

修士論文

VENUS バレル・ストリーマー・チューブ
に使用する ガスのテスト

長島研究室
上林 俊之

要約

トリスタン加速器の VENUS 測定器に組み込まれた バレル・ストリーマーチューブに使用されるガスについて調査、研究した。特に、不燃性となるような混合ガス およびその混合比を考へてテストした。その結果、不燃性であり、ストリーマー・モードとなる混合ガスとしてアルゴン、二酸化炭素、イソブタン (31.2, 62.5, 6.3 %) が最適であることがわかった。

目次

第1章 序

1-1 トリスタン計画

1-2 VENUS 測定器

第2章 ストリーマー・チューブ

2-1 VENUS における バレル・ストリーマー チューブ

2-2 リミテッド・ストリーマー・モード

第3章 不燃性 混合ガス

第4章 アルゴン・二酸化炭素・イソブタン 混合ガス によるテスト

4-1 プラット・曲線及び信号の電荷量

4-2 検出効率

4-3 ドリフト・タイム

4-4 デッド・ゾーン

4-5 チューブ内圧変化

4-6 エイジング

4-7 VENUS における事象例

4-8 サンプリング・カロリーメータへの応用

第5章 その他の混合ガスによるテスト

5-1 アルゴン・二酸化炭素・エタン

5-2 アルゴン・二酸化炭素・n-ペンタン

5-3 X47-ル, エ71-ル

第6章 結論

付録

謝辞

参考文献

図表の説明

図, 表

第1章 序

1-1 トリスタン計画

今日、物質とその相互作用を研究する素粒子物理学の分野では、次のような考え方が、基本的描像として支持されている。

物質の基本的構成要素として、3つのクォークのダブレットが、クォーク (u, d), (c, s), (t, b) と、レプトン (ν_e, e), (ν_μ, μ), (ν_τ, τ) にあり、それらの間の相互作用を媒介する場の粒子として、グルオン、光子、 W^\pm , Z^0 等のボソンがある。また、クォーク、レプトン間の相互作用を記述するのは、強い相互作用では Q.C.D (量子色力学)、電磁相互作用と弱い相互作用では、ワインバーグ・サラム理論 (電弱統一理論) と呼ばれる理論である。

これを、"標準理論" と呼ぶ。現在のところ、この理論は、様々な実験を矛盾なく説明している。しかし、こうした理論も、実験的検証が不可欠である。

トリスタン (TRansposable Intersecting Storage Accelerators in Nippon) とは、筑波研究学園都市の北端にある高エネルギー物理学研究所 (K.E.K.) に建設された e^+e^- 衝突型加速器につけられた名称である。(Fig. 1-1) e^+ と e^- は、始め、ライナックで約 2.5 GeV (ギガ・エレクトロンボルト) まで加速され、次にアキュムレーターリングで蓄積され、

6.5 GeVまで加速される。その後、トリスタン・メイン・リングに入射され、このリングで、25 GeVまで加速される。加速された e^+ , e^- は、メイン・リング上に設けられた4つのコライディング・ポイント(富士, 筑波, 大穂, 日光)で衝突させられ、各点の測定器(venus, TOPAZ, AMY, SHIP)によって、 e^+e^- 衝突反応による生成粒子が捕えられる。この加速器建設の目標となる物理は多岐にわたるが、主なものは

- t (トップ) クォークの検出
- Higgs ボゾンの検出 (ref. 1)
- Z^0 の影響
- 次世代レプトンの検出 (ref. 2)
- Q.E.D. の検証
- Q.C.D. の検証
- 新現象の探索

などがある。いずれも多くの物理的内容を持っており、成功すれば、素粒子物理学は大きく前進することになる。

我々は VENUS 実験グループで研究を行っている。

1-2 VENUS測定器

VENUS (VErsatile Nlhep and Universities Spectrometer) は、 e^+e^- 反応による生成粒子を検出する測定器である。その概観を Fig. 1-2 に示す。先に述べた多くの目標のために、様々な現象を捕えなければならぬ。そのための汎用性が、この測定器に課せられた最大の要求である。このため、

- ① 荷電、中性粒子とも、ほぼ全立体角で検出できる。
 - ② 荷電粒子の運動量を精度よく検出できる。
 - ③ γ , e^\pm 等のエネルギーを精度よく検出できる。
- 等の性能を持たなければならぬ。

これらの要求を満たすために、VENUS測定器には次のような検出器群が用意された。以下に、名称と、主なはたらきを記す。(番号は、Fig 1-2 と対応している)

- ① インナー・チェンバー (Inner Chamber)
イベント・トリガー, 反応点 (vertex point) の決定
- ② セントラル・ドリフト・チェンバー (Central Drift Chamber)
粒子の飛跡決定 \rightarrow 荷電粒子の運動量測定
粒子トラックによる イベント・トリガー
- ③ TOF カウンター (Time of Flight Counter)
粒子の速度決定 \rightarrow 粒子識別
タイミングによる イベント・トリガー
- ④ アウター・ドリフト・チェンバー (Outer Drift Chamber)
粒子の飛跡決定
- ⑤ バレル・ストリーマー・チューブ (Barrel Streamer Tube)

鉛ガラス・カロリ-ータへの入射位置決定

⑥ バレル鉛ガラスカロリ-ータ (Barrel Lead Glass Calorimeter)

e, γ のエネルギー測定, 粒子識別, エネルギーによる
イベント・トリガー

⑦ ミューオン・チェンバー (μ -on Chamber)

μ 粒子の識別, 飛跡決定

⑧ リキッド・アルゴン・カロリ-ータ (Liquid Argon Calorimeter)

小角度 e, γ のエネルギー測定, 粒子識別

⑨ ルミノシティ・カウンター (Luminosity Counter)

ルミノシティ測定

なお、④と⑤の間に、②による運動量測定のため
に、超伝導ソレノイド電磁石が置かれ、この内側に

7.5 kG (キロガウス) の磁場をつくる。また、粒子識別

用に、トランジション・ラディエーション・ディテクター (Transition

Radiation Detector) が、②と③の間に設置される予定

である。これらの検出器群によって、生成粒子は、ほとんど
全て検出される。

これらのうち、ガス検出器は、①, ②, ④, ⑤, ⑦で
あるが、どれも可燃性ガスを成分に持つ混合ガスを用
いるため、検出器からのガス・リークがあった場合の安
全性が問題となる。

本論文では、このような動機から、バレル・ストリーマ
チューブ (以下 B.S.T. と記す) に用いるガスについて、不燃
性となる混合ガスを見出し、そのガスを用いて、チューブ
を運転した時の性能を調査・研究した結果を報告
する。

この後、2章では、ストリーマ・チューブについて、3章

では、混合ガスの安全性(不燃性)について、4章では、その混合ガスを用いた時のスプレー・チューブの諸性能について、5章では、その他の混合ガスについて、それぞれ述べてゆく。

第2章 ストリーマー・チューブ

2-1 VENUS における B.S.T.

B.S.T. は、超電導ソレノイド電磁石と、バレル・鉛ガラス・カロリメータの間に置かれ、荷電粒子を検出する。その主な役割は、

① 鉛ガラス・カロリメータに入射する荷電粒子の位置情報を与える。----- 鉛ガラスカロリメータは、1モジュール、 $12 \times 12 \times 35$ (約18 radiation length) cm^3 のブロックが、セクタワジオメトリ構造に5160ブロック並んでいる。(Fig. 1-2) この構造は、粒子がなるべく1モジュール内で止るように、しかも、ブロック間を通り抜けてしまわないように工夫された構造になっているが、それでも、ブロックの継ぎ目付近では出力信号が約1%程度変化する。(Fig. 2-1) この変化は、鉛ガラスカロリメータに要求されるエネルギー分解能 ($7/\sqrt{E} \pm 2\%$) に比べて無視できない大きさであるが、粒子の入射位置がわかれば補正可能である。B.S.T. は、この位置情報を与えることができる。

② 超電導ソレノイド電磁石内で、 e^+e^- を対創生した γ の飛来方向を決定する。----- 反応点から、鉛ガラスカロリメータまでの間で、 γ のうち、55~74% が e^+e^- を対創生する。(ref. 3) γ は、ソレノイドの内側の検出器では検出されず、 e^+e^- となった後、それが γ であったことがわかる。B.S.T. は、この e^+e^- を検出し、

γ の飛来方向を決定するはたらきをする。また、 e^+e^- を
対倉生しなからた γ と、他の荷電粒子が接近して
通過した時、それらを識別するための情報を与える。

B.S.T.は、Fig. 2-2に示すように、内径 16×11
 mm^2 、厚さ 1mm 、長さ 4.4m の炭素粒混入フラスチック
のチューブの中に、直径 $60\mu\text{m}$ の金ワイヤ・タンクステンワイヤ
を張った構造をしている。ワイヤは、 300g の張力で張られ
チューブ内では約 50cm おきにワイヤ支持具(スパーサ)
で支えられている。チューブの両端には、ガスチューブと、
リード・ワイヤの接続ポイントのための2つの穴のあいた
エンドキャップが取り付けられている。

このチューブが、上下2層合わせて75本で1セット
を構成し、全円周を合計16セットで覆っている。(Fig.
2-3) 1セットの上下2層は、Fig. 2-4のように、チューブ
半分だけずらして組み合わせてあり、 ϕ 方向の位置
分解能は、1本のチューブの幅の半分、約 8mm である。

リード・ワイヤからの信号は、O-STOS (Osaka
university Streamer Tube Operating System)
によって読み出される。このシステムは、高電圧分配器と、
ディスプレイを持って read-out card 部と、信号を
座標値に変換し、バッファに貯め、オンライン・コンピュータ
に渡すコントローラ部からなっており、1200本のリード
信号を圧縮し、コンピュータ (VAX 11/780) に渡すはたらき
をする。(ref. 4), (Fig. 2-5)

また、Fig. 2-3にあるように、B.S.T.の表面には、
カソード・ストリップが張られている。幅 25.4mm の銅製の

ストリップが、チューブの外側には斜め方向に134枚、内側には
リード・ワイヤと垂直方向に103枚張られており、これらの
ストリップに誘起される信号が、ADC (Analogue To
Digital Converter) で読み取られる。これにより、粒子
の Σ 方向(ワイヤ方向)の入射位置を決めることができ、
各ストリップに誘起される電荷量 q 比で入射位置を
決めるため、位置分解能は約2mmである。(ref. 5)

2-2 リミテッド・ストリーマ・モード

ガス検出器は一般に、金属性のワイヤを張った箱の中に、ガスを満たし、ワイヤに高電圧をかけて使用する。ワイヤの張り方、ガスの種類、印加電圧等を変えることにより、様々な目的に応じた検出器となるが、基本的には同じ原理に基づいている。すなわち、ガス中を通過した荷電粒子が、希ガス分子を電離し、電子・陽イオン対を作る。電子は、ワイヤに印加した電圧によってできている電場に沿ってワイヤに向かい、ワイヤの近くの強い電場によって電子なだれを起こして増幅される。この時、ワイヤの近くにできる陽イオンが、ワイヤから離れる時にワイヤに誘起される電荷をエレクトロニクスで信号として検出する。

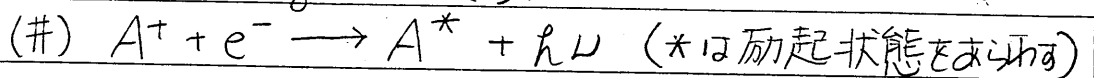
電子なだれの起き方は、印加電圧においていくつかのモードに分かれている。(Fig. 2-6) (ref. 6)

①の ionization モードは、電子なだれを起こさない特殊なモードである。このモードでワイヤに集められる電荷は、入射粒子によって電離した電子の数 (= 陽イオンの数) に等しい。

