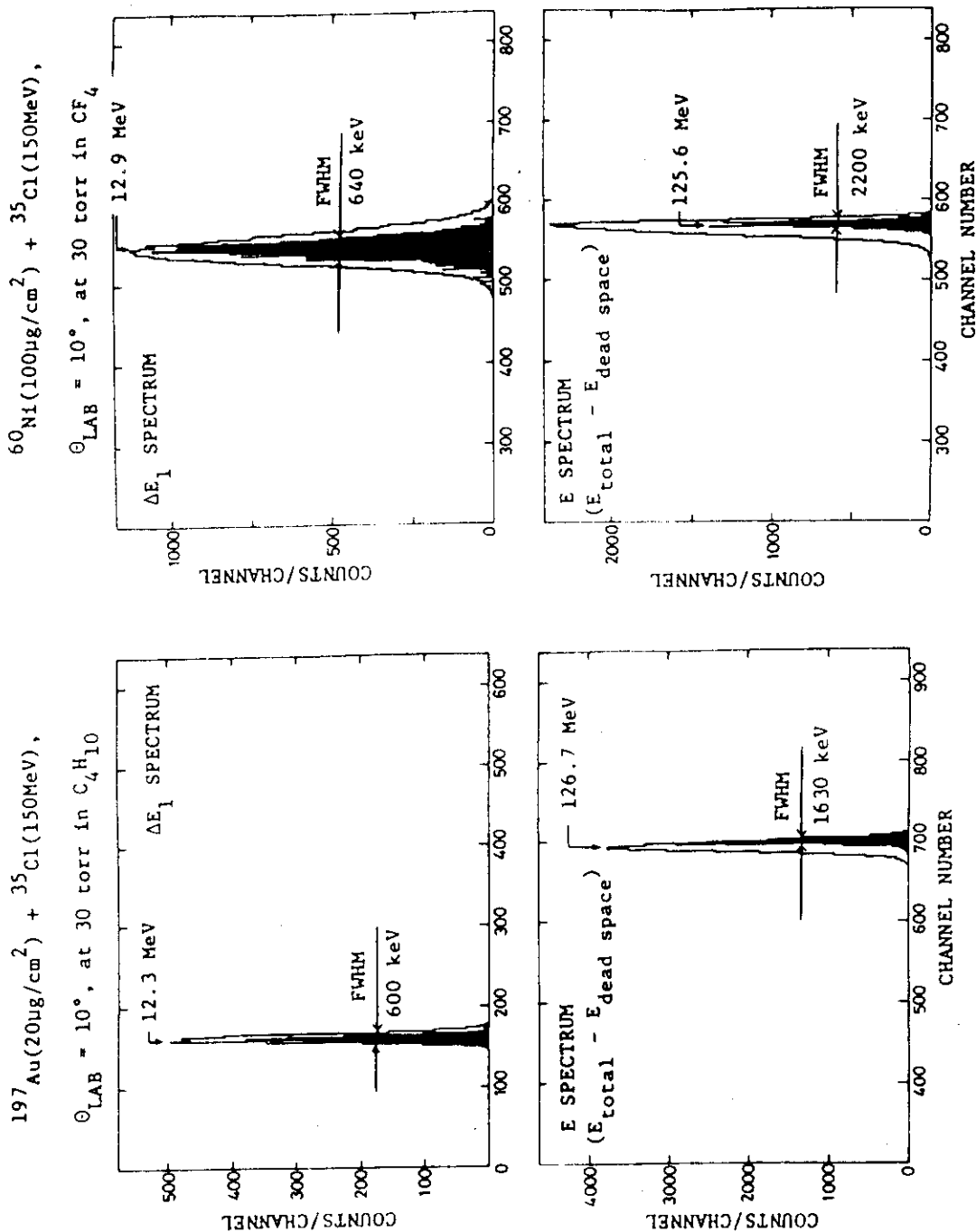


図 4 重イオン反応粒子による $\Delta E_1$ とEスペクトル

- (a)  $^{197}\text{Au}$  ( $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) +  $^{35}\text{Cl}$  (150 MeV),  $\theta_{\text{LAB}} = 10^\circ$ ,  $P_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 30 \text{ torr}$  におけるスペクトル。
- (b)  $^{60}\text{Ni}$  ( $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) +  $^{35}\text{Cl}$  (150 MeV),  $\theta_{\text{LAB}} = 10^\circ$ ,  $P_{\text{CF}_4} = 30 \text{ torr}$  におけるスペクトル。

FWHMの値は、P1, P2により45°に入射するイオンの行路差の小さい範囲でゲイトしたスペクトルに対するものである。

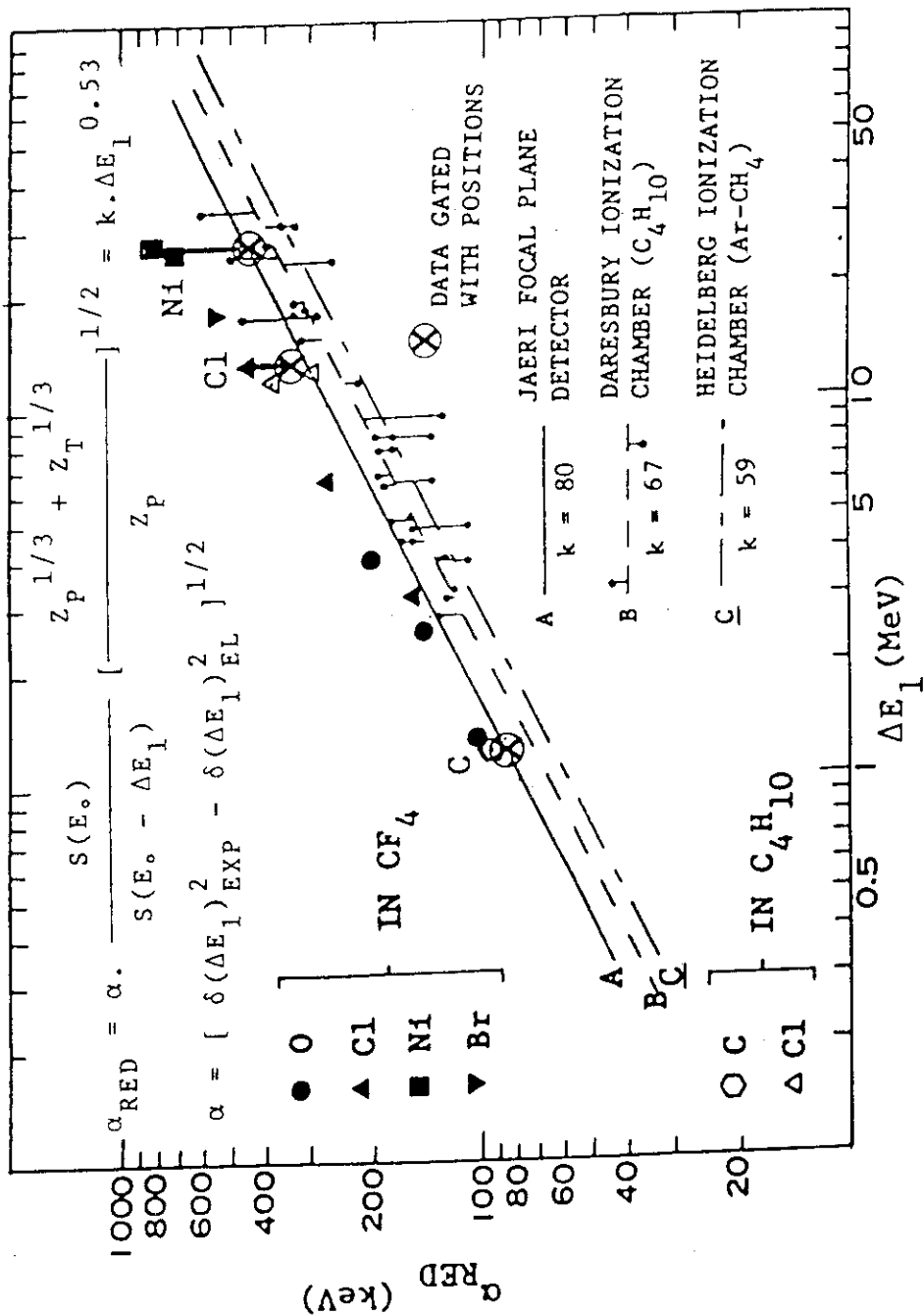


図5  $\Delta E_1$  の函数としての  $\alpha_{RED}$  (REDUCED DISTRIBUTION WIDTH) 値のプロット

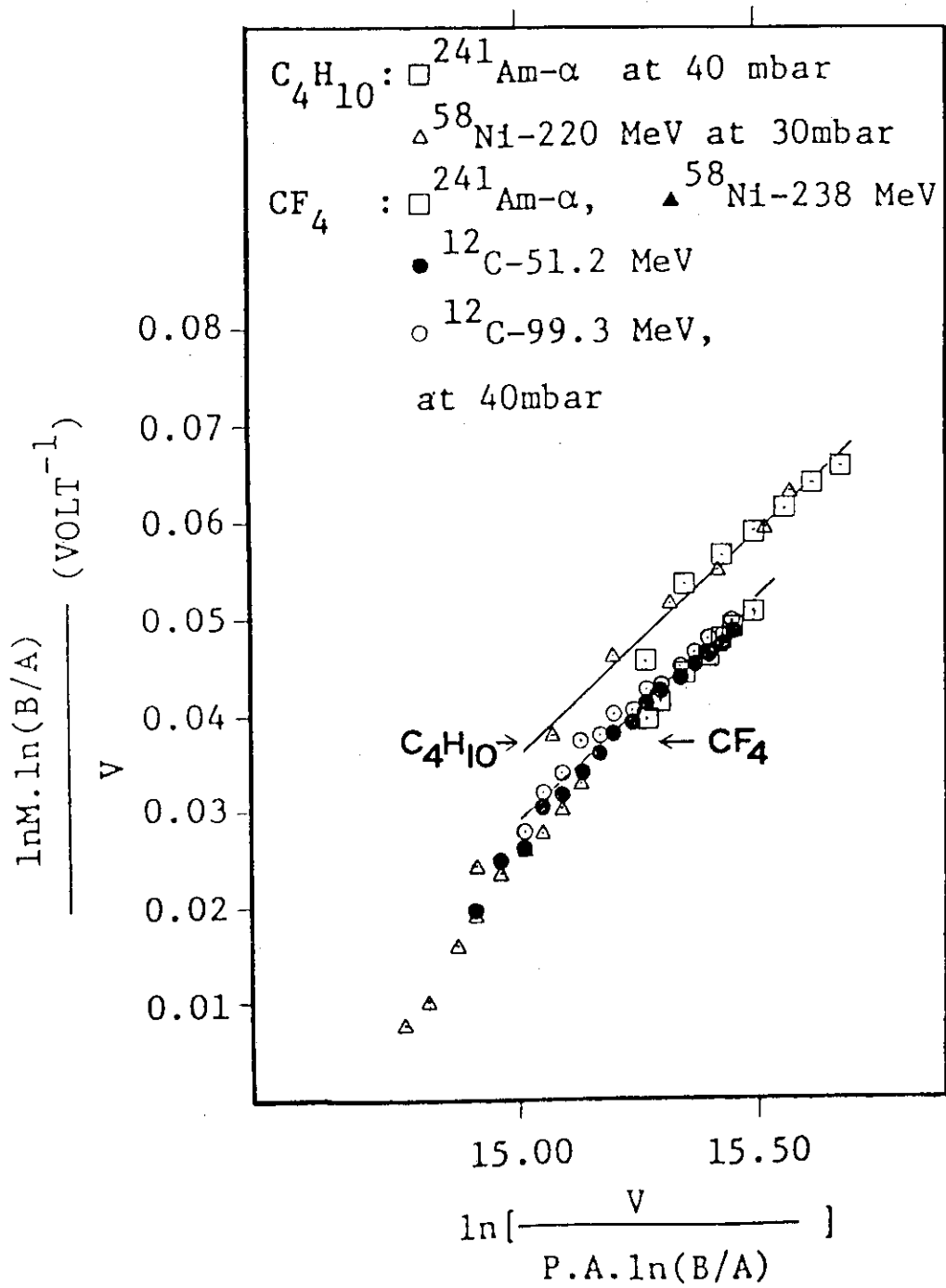


図6 前段比例計数管 (P1, 位置カウンター) に対する Diethorn プロット

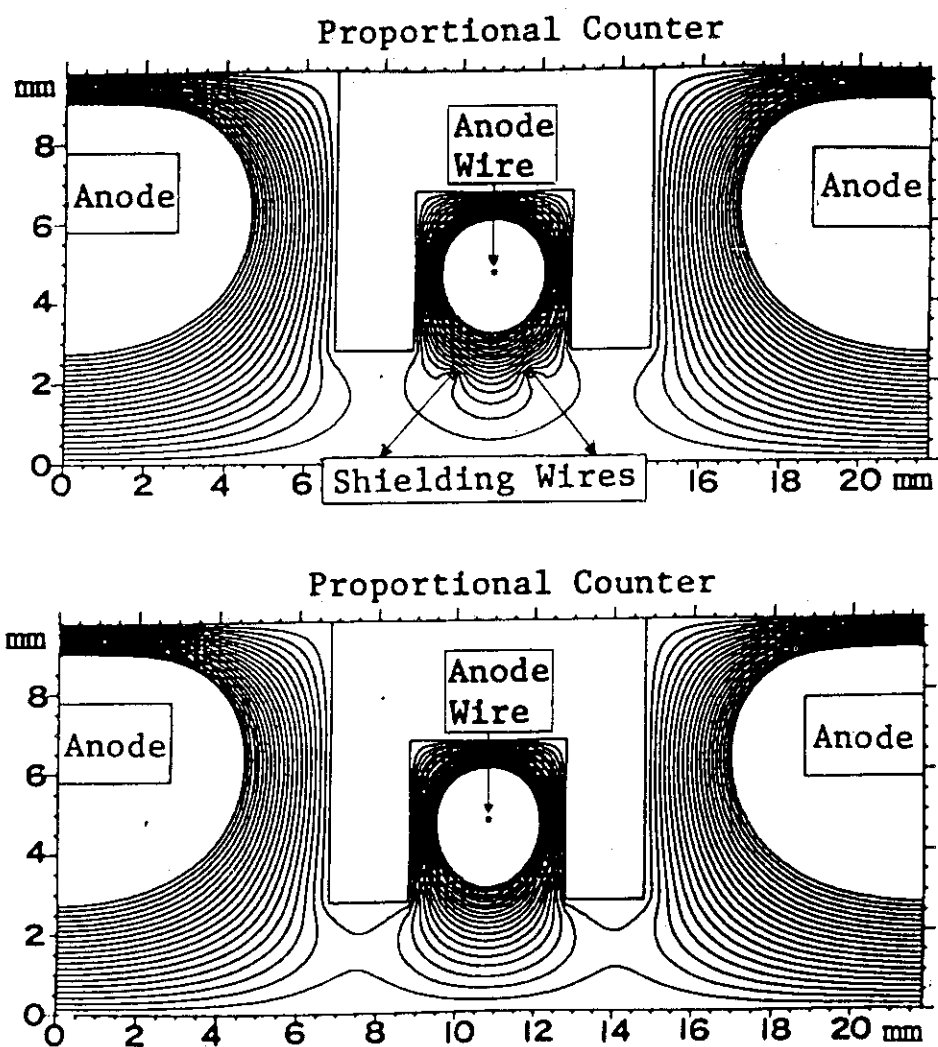