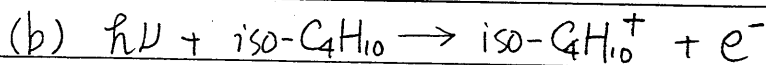
②の proportional モードでは、入射粒子によって電離した電子が、ワイヤの近くで、他のガス分子を電離するほどまで加速される。その結果、2次、3次...の電子・陽イオン対が生成され、電子なだれとなる。通常、比例計数管では、1次電子・陽イオン対の 10^6 倍程度に増幅された信号が観測される。この信号

は、1次電子・陽イオン対の数(すなわち ionization の量)に比例した大きとなる。

③ が B.S.T. で用いるリミテッド・ストリーマー・モード (Limited Streamer Mode) である。Fig. 2-6 では SQS (= Self Quenching Streamer = 自己消滅ストリーマー) モードと名づけてはいるが、同義である。このモードは、proportional モードより強い電場を与え、かつ、混合ガス中のクエンチャー成分(イソタン・エタン等)を増やすことにより現れる。このモードでは、単に、電子なだれが起きるだけでなく、次のような過程で、ワイヤーに、ストリーマーと呼ばれる電子とイオンの層を形成する。まず、電子なだれによってできる陽イオンの数が、あるしきい値を越えると、この陽イオンによって、ワイヤー表面の電場が打ち消されるようになる。(このしきい値は、ワイヤーの太さ、使用するガスの密度、印加電圧等によって変わるが、1次電離電子密度の逆数に比例する、という報告がある (ref.7)) その結果、電場が打ち消された場所の電子と陽イオンが再結合し、その時、光子を放出する。(Fig. 2-7-①)



光子のエネルギー $h\nu$ は、電子の運動エネルギーと、結合エネルギー α の和である。放出された光子は、電子なだれの、電子・陽イオンの雲から外へ飛び出し、近くのクエンチャーガスを電離する。



これは、(A) の過程で放出される光子のエネルギー $h\nu$ が、イソタン、エタン等で (b) の反応を起こし得ることに

よると考えられる。(逆に (b) の反応を起こしやすい物質をクエンチング・ガスとして選んだ。) こうしてできた電子は、再びアノード・ワイヤーに向かってドリフトしてくるが、今度は、初めにできた電子ただれによる陽イオンのコーン (Fig. 2-7-②) があり、ここは、他の場所より電場が強いため、電子はここに集まり、コーンの先に再び電子ただれを形成する。こうして、ストリーマーと呼ばれる電子と陽イオンの層がカソードに向かって形成される。(Fig. 2-7-③) この過程は、最後の光子が、ストリーマーの先端でクエンチング・ガス分子を電離するまで続く。以上のストリーマー発生機構のモデルは、Atac. (ref. 8) による。

この過程は、proportional モードより複雑であるが、より大きく、大きいサイズの出力信号が得られる。

④ の Geiger モードは、リミテッド・ストリーマー・モードと同程度の印加電圧で使用するモードであるが、ワイヤーの径、ガス成分等を変えて使う。このモードでは、リミテッド・ストリーマー・モードよりも、クエンチング・ガス成分を少なくすることにより、再結合による光子が、クエンチング・ガスに吸収 (電離) されにくくなり、1回の電子ただれにより、電子ただれがワイヤー全体に広がる。出力信号は、全て同じ大きさのものとなる。

最後に、リミテッド・ストリーマー・モードの利点として、

1) 出力信号が大きい。

→ 信号の増幅が不必要なため、回路が著しく簡略化される。

→ proportional モードに比べ、S/N比が著しく向上する。

2) 出力信号の大きさがそろっている。

→ 4-8節で述べるように、サンプリング・カロリメータとして使用する際の、エネルギー分解能の向上になる。

3) Geiger モードと違い、ストリーマーは局所化して、位置の情報が得られる。

などがある。また、ストリーマー・チューブとして使用する際には、構造が比較的簡単で、製作が容易であるうえ、安価な材料で作ることができるので、大量に作ることが可能である。そのため、我々の VENUS 検出器や、他にも、ハドロン・カロリメータ (ref. 9)、陽子崩壊実験 (ref. 10) 等の大規模実験に広く用いられている。

第3章 不燃性混合ガス

ガス検出器に使用するガスには、一般にクエンチングガスが必要である。特に、2章で述べたように、リミテッド・ストリーマーモードで使用する場合、ストリーマー形成過程において、クエンチングガスは重要な役割を果たしている。クエンチングガスは、分子の回転、振動などで、エネルギーを吸収しやすいものや、2-2の(b)式のような反応を起しやすい物質が選ばれる。この意味で、これまで非常によく用いられてきたイソブタン、あるいはエタンといった炭化水素は、よいクエンチングガスである。ところが、これらは、可燃性ガスである。

VENUSのような巨大検出器の場合、安全性の確保は重要な課題である。VENUSは、地下に設置されるため、検出器からのガス・リークがあった場合、ガスは実験ホール内に滞留しやすい。また、地震等の予期せぬ災害があった場合を考えると、二次災害を防止するという意味からも、可燃性の低いガスを使用すべきである。更に、B.S.T.の全容積は、およそ940ℓあり、そこに満たされる混合ガスは大量に必要である。このため、安価なガスを使うことが望ましい。

こういった理由から、不燃性で、(後に述べるように希釈効果が大きく)安価なクエンチングガスとして、二酸化炭素の使用が考えられた。ストリーマー・チューブに二酸化炭素を使う試みは、他の人々によっても行われていた。(ref. 9, 11, 12, 13, 14 etc.) これらのうち、いくつか

は、アルゴン・二酸化炭素・*m*-ペンタンという混合ガスをテストしているが、我々のB.S.T.では、*m*-ペンタンがチューブ材に悪影響を与えるため、この代わりにインブタンを使用することにした。

混合ガス $Ar/CO_2/iso-C_4H_{10}$ (インブタン) (以後、混合ガスを、このように記す) が、ある混合比で不燃性となることを次に示そう。Fig. 3-1は、空気に、二酸化炭素、窒素、アルゴンを加えた時のブタンの爆発限界を表わしたグラフである。(ref. 15) グラフの横軸は、空気への、 CO_2 、 N_2 、 Ar の添加量、縦軸は、空気と CO_2 、 N_2 、 Ar 等の混合大気中におけるブタンの爆発限界を表している。この図から、空気中に、こういった不燃性ガスを添加していくことにより、空気 + 不燃性ガス混合大気中の可燃性ガスの爆発上限界と下限界が一致し、混合大気は、その可燃性ガス(ここではブタン)に対して不燃性となる。これは、不燃性ガスを添加することにより、空気中の酸素濃度が低下するため生ずる希釈効果である。また、グラフから、この効果は、添加する不燃性ガスの種類によって異なり、二酸化炭素の希釈効果は、アルゴンよりも大きいこともわかる。

Fig. 3-2は、Fig. 3-1の横軸を、検出器に用いる混合ガスの成分として描き直したものである。(東海大学付属原子核研究所、奥野氏による (ref. 16)) (また、ブタンとインブタンでは、その爆発限界に大差はない。) 更に、アルゴンを1とした時、二酸化炭素を0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8の割合で混合したガスに対する爆発限界を、Fig. 3-2に内挿したものがFig. 3-3である。このグラフから、不燃性

性となる点での混合ガス中のイソブタン濃度を読み取り、その点で、アルゴンを1とした時のイソブタンと二酸化炭素の混合比をプロットしたものが、Fig.3-4である。これを見ると、アルゴンの混合比によらず、二酸化炭素とイソブタンの比がおよそ10対1の時、不燃性となることがわかる。

以上は、化学的不燃性を議論してきたが、法律的には、爆発下限界が10 vol%以下、あるいは上限界と下限界の差が20 vol%以上の気体を可燃性ガスと呼ぶ。

これらをもとにして、二酸化炭素とイソブタンの混合比を10対1と決め、これに、アルゴンを様々な比で混合したガスを使ってストリーマー・チューブを運転した。なお、二酸化炭素とイソブタンの混合比において、20対1、30対1等のCO₂の混合比の大きいガスについては、その成分に占めるイソブタンの割合が低下するため、リミテッド・ストリーマーモードが形成されにくくなる危険性がある。また、アルゴンを二酸化炭素に見合うだけ混合しないと、(アルゴン濃度が低いと)ストリーマーモードの利点である大きな信号が得られない可能性があるうえ、検出効率の低下につながる。更に、実機においては検出器からのガス・リークは非常に少なく、爆発限界点に近いとは言え、不燃性の領域に入っているのは、非常に安全である。これを考慮して、CO₂混合比の大きいガスもテストすべきであったが、ここでは、CO₂対 iso-C₄H₁₀ 10対1混合ガスをテストした。4章では、その実験と結果を述べる。

第4章 アルゴン・二酸化炭素・イソブタン混合ガス によるテスト

4-1 プラット-曲線及び信号の電荷量

実験に用いたチューブは、VENUSに組み込まれた臭機の約10分の1の長さ(44cm)のものである。長さ以外は臭機と同じものである。実験に用いた混合ガスは、Fig. 3-4で \times でプロットしてあるが混合比をTable 1に示しておく。(以下、本文中で、「混合ガス①、② --」等とあるものはTable 1に対応している。)

まず、Fig. 2-5において信号をディスクリミネートする直前にオシロスコープで見た波形をFig. 4-1に示す。各写真は、 ^{55}Fe から放射される5.9 keVのX線を照射した時に見られる波形である。(インピーダンス 50 Ω)

このように、アルゴンの混合比が増加(Fig. 4-1で、④ \rightarrow ①)すると、信号は大きくなってゆく。(信号の電荷量のグラフ Fig. 4-7, 8参照) 2章のストリーマー発生機構から考えて、このようになる理由として、アルゴンの混合比が増すことにより、電子なだれの規模が大きくなり、再結合により放出されるフォトンが増加することが考えられる。

次に、この信号を、ディスクリミネータに通し、一定時間に発生する信号の数をスケラで数えた。セットアップ図を、Fig. 4-2に示す。ワイヤーに印加する電圧を上昇させると、計数率は増し、やがて一定値をとるようになる。(プラット領域) この様子をFig. 4-3に示す。(なお、

ディスクリミネータのスレッシュホールド電圧は30mVに設定した。) 信号の写真から予想されるように、アルゴンの混合比の多い混合ガスほど低い印加電圧でプラトー領域に達している。プラトー領域の終りは、ワイヤーに流れる電流が1 μ Aになった時としている。当然、プラトー領域の終りも、アルゴン混合比の大きいガスの方が早い。また、プラトー領域におけるカウント数が、各混合ガスにおいて異なるのは、アルゴン混合比の変化に対応している。

(Fig. 4-4) このことは、照射されたX線が、アルゴン原子と相互作用し(光電効果)、1次電子を作っていることを示している。しかし、4-2でも述べるように、荷電粒子に対する検出効率、各混合ガスともほぼ100%に達しており、アルゴン濃度による検出効率の変化は、調査した範囲内では認められなかった。なお、Fig. 4-3の横軸は、印加電圧を測定時のキューブ内圧で割ったもの(effective high voltage)を取っている。このようにする理由は、4-5で述べる。検出器として用いる場合には、この、プラトー領域が長い方が安定した運転を期待できそうだが、ガス⑤のように、1.3kVものプラトー領域は、特殊な目的以外無意味であろう。位置検出器としては、実用上500V程度のプラトー領域があれば十分である。

次に、信号の電荷量を、Fig. 4-5のようなセットアップで、測定した。信号を増幅器で2つに分け、一方をディスクリミネータにかけ、(スレッシュホールド5mV) ADC (Analogue to Digital Converter) のゲート信号とし、他方を、ADCのアナログ信号とする。プラトー測定時と同様に、5.9 keVのX線を照射して信号の電荷分布を測定した

結果、Fig. 4-6 のような分布が得られた。ワイヤーへの印加電圧を上げてゆくに従って、プロポーションアルモード（ここでは、そのテイルと思われる）と、リミットド・ストリーマー・モードの混在する電荷分布（4-6-①）から、しだいにリミットド・ストリーマー・モードへ移行し、（4-6-②）やがてリミットド・ストリーマー・モードのみとなる。（4-6-③）更に電圧を上げてゆくと、電圧の高い側が尾を引き始め、（4-6-④）、2つめのピーク（第2 ストリーマー・モード）が現れ（4-6-⑤）、しだいに第2 ストリーマー・モードに移行し、（4-6-⑥）遂には第2 ストリーマー・モードが支配的となる。（4-6-⑦）これ以上印加電圧を上げると、プラトー曲線測定時と同様、 $1\mu\text{A}$ 以上の電流が流れ、測定は、そこで打ち切られた。

第2 ストリーマー・モードとは、再結合によるフォトンが多くなり、ストリーマーが2本形成されるようになるモードであると考えられる。（ref. 8）事実、第2 ストリーマー・モードのピーク位置の電荷量は、第1モードのおよそ2倍になっている。

Fig. 4-6は、混合ガス②によって得られたものであるが、他の混合ガスについても、このような電荷分布を測定し、分布のピーク位置（プロポーションアルモードのテイル）、第1及び第2 ストリーマー・モードに対応する）の電荷量をプロットしたものが、Fig. 4-7 である。信号の電荷量は、印加電圧の上昇に伴って指数関数的に上昇しており、電荷量を Q 、印加電圧を V とした時、 A, B を定数として、 $Q = e^{A \cdot V} + B$ という関係のあることを示している。（ガス②では、 $Q(\text{pC})$ 、 $V(\text{kV}/\frac{\text{cm}}{\text{mm}})$ とし、 $A \approx 20$ 、 $B \approx -30$ ）この近似は、印加電圧が低く、ストリーマーの動き始めた所ではあてはまらない。次に、アルゴンの混合比

α の増加に伴って信号の電荷量が増える様子を、Fig. 4-8に示す。アルゴン濃度が約30%未満では、電荷量は、ほぼアルゴン濃度に比例している。これは、アルゴンがX線と相互作用するので、アルゴン濃度によって、電子のどれの規模が決るためと考えられる。X線の代わりに、荷電粒子を用いても、一次電離電子は、主にアルゴンが放出するので、この傾向は変わらない。図中の3本のグラフは、それぞれ異なる印加電圧に対応している。(各 3.4, 3.6, 3.8 kV)

更に、これらの出力信号を、ストリーマモードの発達程度を表す示表量に直すことができる。これは、信号が、63.8% (正規分布の σ)の確率で、その中に入る電荷量の範囲(Q_{σ})を、その範囲内での信号の電荷量の平均値(\bar{Q}_{σ} 、正規分布であれば、ピーク位置になる)で割った値($Q_{\sigma}/\bar{Q}_{\sigma}$)として求められる。(その例を Fig. 4-6-③に示す) この値を、各混合ガスの各印加電圧について測定した電荷分布に対して計算し、グラフにしたものが Fig. 4-9である。この量は、信号の電荷量がそろっているほど小さくなる。Fig. 4-9で、各混合ガスとも、印加電圧が小さい時に、この量が大きいのは、プロホーショナルと、第1ストリーマの2つのモードが混在するためであり、第1ストリーマモードのみになると、この量は小さくなる。更に、第2ストリーマモードに移行する時、再び大きくなり、第2モードが支配的になると再び小さくなる。この過程は、どの混合ガスについても同じで、グラフは、どれも全く同じ形になっている。つまり、ストリーマの発達過程は、混合ガスによらず、この量でスケールすることができる。使用の際には、この量が小さくなる印加電圧での使用が望ましい。

4-2 検出効率

ストリーマー・チューブの検出効率を測定するために、Fig. 4-10のようなセット・アップを行い、宇宙線をカウントした。このセット・アップでは、5本のストリーマー・チューブを上・下2枚のシンチレータで挟み、上下のシンチレータから同時に信号が出た時(粒子が通過した時)ストリーマー・チューブが信号を出すかどうかを調べ、検出効率を測定するようにしている。従って、

$$\begin{aligned} \text{検出効率} &= \frac{(\text{上下のシンチレータ及びストリーマー・チューブから信号が出た事象数})}{(\text{上下のシンチレータから信号が出た事象数})} \\ &= \frac{(\text{Fig. 4-10でスケラ②のカウント数})}{(\text{Fig. 4-10でスケラ①のカウント数})} \end{aligned}$$

として定義する。なお、Fig. 4-10下に、シンチレータ(の2枚のAND信号)と、ストリーマー・チューブ(の5本のOR信号)を、AND回路に入れるタイミングを示す。ここにあらかじめ時間のゆらぎは、チューブ内での電子のドリフト・タイムの幅を表わしている。

測定結果をFig. 4-11に示す。どの混合ガスも、プラトー領域では、およそ $97 \pm 1\%$ の検出効率に達している。これは、チューブ壁等の影響を考慮すれば、ガス中を通過した粒子についてはほぼ100%の検出効率があると言ってよい。なお、プラトー領域の高圧側の終りは、チューブ5本で $1\mu\text{A}$ の電流が流れ始めた点としている。

また、標準的な混合ガスである、アルゴン・イソブタン(50, 50%)についても、プラトー領域で、 $Ar/CO_2/iso-C_4H_{10}$ の各混合ガスと同じ、およそ97%の検出効率を示した。(Fig.4-11で 亜)

4-1 及び 4-2 節の結果から、

- ・ 高電圧供給、信号の読み出し回路等を考慮して、なるべく低い印加電圧で大きな信号が得られる。
- ・ 検出器として安定に運転するのに十分なプラトー領域がある。(各チューブの個体差等を考慮して、約400V以上)
- ・ ほぼ100%の検出効率がある。

等の性能を持つ不燃性の混合ガスとして、混合ガス② ($Ar/CO_2/iso-C_4H_{10} = 1/2/0.2$) を採用することにした。

4-3 ドリフト・タイム

ストリーマー・チューブ内を、荷電粒子が通過した時、粒子は、チューブ内のガス分子(主に希ガス成分)と相互作用し、その分子を電子とイオンに電離する。この電子が、リードワイヤーまで到達するのに要する時間を、ドリフト・タイムと呼ぶことにする。これは、実質的に、粒子がストリーマー・チューブを通過してから、信号が出力されるまでの時間であり、信号を読み出す際のタイミングを考える時に必ず考慮しなければならない。

測定は、Fig. 4-12のように、ストリーマー・チューブのFにシンチレータを置き、チューブの上方からβ線を照射して行ったシンチレータからの信号をスタート信号とし、(シンチレータは、粒子が通過してから信号を出すまでの時間がほぼ一定である)ストリーマー・チューブからの信号をストップ信号として、2つの信号の時間間隔をTDC (Time to Digital Converter) で測定した。また、使用ガスは、実際に使用する混合ガス②を用いた。

その結果、Fig. 4-13のような時間間隔の分布を得た。これは、チューブ内部での電子のドリフト・タイムを表わしている。この時間分布から、チューブの壁付近で電離した電子がワイヤーに達するまでに、およそ520 msec. (ナノ秒) がかかることがわかる。(時間分布がこれより長時間側に分布しているのは、チューブ内の、より電場の弱い場所(角の付近)で電離した電子によるものと思われる。)このことから、信号の読み出しの際に必要なゲート

幅は、およそ 520 msec. 程度にしてあげばよい。しかし、
実機においては、トリスタン加速器の性能として、 $2.5 \mu\text{sec.}$
(マイクロセカンド) に 1 回の割合で、VENUS 測定器内で
電子と陽電子の束が正面衝突するように調整されて
いるので、もう少し長いゲートをかけてもよく、また、先にも
述べたように、チューブ内の角付近を粒子が通過した場合
のことも考慮して、 $1 \mu\text{sec.}$ のゲート幅に設定されている。

次に、照射した β 線が、チューブのコリネートした領域
に、一様に入射していると仮定すると、(チューブ上面から、
 β 線源までの距離が 60 cm, チューブの幅が 16 mm で
あることを考慮すると、チューブの端から β 線源を見込む
角が 89.2 度となり、悪い仮定ではない。) Fig. 4-13
の時間分布を使って、チューブ内の電場と、電子のドリフト
速度の関係を導くことができる。(付録 1) この関係を
Fig. 4-14 に示す。ガス中での電子のドリフト速度は、
一般にガスの種類によって異なるが、アルゴン及び
二酸化炭素中では、電子のドリフト速度は遅い。(Fig.
4-15) (ref. 17, 18)

4-4 デッド・ゾーン

ガス検出器では、アノード・ワイヤーに電子なだれが生ずることによって信号を検出することが可能となるが、同時に、陽イオンがワイヤーの近くに生じるため、(space charge) 効果が、ワイヤーから遠ざかる間、電子なだれが生じた点の近くの電場が弱まり、ワイヤー上において、ある長さが不感領域となる。(デッド・ゾーン) 陽イオンが十分遠ざかれば、電場は再び電子なだれを起こすほどまで回復し、不感領域は消滅する。信号がワイヤー上に誘起されてからここまでの時間を回復時間あるいはデッド・タイムと呼ぶ。

ストリーマー・チューブにおいて、ワイヤー上に生ずるデッド・ゾーンが、信号を出力してからの時間とともに減衰する様子を self-coincidence 法で測定した。(ref. 19) この測定法のセット・アップ°を Fig. 4-16 に示す。アノード・ワイヤーからの信号を(ディスククリミネータを通した後) 2つに分け、一方の信号を T 秒だけ遅らせ、他方はそのまま、2つの信号を AND 回路に通す。その出力信号を数えることにより、信号が出力されてから、 T 秒後のデッド・ゾーンを測定することができる。なお、チューブの上方には、 β 線源を置き、チューブ上には、鉛で、幅 2cm だけ β 線が通るようにコリメートした。この測定の実験原理を次に述べる。

一般に、幅 τ_1 秒と τ_2 秒を持ち、それぞれ f_1, f_2 Hz でランダムに送られてくる2つの信号がある時、それらを AND 回路に通すと、その出力計数率は、 $f_1 f_2 (\tau_1 + \tau_2)$ Hz

となる。さて、今、Fig. 4-16において、2つの分けた信号の幅を l 、毎秒のカウント数を f Hzとすると、もしデッド・ゾーンがなければ、AND回路からの出力信号(N_0 とす)は、 $N_0 = 2lf^2$ (Hz)となる。しかし、デッド・ゾーンが生じていると、これらのうち何個かはカウントしなくなるので、AND回路からの出力信号数は、 N_0 より小さくなる。いま、ワイヤに信号が出力されてから t 秒後のデッド・ゾーンを $\delta(t)$ cm、その時のAND回路の出力信号数を $N(t)$ また、チューブ上のコリキータの幅を l cmとすると、これまでの議論から、

$$\text{(\#)} \quad \frac{N_0 - N(t)}{N_0} = \frac{\delta(t)}{l} - \left(\frac{\delta(t)}{2l}\right)^2$$

という関係のあることを導くことができる。(付録2) この関係を使って、 N_0 及び $N(t)$ を測定することによって $\delta(t)$ を決めることができる。