図7 比例計数管の開口部における2本のシールド線の有(上図), 無(下図)の場合について計算された等電位線

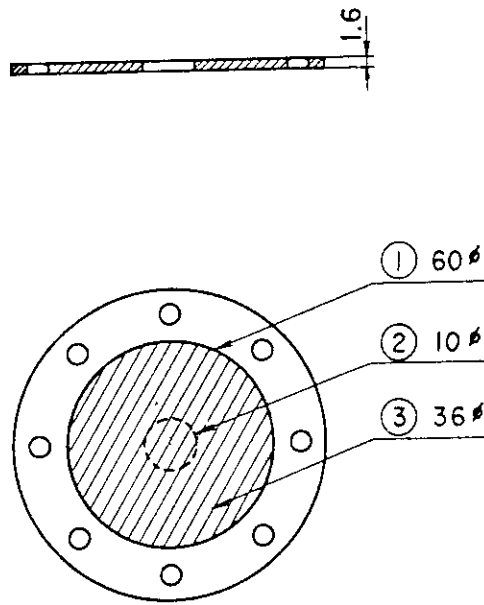


図8 PPAC電極板

①電極枠（ガラスエポキシ樹脂，1.6 mm厚），②PPACの  
 入出口電極窓枠，③A $\phi$ 蒸着したポリエステル電極膜面。

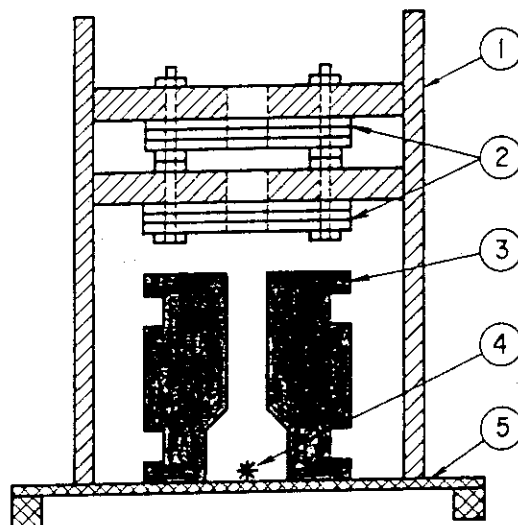


図9 PPACカウンター系の概観図

①PPAC固定枠（アクリル材），②1組のPPAC，③ $\alpha$ 線遮へい  
 筒（銅），④ $^{241}\text{Am}-\alpha$ 線源，⑤固定台（アルミニウム材）