このようにして求めたデッド・ゾーン $\delta(t)$ を、Fig. 4-17に示す。印加電圧は3.7 kV、混合ガス②で測定した結果である。信号が生じた時、ワイヤ上の約5 mmが不感となり、その後デッド・ゾーンは減少し、約200 μ sec.で回復している様子がわかる。実機においては、ヒストンのビームが出始めた当初のB.S.T.の計数率が、およそ1 Hz/cmであり、上記程度のデッド・ゾーンは問題にはならない。

Fig. 4-18は、ワイヤ上の印加電圧を変えた時、デッド・ゾーンが変化する様子を表わしている。(混合ガスは、

Ar/CO₂/iso-C₄H₁₀ = 20.2/62.5/17.3(%)を使用)このように、テッド・ゾーン及びテッド・タイムは、印加電圧を上げることにより、逆に減少している。(ref.19)このことは、電場の強い場合に生じる電子ただれが、電場の弱い場合に生じる電子ただれよりも、狭い範囲で起っている(密度が大きい)ことを表わしている。また、印加電圧の高い方が、陽イオンがワイヤから遠ざかる時間が短くなるためにテッド・タイムも短くなると考えられる。

他の種類の混合ガスによる測定も行った。使用した混合ガスを Table 2 に示す、ガスによるテッド・タイムの変化を、成分に占めるアルゴンの割合でプロットした図が Fig. 4-19 である。成分中のアルゴンの混合比が増すと、テッド・タイムが長くなる傾向がある。

4-5 チューブ内圧変化

ガス検出器では、一般に、検出器内に満たすガスの圧力によって信号の電荷量が変化する。これは、電子むねの増幅度が、ガスの圧力によって変化するためである。

ストリーマー・チューブにおいて、この様子を調べるために、チューブからのガスの出口にバルブを取り付け、これによってチューブ内のガスの圧力を変化させ、信号の電荷量を測定した。(Fig. 4-20) (混合ガスは、 $Ar/CO_2/iso-C_4H_{10} = 20.2/62.5/17.3(\%)$) を使用) その結果を、Fig. 4-21に示す。グラフが示すように、チューブ内ガスの圧力が高くなると、出力信号の電荷量は減少する。この結果から、大気圧が、最大 $\pm 100 \text{ mb}$ 変化すると仮定すると、信号の電荷量の変化は $\pm 55\%$ である。従って、現実の実験に使用する際には、これだけの大気圧の変化があっても信号がスレッシホルドを下回らないように印加電圧を十分高く設定しておけばよい。混合ガス②の場合では、スレッシホルドを 30 mV とした時、(50Ω loadで) それに対応する電荷量は 33 pC (セコロン) となり、信号が -55% となっても、これ以上の信号を出力するような印加電圧は、($33/0.55 = 60 \text{ pC}$ とする印加電圧) Fig. 4-7から 3.64 [kV/(器)] 以上に設定しておけばよいことがわかる。

さて、プロポーショナル・モードにおいては、信号の増幅率は、その点の電場を、検出器内のガスの圧力で割った値(有効電場)に依存している。(ref. 17) ストリーマー・モードにおいても、この関係があることを次に示そう。

Fig. 4-22 は、Fig. 4-21 において、横軸を、印加電圧の代わりに、印加電圧をチューブ内圧で割った値 (effective high voltage) にしたものである。このグラフを見ると、Fig. 4-21 では、チューブ内圧によって異なっていた出力信号の電荷量の曲線が、ほぼ一本にまとまり、チューブ内圧の変化が打ち消されている。従って、このようなグラフから、逆に、大気圧を測定して、信号の大きさが一定となるように印加電圧を変化させるようなシステムを作ることも可能である。しかし、B.S.T. の場合、位置検出器であるため、出力信号の大きさの絶対値はそれほど重要ではないので、(カード読み出し法も、各ストリップの電荷量の比で位置を決定する) 先にも述べたように、気圧の変動によって出力信号がスレッシュホールドを下回らないように印加電圧を設定しておけばよいことになる。実機では、検出効率のプロット曲線 (Fig. 4-11) の立ち上がりを考慮して、印加電圧を 3.7 kV に設定した。

4-6 エイジング

ガス検出器では、長期間の使用により、ワイヤ表面の劣化（ケミカル・ガス成分である炭化水素の重合物の附着等 ref. 20, 21）により、検出感度の悪化や、カレント・リーク現象などが起こる。このような、検出器を持続的に運転した時に生ずる変化をエイジング効果と呼ぶ。VENUSのように、長期に渡って運転される測定器にとって、エイジングは重要な問題である。

ストリーマー・チューブについて、このエイジングの効果を Fig. 4-23 に示すセット・アップで測定した。β線源 (^{106}Ru) より照射される β線 を鉛で 2mm にコリメし、チューブ上の 1点（照射点と呼ぶ）に照射し続け、一定時間毎に信号の電荷量及び計数率を測定した。なお、比較のために、照射点から約 10cm 離れた点（比較点と呼ぶ）での電荷量及び計数率を、照射点に照射を始める前と、照射終了後に測定した。

β線照射時の計数率は約 440Hz、ワイヤの印加電圧は 3.7kV、1信号あたりの電荷量は約 55 pC、使用混合ガスは混合ガス②である。

この計測の結果を、Fig. 4-24, 4-25 に示す。Fig. 4-24 は、横軸に単位長さあたりの積算電荷量とし、1信号あたりの電荷量と、計数率、およびワイヤに流れた電流の変化の様子である。どれも 1.7×10^{15} electrons/mm まで信号を受けた所で急激に変化

していることがわかる。この変化を、信号の電荷分布の変化で見たものが、Fig. 4-25である。照射前の電荷分布が、Fig. 4-25-①であり、 1.67×10^5 electrons/mm 照射後の電荷分布が ② である。ここまでは、信号の電荷分布は、ほとんど変化していないが、Fig. 4-24に見られる急激な変化のあった後には、③のように、OPC 附近の信号の数が圧倒的に増加している。これは、粒子が通ったにもかかわらず、信号を出さなかったことを示している。なお、照射点に、このような変化が起った後でも、比較点では、ほとんど何の変化も起っていない。(Fig. 4-24の★印のプロットでそれを示す。) 更に、この実験は、照射点を変え、印加電圧を3.6 kVにして行ったが、前回と同様に、約 1.7×10^5 electrons/mm の点で急激な変化があった。

このように、突然電流が流れ、計数率が低下する原因として、ワイヤ表面に、炭化水素などの重合物質が附着することが考えられる。(ref. 20, 21, 22) 特に、ストリーマー・モードの場合、プロポーションアル・モードに比べて電子当たりの規模が大きいのので、こうした物質が作られやすいとも考えられる。また、一旦そのような附着物がワイヤ表面に付くと、その部分が不感領域となったり、逆に放電を起しやすくなることもあり得る。この原因を調べるため、エイジング・テスト後、チューブを解体し、照射点を金属顕微鏡で観察した。その写真を、Fig. 4-26に示す。Fig. 4-26-①は、印加電圧3.6 kVで行った実験によるもので、ワイヤ表面がギガギガになっているのがわかる。比較のために、同じワイヤの別の位置での

写真を②に示す、こちらは、表面は平坦である。③は、
 ①を拡大したものである。表面がでこぼこしている
 ようであるが、何かが附着しているかどうかは判全しない。
 ④は、印加電圧3.7kVで行った実験の照射点の
 ワイヤである。黒い斑点状のものが附着しているように
 見える。また、このワイヤでは①のような表面のギガギガ
 は見られなかった。③および④との比較のために、
 ⑤に新品のワイヤの写真を添えておく。

更に、この実験は、標準的な Ar₅₀-CaH₁₀ (50,
 50%) 混合ガスについても行った。その結果、急激な
 変化は、約 5.2×10^{15} electrons/mm の点で起り、
 混合ガス②より3倍長く稼働した。

して、混合ガス②の寿命は、B.S.T. 全体で、どれ
 だけになるだろうか。e⁺e⁻衝突実験開始当初、加
 速器調整中であり、また、ビームパイプ内の真空度が
 悪いため、ビーム・ガス・イベントが多い状況で、全ワイヤ
 (1200本) に流れた電流が、約 20μA であった。この
 ことから、 1.7×10^{15} electrons/mm の寿命は、

$$\frac{1.7 \times 10^{15} \text{ elec./mm}}{\left(\frac{20 \times 10^{-6} \text{ C/sec.}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C/elec.} \times 4 \times 10^3 \text{ mm} \times 1200 \text{ 本}} \right)} \approx 6.54 \times 10^7 \text{ sec.}$$

とする。して、e⁺e⁻ビーム衝突の年間通算時間を、
 約1500時間とすると、これは約12.1年に相当し、
 チューブ全体ではこれだけの寿命があることになる。

4-7 VENUSにおける事象例

VENUS測定器は、1986年11月から稼働を始めた。B.S.T.も運転を始め、信号を出しているのので、ここでその例を紹介する。

① バーバー散乱

バーバー散乱とは、 e^+e^- 衝突の結果、終状態に e^+e^- が生成される反応である。Fig. 4-30-①は、この反応をVENUS測定器が捕えた例で、衝突時の e^+e^- の重心系エネルギーは、48 GeVである。セントラルドリフトチェンバーが e^+e^- の2本の飛跡を、バレル鉛ガラスカロリ-Xタが2つの粒子のエネルギーを、それぞれ検出している様子がわかる。同図右上を拡大したものが、Fig. 4-30-②である。電子が通過した場所のB.S.T. 2本が信号を出しているのがわかる。

② ハドロン生成反応

Fig. 4-31は、 e^+e^- 衝突によって、ハドロン(クォークによって構成されている粒子)が、上方と下方の2つのジェットとなって生成された事象である。検出器は書き込まれていないが、鉛ガラスカロリ-Xタのエネルギー値の直前に書き込まれた点がB.S.T.の信号を表している。

③ 宇宙線

VENUSでは、 e^+e^- 衝突実験に先だって、宇宙線を検出するテストが行われた。Fig. 4-32-①は、宇宙線粒子が、上方から下方へ検出器を通過した例である。これも、Fig. 4-32-②に示すように、B.S.T.が信号を出しているのがわかる。

4-8 サンプリング・カロリメータへの応用

本節は、VENUS測定器のB.S.T.とは直接関係しないが、ストリーマー・チューブを、サンプリング・カロリメータに応用する際に信号の電荷分布の広がりが問題となるので、その解析・考察について述べる。

高エネルギー粒子が、物質と相互作用する時に、シャワー現象を起すことがある。この性質を利用して逆に入射粒子が、シャワーを起すように物質を置き、シャワーにおいて生成される粒子を検出して、入射粒子のエネルギーを決めるのが、シャワー・カロリメータである。これには、電磁シャワーを検出するものと、ハドロン・シャワーを検出するものがあるが、どちらに対しても、Fig. 4-27のように、鉄、鉛、ウランなどのコンバータと検出器を交互に重ねて層構造にしたサンプリング・カロリメータを使って入射粒子のエネルギーを測定できる。なお、これとは別に、VENUSにも使われている鉛ガラスカロリメータのように、鉛ガラス内で電磁シャワーを起し、そのチェレンコフ光の光量を測定して入射粒子のエネルギーを決める一体型のカロリメータもある。さて、サンプリング・カロリメータの検出器には、シンチレータが用いられることもあるが、ストリーマー・チューブのような、ガス検出器を用いることもある。このように、サンプリング・カロリメータの検出器にガス検出器を使用したものを、ガス・サンプリング・カロリメータと呼ぶ。サンプリング・カロリメータは、大量のコンバータを使用できるため、ニュートリノビームによる実験 (ref. 23)