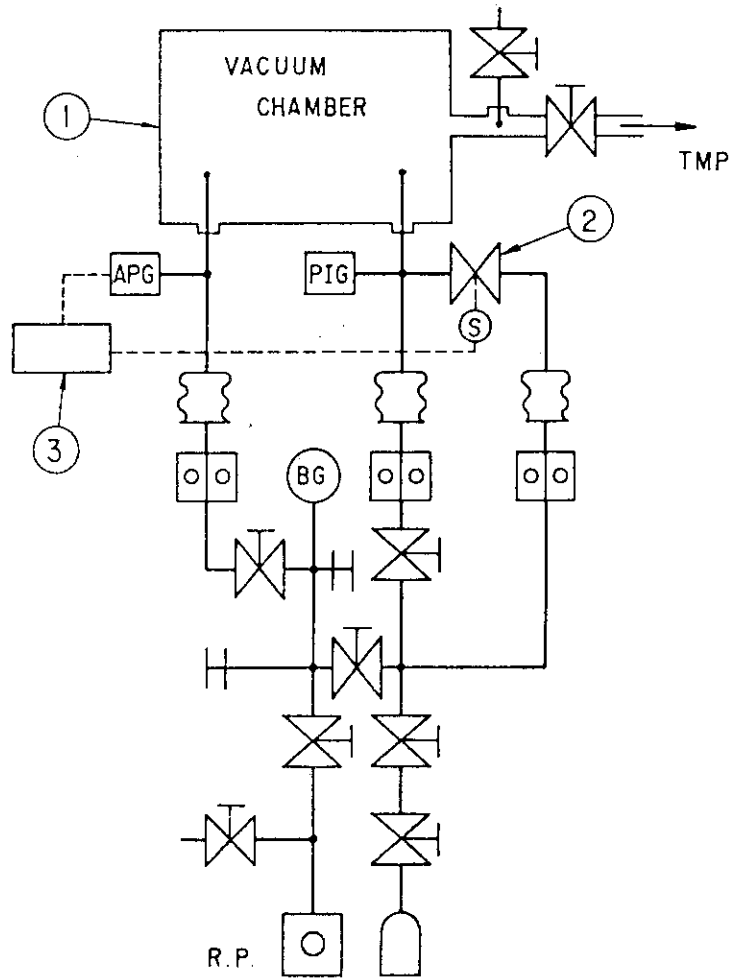


図10 ガス操作系

①真空箱（カウンターチェンバー），②ガス導入制御バルブ，  
③ガス絶体圧力計と組合せたバルブコントローラ（APGは絶体圧力センサー）

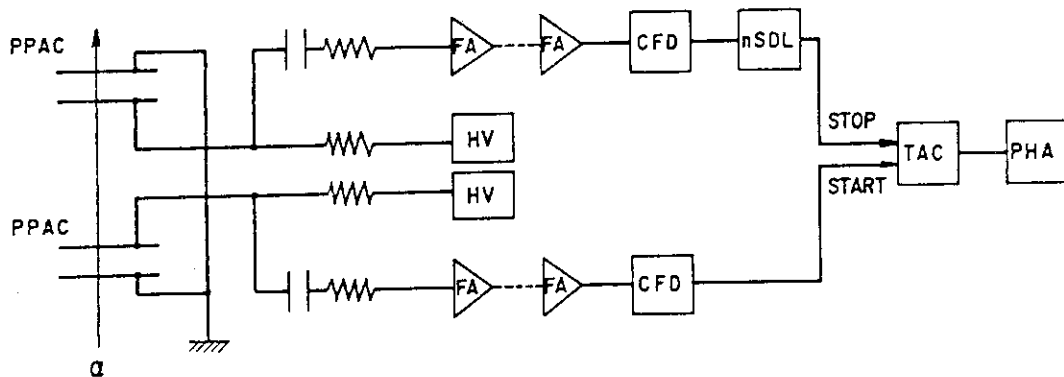


図11 PPACの時間分解能測定用回路

FA, フェースト・アンプ (ORTEC AN302/NL);  
CFD, コンスタントフラクション・ディスクリミネーター;  
nSDL, ナノ秒遅延回路; TAC, 時間波高変換器,  
HV; , 高圧電源; PHA, パルス波高分析器

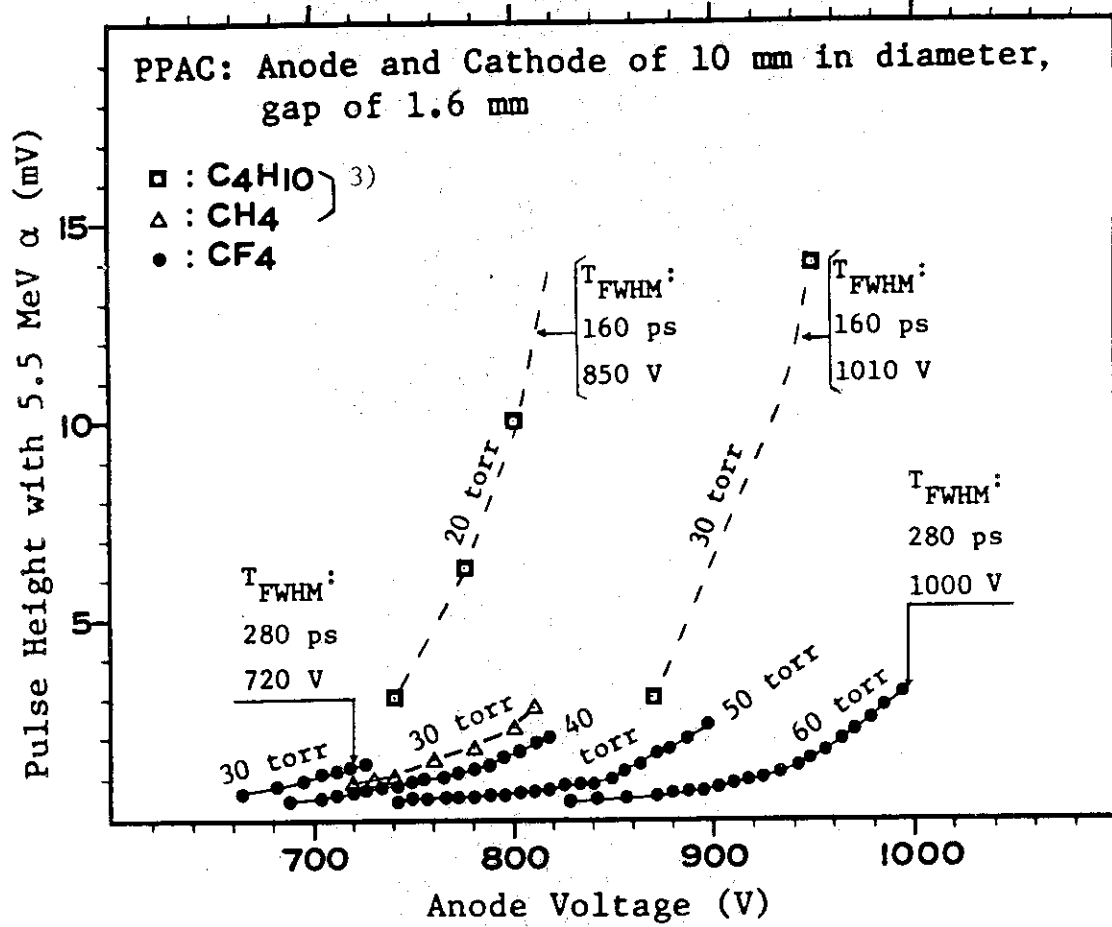


図12 PPACにおける陽極電圧の函数としてのパルス波高  
(使用ガス: CH<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, CF<sub>4</sub>)

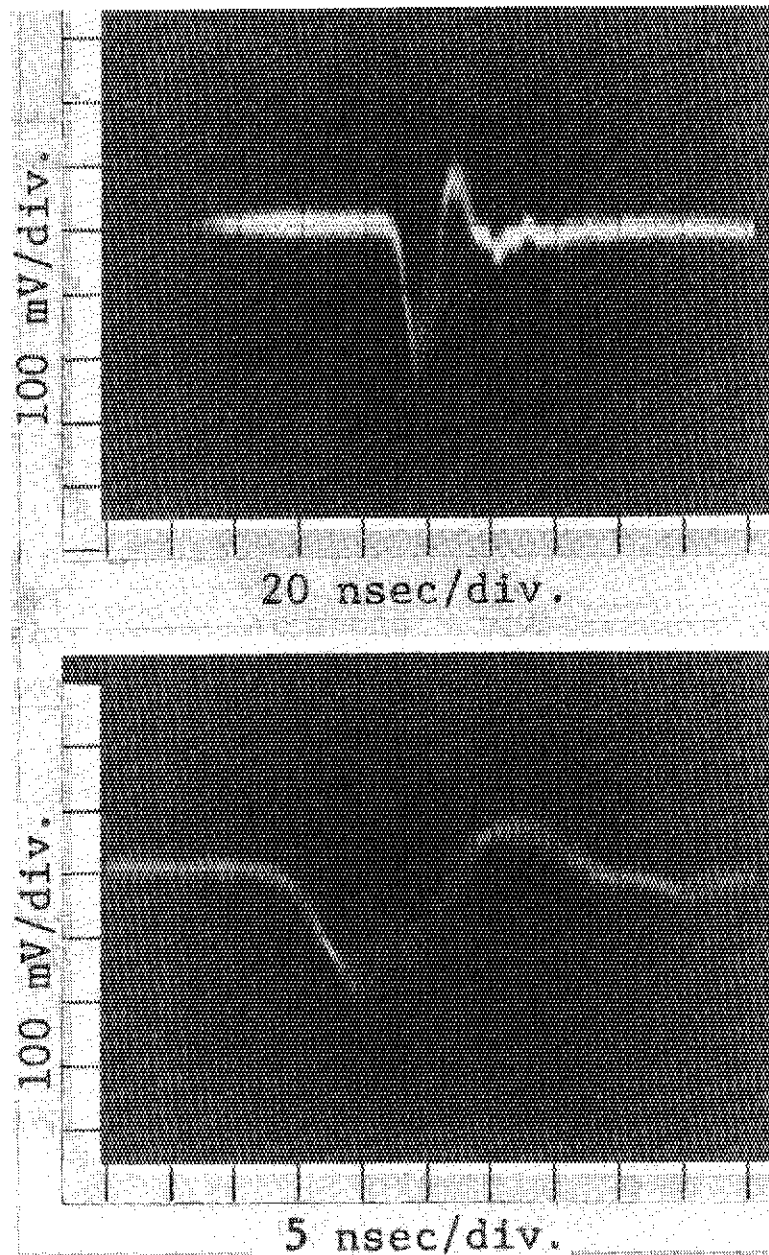


図13 P P A C陽極出力の波形 ( $P_{OF_4} = 60 \text{ torr}$ , ファースト・アンプ4段, 陽極電圧 = +1000 V,  $E/P = 104 (\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{torr}^{-1})$ , 5.0 MeV  $\alpha$  線に対する出力は $\sim 200 \text{ mV}$ , 回路ノイズは $\sim 50 \text{ mV}$ である。