や、コンバータ自身の中で起こるかもしれない、陽子崩壊の検出実験 (ref. 10) などによく用いられる。

さて、ref. 13 によると、LEP (Large Electron Positron collider) の OPAL 検出器に組み込まれるハドロン・シャワー・カロリメータに、プラスティック・ストリーマー・チューブが用いられるが、OPAL も VENUS 同様、巨大かつ地下設置検出器のため、安全性確保の問題があり、不燃性ガスの使用が要求された。そこで、様々な不燃性ガスによってストリーマー・チューブを運転しその電荷分布が調べられた。ストリーマー・モードを使った、ガス・サンプリング・カロリメータの場合、信号の電荷分布の広がり、エネルギー分解能を決める上で重要である。電荷分布の広がりが小さく、信号の大きさがそろっているほど、エネルギー分解能は向上する。OPAL グループの調べた混合ガスは、(アルゴン/エタン/イソプロパノール), (アルゴン/エタン/エタール) 等の混合ガスであるが、いずれも、検出効率が十分高くなる印加電圧では、電荷分布が広がってしまい、十分なエネルギー分解能が期待できなかったため、これらの混合ガスの使用を断念している。彼らは、電荷分布の広がり (σ と呼ぶ) を、電荷分布のピークの FWHM (Full Width Half Maximum) の $1/2.35$ をピーク位置で割ったものとして定義しており、検出効率がよく使用可能な印加電圧領域では、この σ が大きくなってしまい (>30%) 第2ストリーマー・モードの形成が始まり、電荷分布に長いテイルが現れるために使用できないとしている。彼らの電荷分布は、宇宙線粒子によって測定されたものであり、我々の測定は、 ^{55}Fe

による 5.9 keV の X 線 によつて行われたという違いはおぼろが Fig. 4-6 (およびその他の混合比による電荷分布) から、彼らと同じ方法でのを求めてみたものが、Fig. 4-28 である。これを見ると、混合ガス ① ~ ④ のいずれもの $\approx 7\%$ に達しており、また、Fig. 4-3 と比較して見ると、どの混合ガスにおいても、計数率のプロット領域に入っていることがわかる。(Fig. 4-28 下) 更に、Fig. 4-6 での最小となる印加電圧の近くでの電荷分布 (例として混合ガス ② では、Fig. 4-6-④) を見ると、第 2 ストリーマーモードの形成はほとんど見られず、テイルも長くはない。このことを、彼らのテストしたガスの一つである Ar/CO₂/イソプロパノール (24.3/72.7/3%) と比較したものが、Fig. 4-29 である。上図の ϵ は、4-2 節で述べたおなじ検出効率を表わしている (彼らの場合、 χ - γ 壁のため 100% にはなっていない) 下図 (混合ガス ② によるもの; Fig. 4-6 と同じ) には、X-100 が ⁵⁵Fe の X 線を照射した時に計数率のプロット領域にあることを示し、Cosmi-96 等は、Fig. 4-11 の検出効率をあらわしている。このように、混合ガス ② では、十分な検出効率に達する印加電圧をかけても、信号の大きさは、たいへんよくそろっている。これだけの条件を満たせば、ハドロンカリー-X γ に用いられるストリーマー・チューブにも、Ar/CO₂/iso-C₄H₁₀ 混合ガスは、非常に有効であると考えられる。

第5章 その他の混合ガスによるテスト

5-1 アルゴン・二酸化炭素・エタン

A/CO₂/iso-C₄H₁₀ (イソブタン) 混合ガスによる試験の他にも若干の種類混合ガスを用いたテストを行ったので、その結果をここに記す。まず、Ar/CO₂/C₂H₆ (エタン) について、計数率のプラト-曲線および、信号の電荷量の測定を行った。使用した混合ガスの混合比を Table 3 に示す。(測定法は、4-1節と同じである) C₂H₆ (エタン) は、iso-C₄H₁₀ (イソブタン) よりも、炭化水素原子の数が少ないので、ワイヤ-表面、あるいは、チューブ-壁面にあいて重合した分子を作りにくく、同じ混合比であれば、爆発性も低く、安価であるという利点があるが、エタンがガスとしてのはたらきがイソブタンよりも小さいため、その混合比を増さなければならぬ。そのため、不燃性混合ガスとしての使用は困難になると考えられる。Fig. 5-1, 5-2, 5-3 に、各々、信号の形、計数率のプラト-曲線、信号の電荷量のグラフを示す。

5-2 アルゴン・二酸化炭素・n-ペンタン

この混合ガスは、3章でも述べたように、他にも研究しているグループがある。VENUS の B.S.T. でも、当初、この混合ガスでの運転を予定し、テストを行った。しかし、ペンタンがチューブ材に及ぼす悪影響^① (チューブの変形等、

のため、使用を断念した。ここでは、このテストの結果を簡単に記す。

ペンタンは、Fig. 5-4 に示すように、恒温槽に入れ、チューブに入る手前で Ar/CO₂ 混合ガスをペンタン中でバブルさせることにより混合した。混合ガス中のペンタンの混合比は、恒温槽内の温度におけるペンタンの蒸気圧で決まる。(混合時の温度は、熱電対を、混合するガラスコイルに入れ、モーターした。) こうして作られた混合ガスを用いた時の計数率および信号の電荷量の印加電圧による変化を測定した。なお、ペンタン混合時の温度と、混合ガス成分の混合比を Table 4 に示す。

Fig. 5-5, 5-6, 5-7 に信号の波形、計数率のプラト曲線、信号の電荷量の変化をそれぞれ示す。これを見ると、ペンタンの混合時の温度を 0°C 付近で運転する場合、計数率がプラト領域に達する点の印加電圧が、温度変化により ±50V (各チューブの個体差程度) 変化してもよいとすると、ペンタンの温度を ±2.5°C 以内に調節すればよいことがわかる。この実験を行った時には、ペンタンの温度は、±0.5°C 以内に調節可能であった。

5-3 X47-1L, X71-1V

① Ar/CO₂/CH₂(OCH₃)₂ (X47-1L)

X47-1L は、Alekseev らにより、Ar/CH₄/X47-1V 混合ガスがテストされている。(ref. 6) ここでは、Ar/CO₂/X47-1L (18.4/64.3/17.3 (%)) を用いて測定を行った。

x4-1Lの混合方法は、ハンタンと同様にし、フラスコでバブルさせて混合した。(0°Cで混合) Fig. 5-8, 5-9に計数率および、電荷量の印加電圧による変化を示す。どちらも、実用上問題はないが、爆発性、チューブへの悪影響、毒性などを考慮すると、使用しない方がよい。

② Ar/CO₂/CH₃OH (x7-1L)

アルコール類は、クエンキング・ガスとしてよく用いられている。アルコールのうち、最も原子数の少ない x7-1L を使ってみた。これも、他の液体有機物質同様、恒温槽内のフラスコで、Ar/CO₂ 混合ガスをバブルさせることにより混合し、混合時温度は、0°C 及び 9°C の2種類についてテストした。各温度での混合比を、Table.5 に示す。Fig. 5-10, 5-11に、x7-1L 混合温度 0°C の時の計数率及び電荷量を、Fig. 5-12, 5-13に 9°C の時のものを各々示す。この混合ガスでは、スリーマー・モードを一心は形成するが、プラトー領域は狭く、実用上有利とは言えない。

第6章 結論

VENUS, B.S.T. に満たす混合ガスとして、 $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (イブタン) = 31.2/62.5/6.3(%) を使用した際の ストリーマー・チューブの性能を調査した結果

1. 不燃性

2. リミット・ストリーマー・モードとなる領域が広い (約600V)

3. ほぼ100%の検出効率がある。

4. 5mm, 200マイクロ秒の不感領域がある。

5. 気圧変化による検出効率の低下は、実用上問題とはならない。

6. 寿命は、約 1.7×10^{15} electrons/mm である。

等の性能を持つことがわかった。特に、不燃性の点で、他の混合ガスでは得られない安全性を有した混合ガスである。従って、トリスタン等の大型加速器で 사용되는実験装置や、陽子崩壊実験等の、地下深くで行われる実験装置に、ストリーマー・モードを利用した検出器を組み入れる場合、最適な混合ガスであると言える。

謝 辞

本論文の完成にあたり、その機会を与えて頂き、
多くの御指導をして頂きました長島順清教授、
並心なみこころに杉本章二郎 助教授に心から感謝します。

また、多くの有益な助言をして下さった本間
康浩 助教授 (神戸医短大)、鈴木洋一郎 助手、
直接、実験の御指導をして頂いた幅淳二 助手
に心から感謝します。

更に、2年間を通じて多くの有益な議論と
助言を頂いた、山口慶剛氏、長部均氏、紙谷拓哉氏、
山下俊弘氏、上月登喜男氏、坂本静生氏、兼松伸平氏、
塚本良哉氏、今村哲也氏、金行健治氏、船越久司氏、山本
浩之氏その他長島研究室の皆様と、栄久晴氏 (神戸大)
北条義文氏 (神戸大) の皆様に心から感謝します。

最後に、顕微鏡を貸して下さったバンデクグラフの
高橋(豊)氏、写真撮映に協力して頂いた、榊田研究室の
関高宏氏に感謝します。

付録 1. 時間分布から、ドリフト速度への変換。

Fig. 4-13 は、粒子が、キューブ上に、一様に照射して居るという仮定をおくと、キューブ内の一次電離電子のドリフト速度に読み直すことができる。また、Fig. 4-13 で、時間の早い事象ほどワイヤーの近くからドリフトして来たと考えられるから、事象数を積算してゆくことにより、縦軸を、ワイヤーからの距離に直すことができる。(Fig. A-1) 距離と時間の関係がわかれば、この曲線を適当な関数にあてはめ、(ここでは t の 5 次関数とした) その微分係数をとることにより、その点での電子のドリフト速度を求めることができる。(Fig. A-2)

一方、キューブ内の電位は、計算に求めることができる。(電気鏡像法を使った。) (Fig. A-3) キューブ内のある点での電場は、これを微分して求められる。このようにして求めた電場と、先に求めたドリフト速度の関係をプロットしたものが、Fig. 4-14 である。

付録 2. デッド・ゾーンの関係式の導出

4-4節の(##)式は、次のように導かれる。まず、Fig. A-4で、①のように、生成されるデッド・ゾーンが、コリメートした範囲(l)内に入っている場合はその時刻で、 l のうち、 δ だけ不感になっているので、トータルで、 N_0 計数するうち、 $N(t)$ しか計数しなかったならば、

$$\frac{N_0 - N(t)}{N_0} = \frac{\delta}{l}$$

となるのであるが、Fig. A-4で、②のように、デッド・ゾーンが、 l の外にまで広がる場合、 l の範囲内で不感になっている領域は、 $x + \delta/2$ (x は、コリメータの端から、デッド・ゾーンの中心までの距離)となっている。従って、このような端における交効果を考慮すると、実質的に、 l のうちで不感になっている割合は、Fig. A-5の台形の面積であることがわかる。これを計算すると、

$$\begin{aligned} \frac{N_0 - N(t)}{N_0} &= \left[2x \int_0^{\frac{\delta}{2}} \left(\frac{\delta}{2l} + \frac{\delta}{l} \right) dx + \frac{\delta}{l} (l - \delta) \right] / l \\ &= \left[\frac{3}{l} \left(\frac{\delta}{2} \right)^2 + \frac{\delta}{l} (l - \delta) \right] / l \\ &= \frac{\delta}{l} - \left(\frac{\delta}{2l} \right)^2 \end{aligned}$$