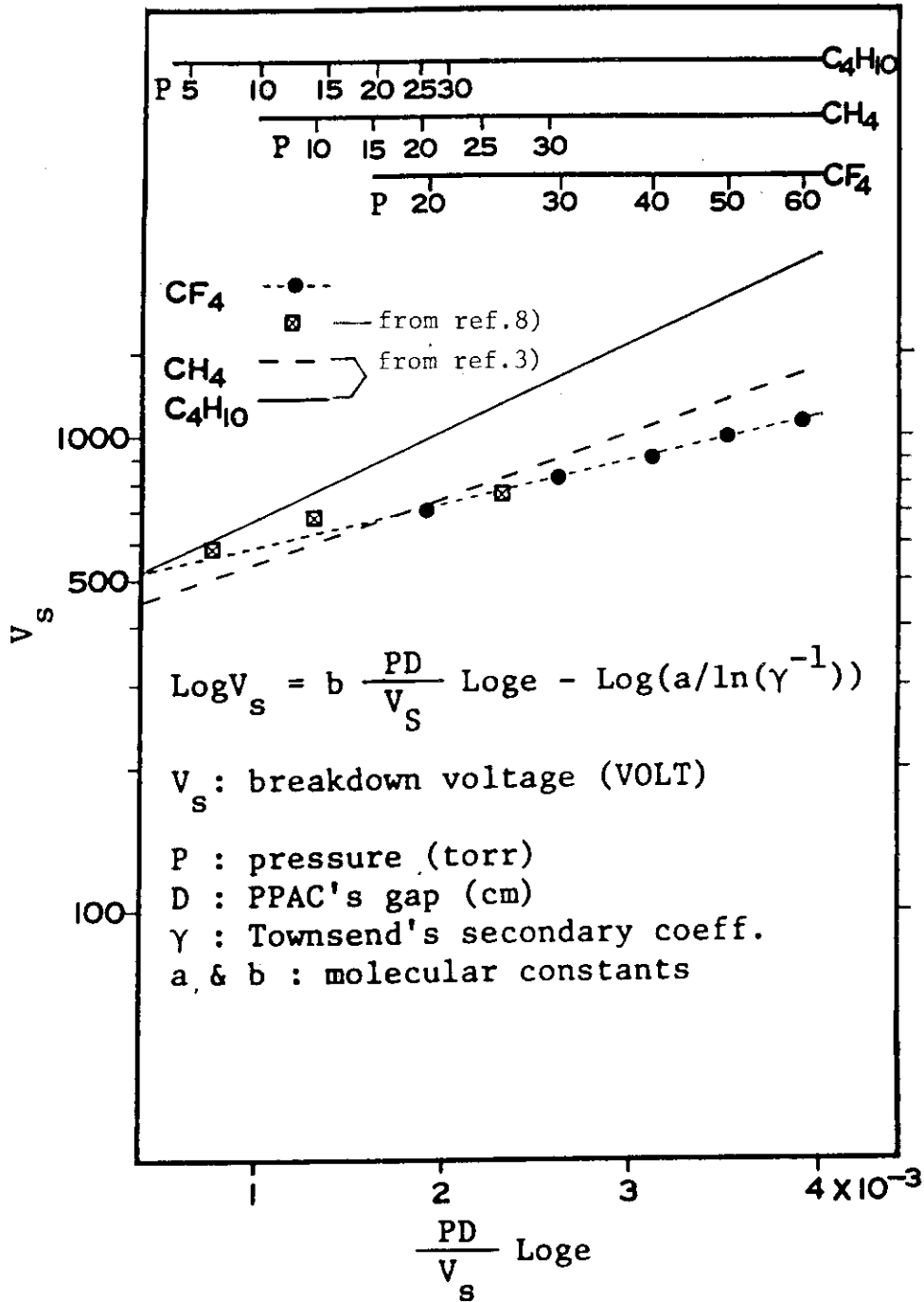


図14 PPACのCH<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, CF<sub>4</sub>ガスに対するLog V<sub>s</sub> - PD/V<sub>s</sub>の関係  
 V<sub>s</sub>ガスの破壊電圧 (VOLT) ; P, ガス圧 (torr) ; D, PPACの  
 ギャップ (cm), 0.16 cm ;