となり、(##)式が導かれる。

参考文献

- ref. 1 紙谷 拓也 修士論文 (1986)
- ref. 2 山下 俊弘 修士論文 (1986)
- ref. 3 VENUS Collaboration, Proposal for Study of e^+e^- Relations with a Large Aperture Spectrometer Jan. 31, 1983
- ref. 4 坂本 静生 修士論文 (1987)
- ref. 5 永野 宏 修士論文 (1985)
- ref. 6 G. D. Alekseev et al, Nuclear Instruments and Methods (以下 NIM と記す) 177 (1980) 385-397
- ref. 7 N. Koori et al, NIM A243 (1986) 486-494
- ref. 8 M. Atac et al, NIM 200 (1982) 345-354
- ref. 9 M. G. Catanesi et al, NIM A 247 (1986) 438-444
- ref. 10 G. Battistoni et al Phys. Lett. 118 B (1982) 461-465
- ref. 11 V. M. Golovatyuk et al. NIM A 236 (1985) 300-306
- ref. 12 P. Rapp NIM A 244 (1985) 430-433
- ref. 13 C. De Clercq et al, NIM A 243 (1986) 77-85
- ref. 14 You Tie-Jian et al, NIM A 252 (1986) 77-85
- ref. 15 柳生 昭三 Ca^{2+} の蒸気の爆発限界 (安全工学協会)
- ref. 16 奥野 英城 BDC のガスについて INSTOPAS (1986)

ref. 17 F. Sauli Principles of Operation of
Multiwire Proportional and Drift Chambers
CERN 1977

ref. 18 G. Schultz et al, NIM 151 (1978) 43-431

ref. 19 G. Battistoni et al, NIM 164 (1979) 55-66

ref. 20 K. Kwong et al, NIM A 238
(1985) 265-272

ref. 21 M. Turala et al, NIM 205 (1983) 141-144

ref. 22 J. Vavra NIM A 252 (1986) 547-563

ref. 23 D.H. Perkins Introduction To High Energy
Physics (1982) P. 70

図の説明

Fig. 1-1 トリスタン全景図

1-2 VENUS測定器断面図

2-1 鉛ガラス・カロリ-X-タの、モジュールの継ぎ目におけるゲインの降下 (ref. 3 による)

2-2 ストリーマー・チューブ構造図

2-3 左 B.S.T 1セット, 右 16セットで全円筒を覆っている様子。

2-4 B.S.T. 断面図

2-5 B.S.T. の信号読み出し回路概略図

2-6 ガス検出器における電子ただれのモード図 (ref. 6 による)

2-7 リミット・ストリーマー発達の描像 (ref. 8 による)

3-1 空気 - アルゴン, 二酸化炭素, 窒素雰囲気中における、イソブタンの爆発限界 (ref. 15 による)

3-2 検出器に用いられるガス中のイソブタン濃度に対する、イソブタンの爆発限界図 (ref. 16 による)

3-3 アルゴンと二酸化炭素の混合比を変えた時の不燃性に転じるイソブタン濃度点の変化。

3-4 二酸化炭素とイソブタンの混合比による可・不燃の境界。(アルゴン=1のときのものを) BM¹¹テストした混合ガスの点

Fig. 4-1	Ar/CO ₂ /iso-C ₄ H ₁₀ 各種混合ガスによる スリ-マー・チューブの信号の写真。
4-2	計数率測定のためのセット・アップ°
4-3	Ar/CO ₂ /iso-C ₄ H ₁₀ 各種混合ガスの計数 率のプラト-曲線 (5.9 keV X線照射, スリッ ホールド電圧 30 mV)
4-4	Fig. 4-3 のプラト-領域での計数率と、混合 ガス中のアルゴン濃度の関係
4-5	信号の電荷量測定のためのセット・アップ°
4-6	Ar/CO ₂ /iso-C ₄ H ₁₀ 各種混合ガスによる、各 印加電圧での信号の電荷分布。
4-7	Ar/CO ₂ /iso-C ₄ H ₁₀ 各種混合ガスによる、信号 の電荷量の、印加電圧による変化
4-8	混合ガス中のアルゴン濃度と、信号の電荷量の 関係。(3種印加電圧 3.4, 3.6, 3.8 kV/($\frac{cm^2}{cm^2}$)に於て)
4-9	Q_0/\bar{Q}_0 による、電荷分布のスケリング°
4-10	検出効率測定のためのセット・アップ° <input type="checkbox"/>
4-11	Ar/CO ₂ /iso-C ₄ H ₁₀ 各種混合ガスの、検出 効率のプラト-曲線
4-12	ドリフト・タイム測定のためのセット・アップ° <input type="checkbox"/>
4-13	Ar/CO ₂ /iso-C ₄ H ₁₀ (1/2/0.2), 印加電圧 3.7 kV におけるドリフト・タイムの分布
4-14	電場と、ドリフト速度の関係。
4-15	純ガスにおける電場とドリフト速度の関係 (ref. 17による)
4-16	テッド・ゾーン測定のためのセット・アップ° <input type="checkbox"/>
4-17	Ar/CO ₂ /iso-C ₄ H ₁₀ (1/2/0.2) のテッド・ゾーン BUI°

デッド・タイム

Fig. 4-18 印加電圧によるデッド・ゾーン及びデッド・タイムの変化

4-19 混合ガス中のアルゴン濃度と、デッド・タイムの関係。

4-20 チューブ内圧変化による信号変化の測定のためのセット・アップ図

4-21 チューブ内圧変化による信号変化 (Ar/CO₂/iso-C₄H₁₀ = 20.2/62.5/17.3% による)

4-22 Fig. 4-21 の横軸を、有効電場にとった図

4-23 エイジング測定のためのセット・アップ

4-24 エイジング効果、積算電荷量と、信号の電荷計数率、電流の関係

4-25 積算電荷量と、信号の電荷分布の変化

4-26 エイジング実験後のワイヤーの顕微鏡写真。(①~⑤は、本文参照)

4-27 サンプリング・カロリメータの例 (ref. 111による)

4-28 電荷分布のσ値。および、その Fig. 4-3 との対応。

4-29 OPAL グループのテスト例との、電荷分布の比較

4-30 VENUS が、バーバー散乱を検出した例

4-31 VENUS が、ハドロン生成反応を検出した例

4-32 VENUS が、宇宙線を検出した例

5-1 Ar/CO₂/C₂H₆ (17.2/54.3/29.4%) 使用時の信号の写真。

5-2 Ar/CO₂/C₂H₆ 各種混合ガスにおける計数率のプロット-曲線

Fig. 5-3 Ar/CO₂/C₂H₆ 各種混合ガスによる信号の電荷量 q の印加電圧による変化

5-4 m-ペンタン混合のためのガス・システム図

5-5 Ar/CO₂/m-ペンタン (25.4/50.8/23.8%) 使用時の信号の写真

5-6 Ar/CO₂/m-ペンタン、m-ペンタン各種温度における計数率のプラット曲線

5-7 Ar/CO₂/m-ペンタン、m-ペンタン各種温度における信号の電荷量 q の印加電圧による変化

5-8 Ar/CO₂/x41-1L (18.3/64.3/17.3 (0°C)%) 使用時の計数率のプラット曲線

5-9 同混合ガスにお信号の電荷量

5-10 Ar/CO₂/x41-1L (1/3.6/0.18 (0°C)) 使用時の計数率のプラット曲線

5-11 同混合ガスにお信号の電荷量

5-12 Ar/CO₂/x41-1L (1/3.6/0.3 (9°C)) 使用時の計数率のプラット曲線

5-13 同混合ガスによる信号の電荷量

A-1 ワイヤからの距離と、ドリフト・タイムの関係

A-2 ワイヤからの距離と、ドリフト速度の関係

A-3 チューブ内の電位の様子 (電気鏡像法による計算)

A-4 脚式 (1) の右辺第2項の原因。

A-5 ワイヤ上で、不感になる割合。

Table 1. 実験に使用した、Ar/CO₂/iso-C₄H₁₀
各種混合ガスの混合比

2. デッド・ゾーン測定に用いた各種混合ガス
の混合比

3. Ar/CO₂/C₂H₆ 各種混合ガスの混合比

4. Ar/CO₂/m-C₅H₁₂ (ペンタン) 各種混合ガス
における m-ペンタンの温度と混合比

5. Ar/CO₂/CH₃OH (xタール) 各種混合ガス
における xタールの温度と混合比

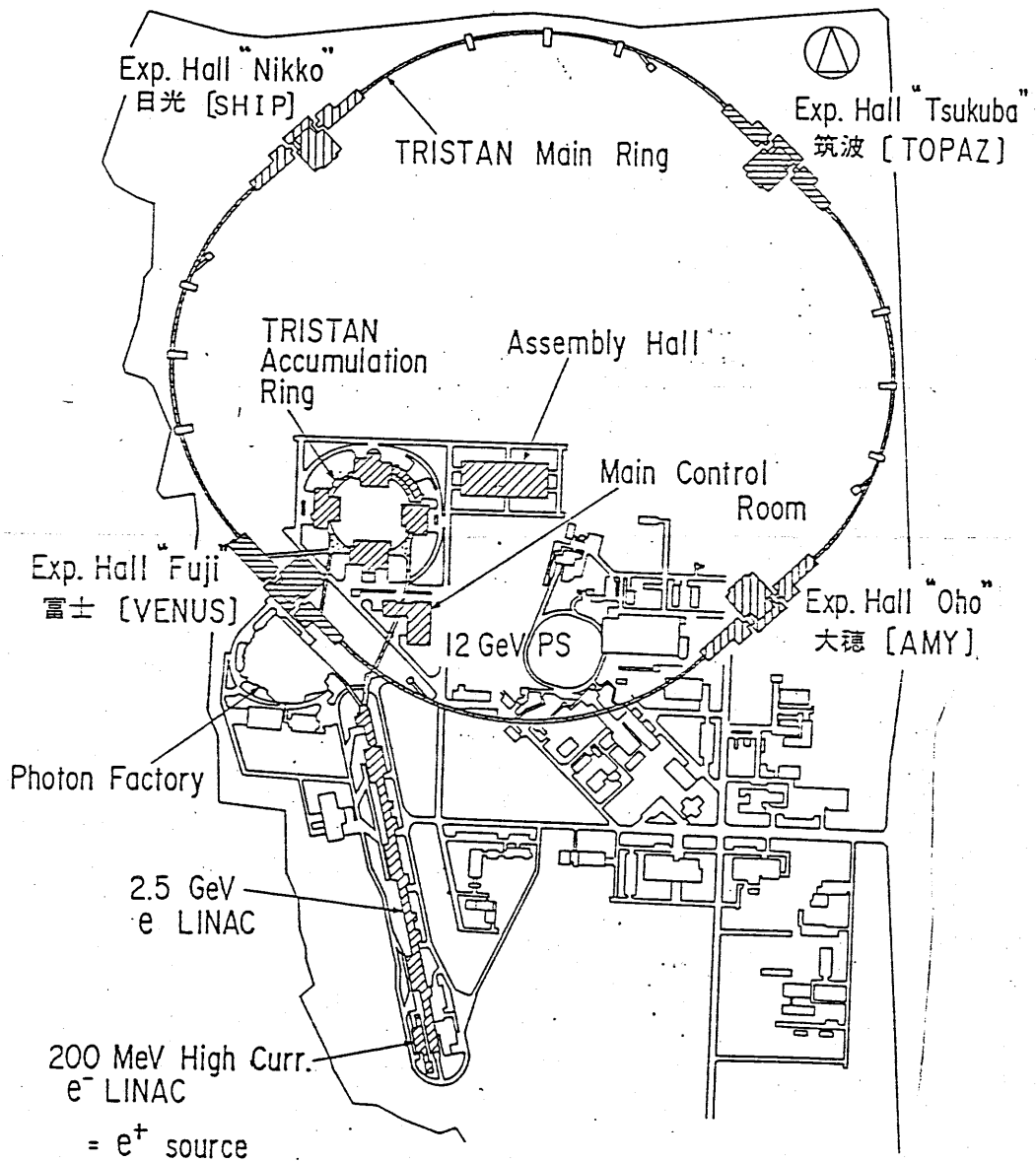
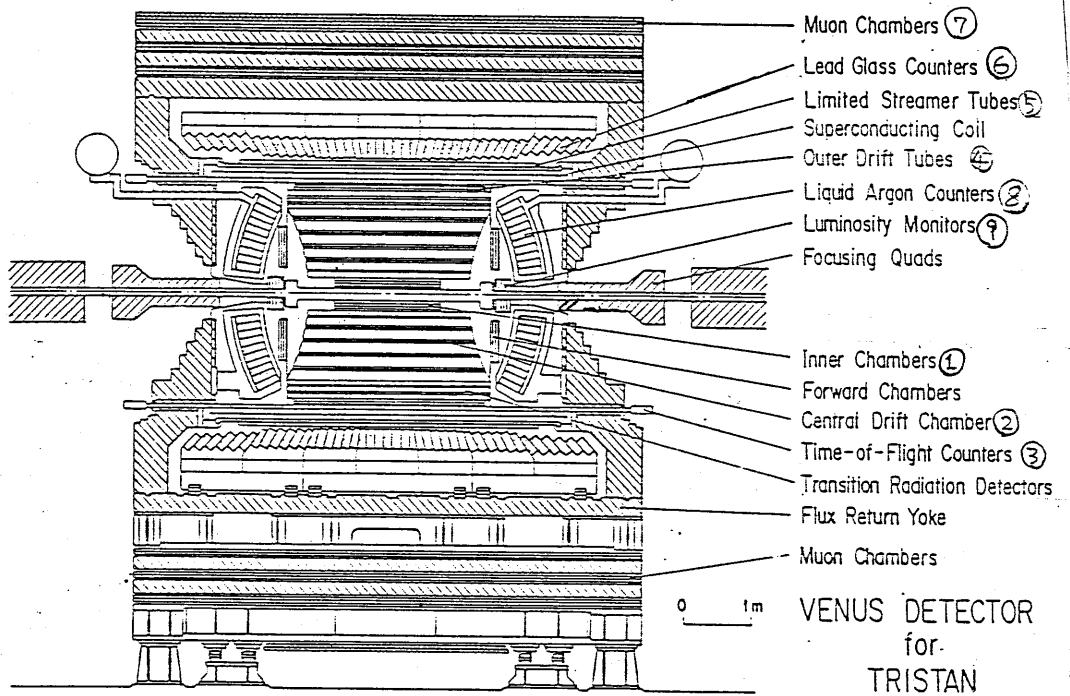