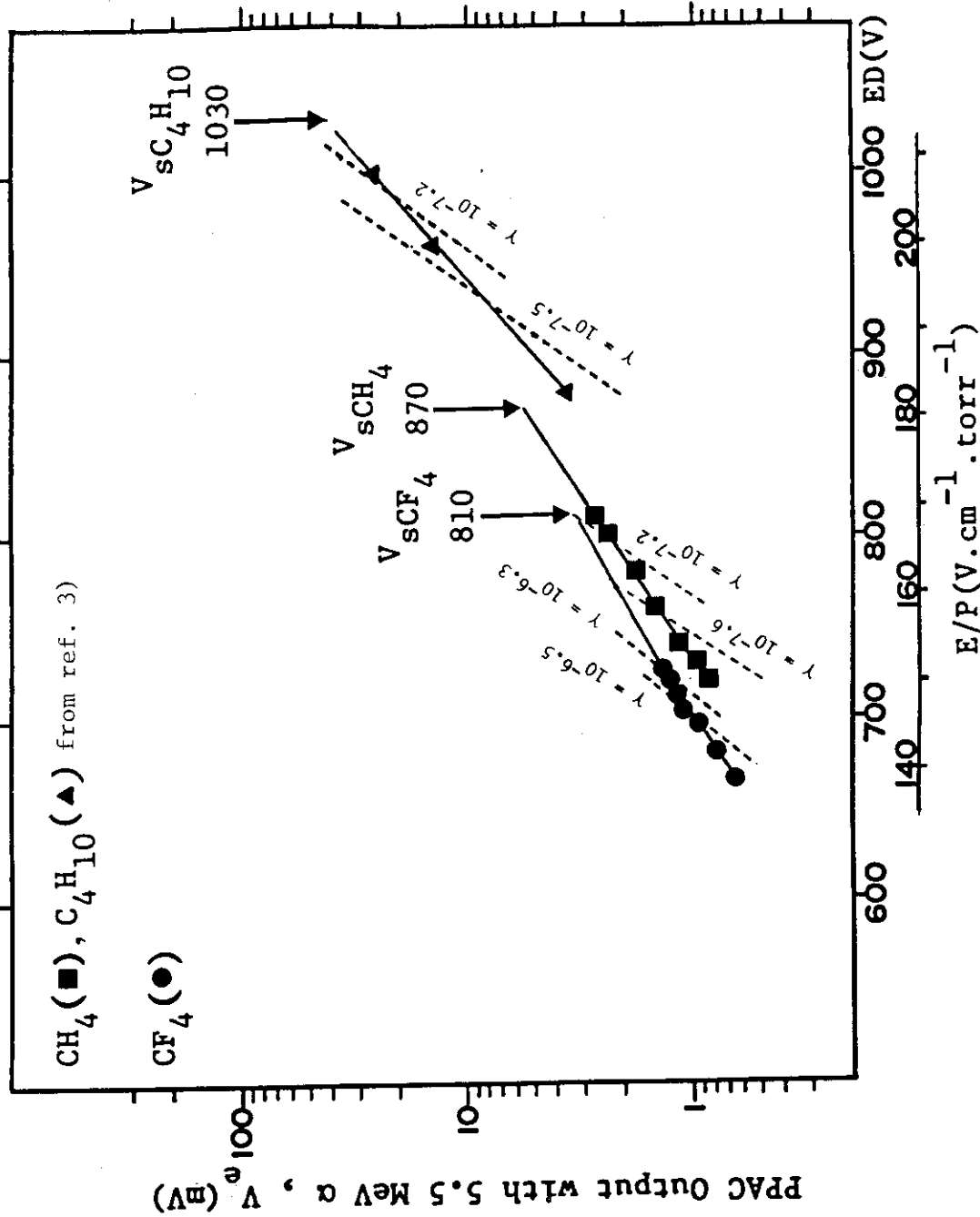


図15 P P A C の陽極出力の測定値と計算値の比較。各ガスに対する計算値は点線で示す。測定値と計算値の比較から推定された  $r$  の値は  $\text{CF}_4$  に対しては  $10^{-6.5} \sim 10^{-6.3}$  ,  $\text{CH}_4$  に対しては  $10^{-7.6} \sim 10^{-7.2}$  ,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  に対しては  $10^{-7.5} \sim 10^{-7.2}$  である。

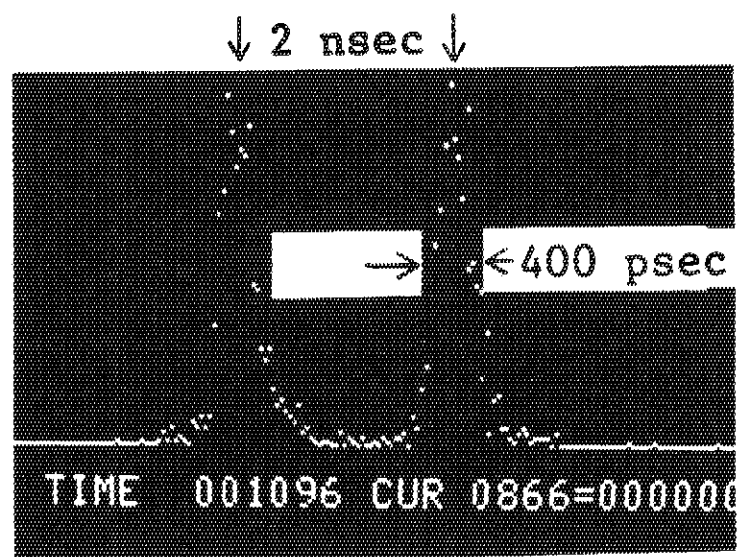


図16 1組(2個)のPPACに対するタイムスペクトル  
(PPACは両極薄膜導体の標準型, 両極間の距離は0.16 cm,  $P_{CF_4} = 60 \text{ torr}$ , ファースト・アンプ4段, 陽極電圧 = +1000 Vであり5.0 MeV  $\alpha$ 線による測定である)

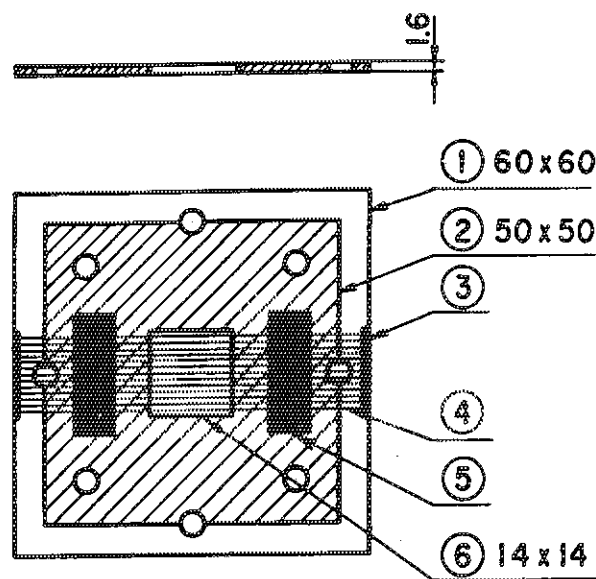


図17 芯線型電極。PPACの芯線陽極板の略図  
①電極枠(ガラスエポキシ樹脂, 1.6 mm厚), ②電極ベース(プリント基板銅部), ③芯線固定部(アラルダイト), ④芯線(金鍍金 $10 \mu\text{m}$ タングステン線), ⑤シルバーペーストによる芯線の銅部固定, ⑥電極出入口窓枠

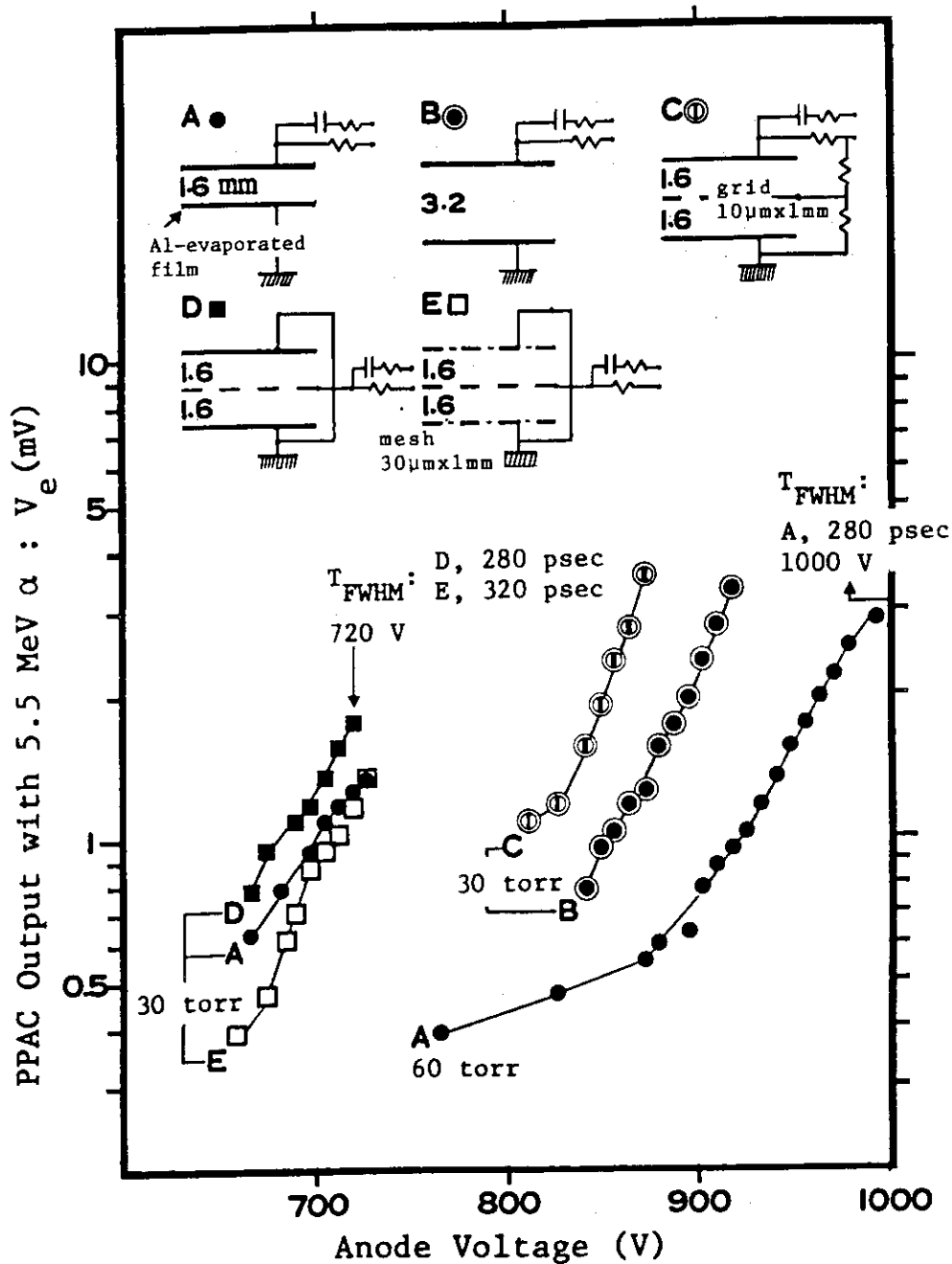


図18 CF<sub>4</sub>ガスに対する各種PPACの陽極出力の比較（A，Bは両極薄膜導体の標準型，Cは芯線を中間バイアスにしたBの変形型，Dは芯線陽極を持つBの変形型，Eは芯線陽極とメッシュ陰極のDの変形型である。5.0 MeV  $\alpha$ 線による測定である。）

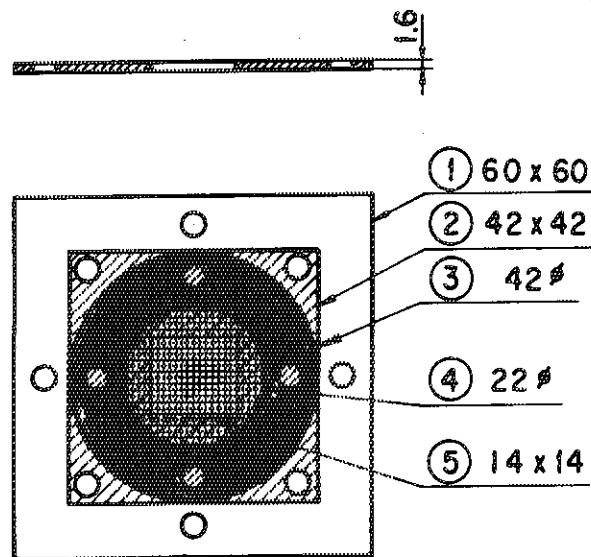


図19 メッシュ型陰極。芯線型陽極。PPACにおけるメッシュ型陰極板の略図

①電極枠（ガラスエポキシ樹脂，1.6 mm 厚），  
 ②電極ベース（プリント基板銅部），③メッシュ  
 枠外枠（SUS），④メッシュ板内枠（メッシュ  
 は1 mm × 1 mm，透過率98% SUS），⑤電極  
 ・出入口窓枠

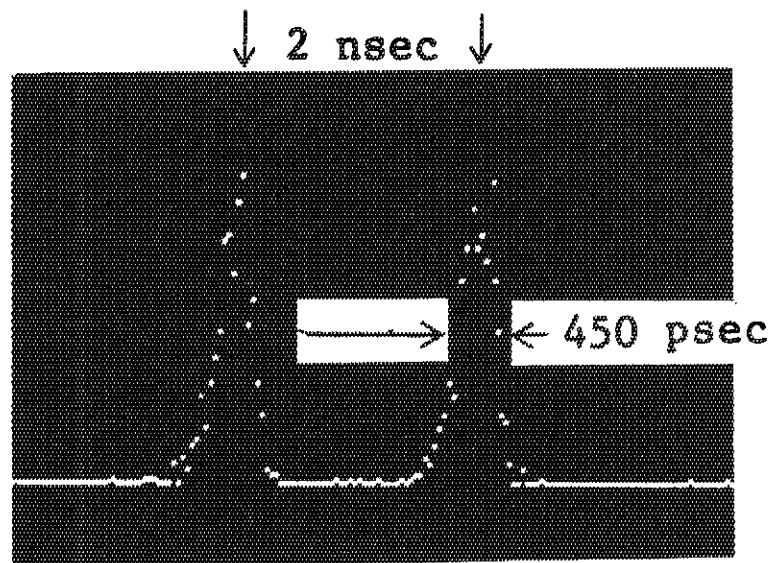


図20 1組（2個）のメッシュ型陰極。芯線型陽極。PPACに対するタイムスペクトル

（陽極出力のデータは図18にE型として記す。P<sub>CF<sub>4</sub></sub> = 30 torr，ファースト・アンプ4段，陽極電圧 = +720 Vであり，5.0 MeV α線による測定である。）