Fig. 1-1



Cross sectional view of the VENUS detector.

ref. K. Ogawa et al. / The VENUS calorimeter

Nucl. Instr. and Meth. A243 (1986) 55-66

Fig. 1-2

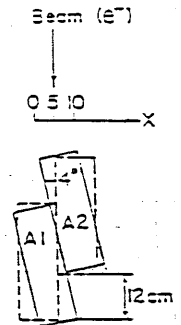
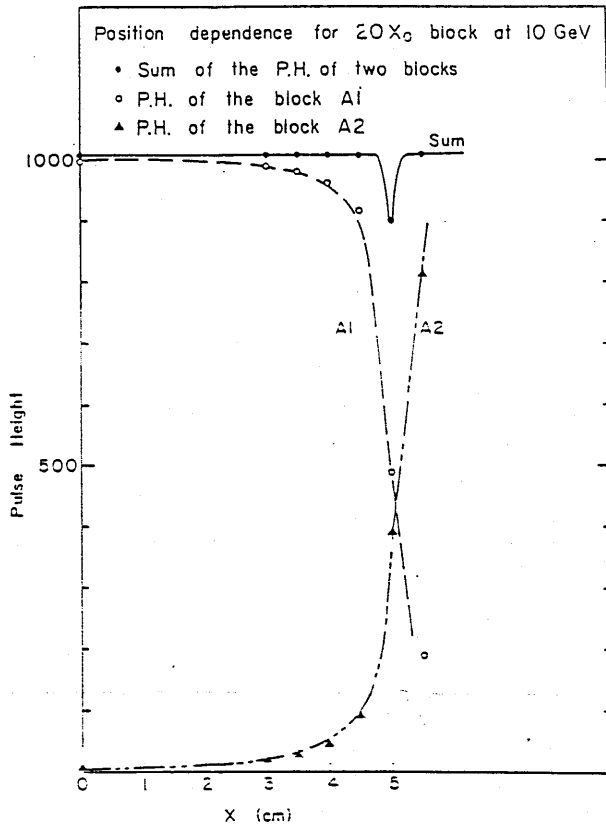
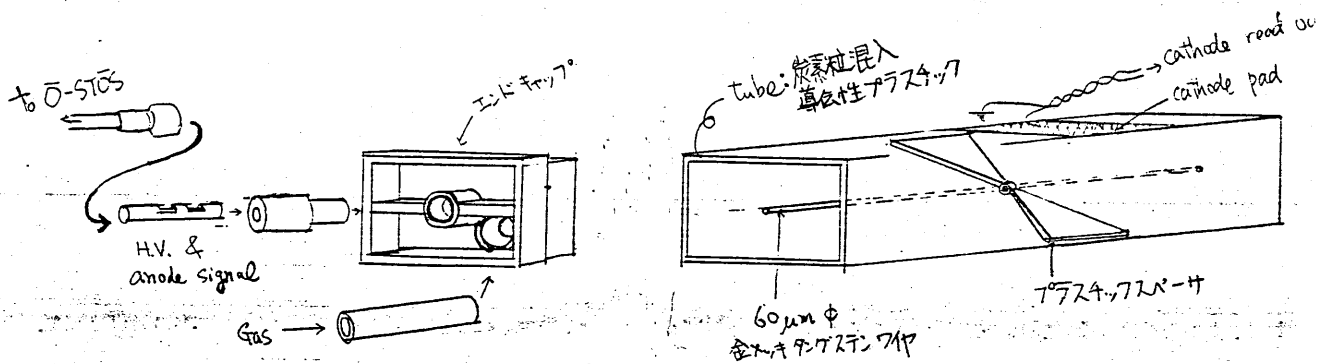


Fig. 2-1

Fig. 2-2



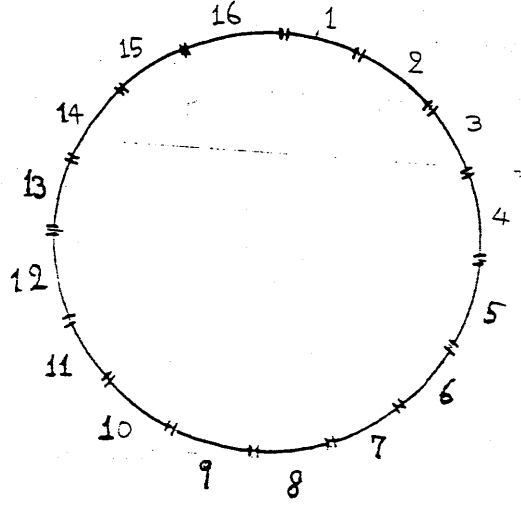
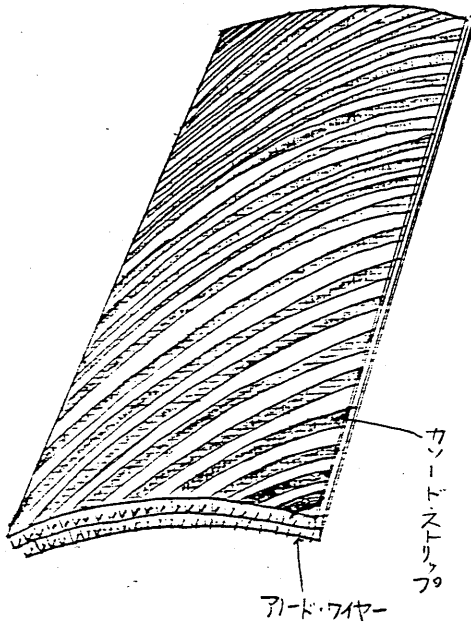
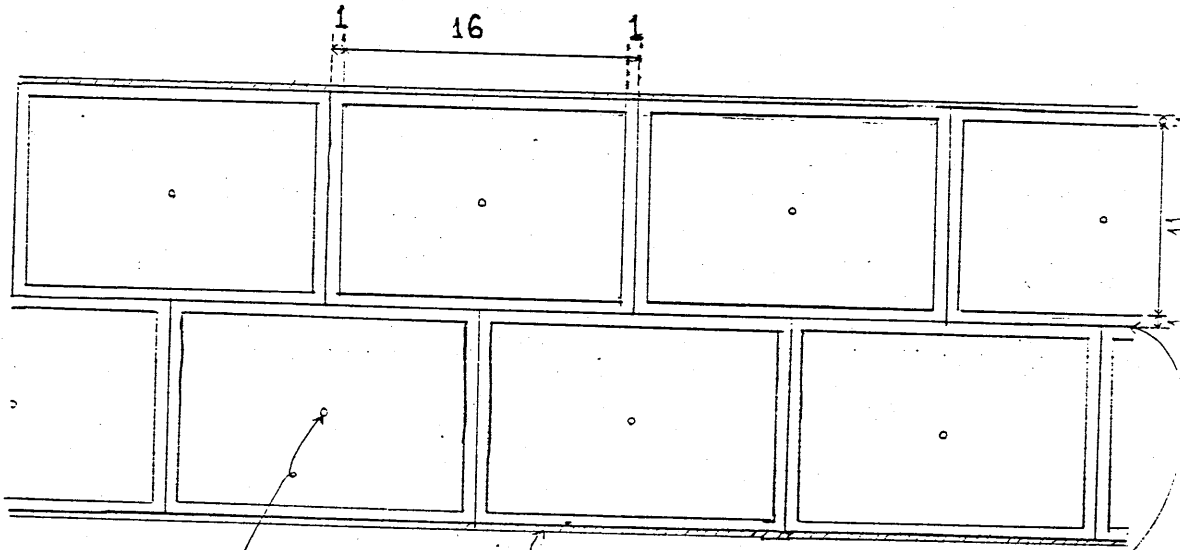


Fig. 2-3



アノード・ワイヤ
金メッキ・9-グステン
60 μ m ϕ

カソード・ストリップ

AL ZnIV

Fig. 2-4

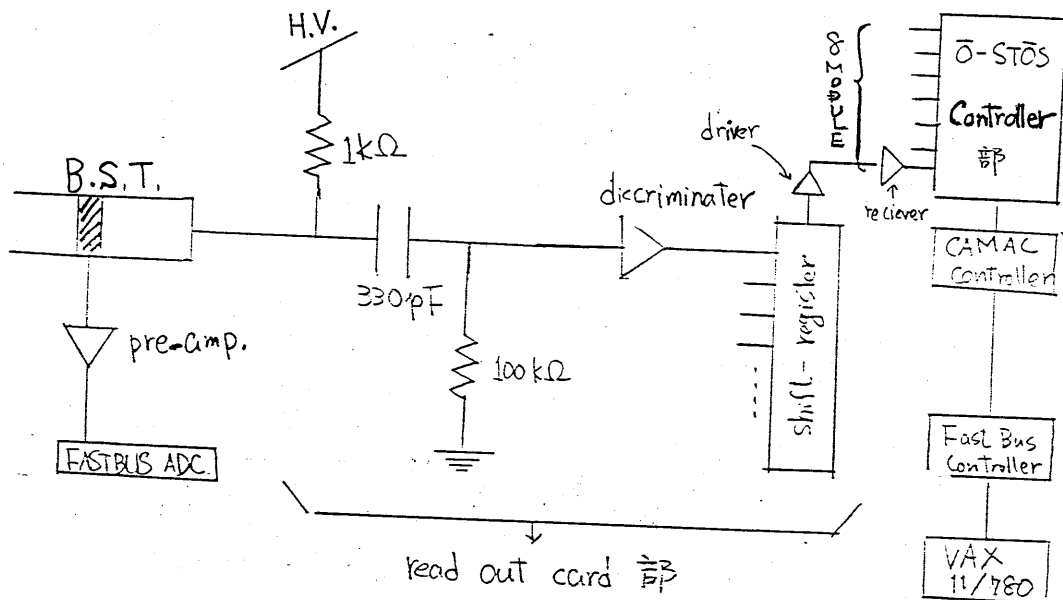


Fig. 2-5

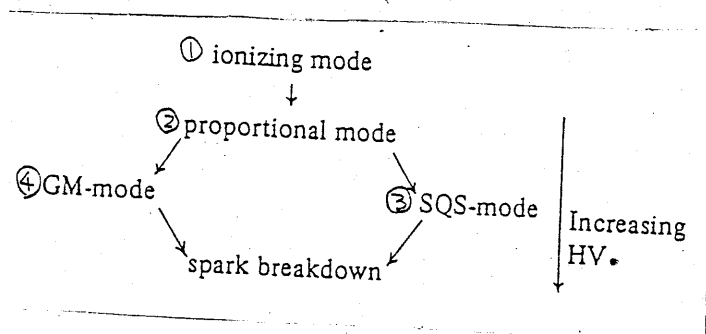


Fig. 2-6

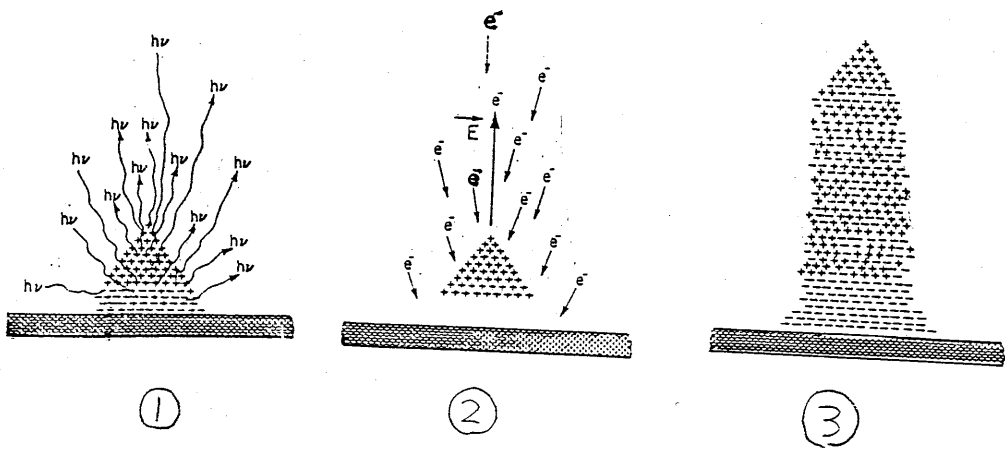


Fig. 2-7 (ref. 81によ3)

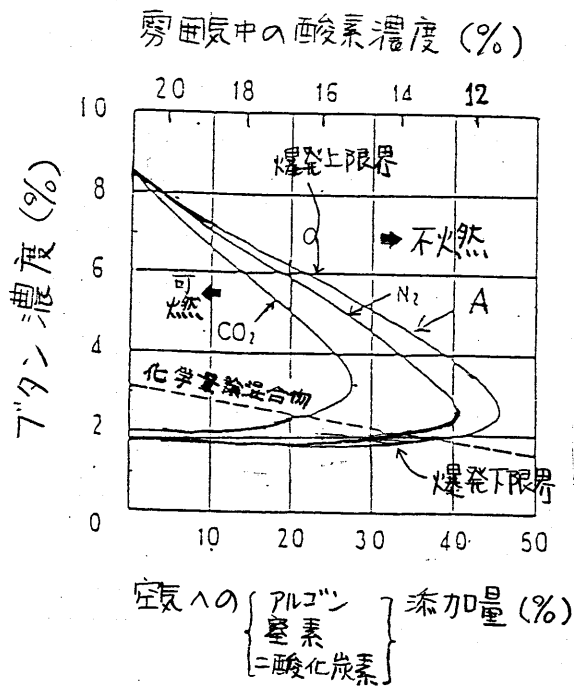


Fig. 3-1

BAKUHATSU GENKAI FÜR / AR ØR CO2 / + ISO-C4H10

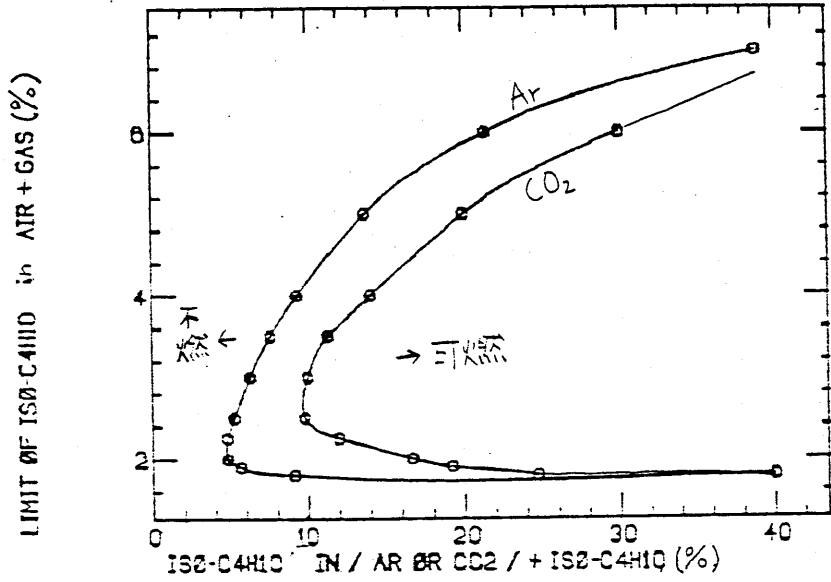


Fig. 3-2

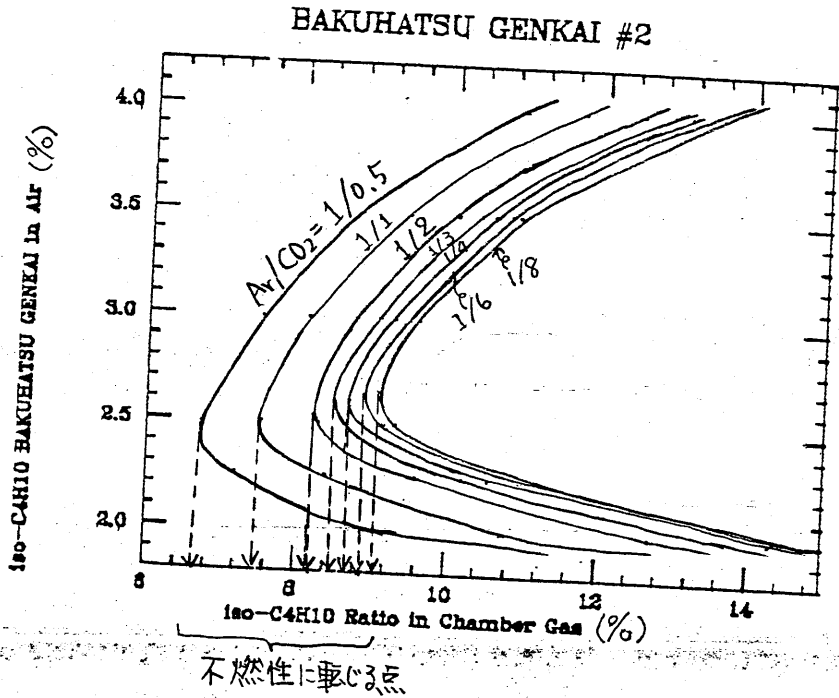


Fig. 3-3

BAKUHATSU GENKAI #2

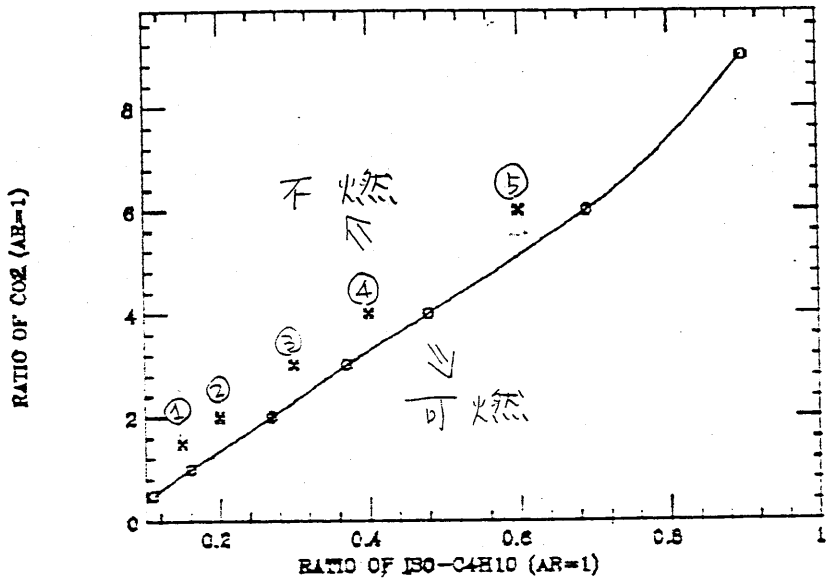


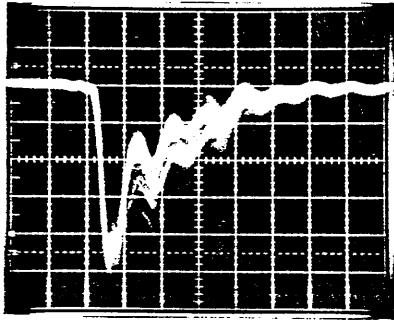
Fig. 3-4

(%)			(比)	
Ar	CO ₂	iso-C ₄ H ₁₀	Ar : CO ₂ : iso-C ₄ H ₁₀	本文中の呼び名
37.7	56.6	5.7	= 1 : 1.5 : 0.15	混合ガス①
31.2	62.5	6.3	1 : 2 : 0.2	" ②
23.2	69.8	7.0	1 : 3 : 0.3	" ③
18.5	74.1	7.4	1 : 4 : 0.4	" ④
13.2	78.9	7.9	1 : 6 : 0.6	" ⑤

Table 1

Fig. 4-1

①



A/CO₂/iso-C₄H₁₀

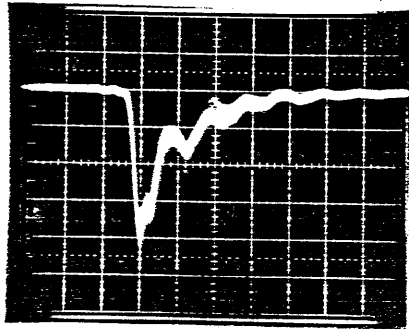
1 / 2 / 0.2

$$\begin{aligned} \text{H.V.} &= 3.8 \text{ kV} / 1.025 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 3.71 \text{ kV/(kg/cm}^2) \end{aligned}$$

以下全Z

(20 mV/div, 20 msec/div, 50 Ω load)

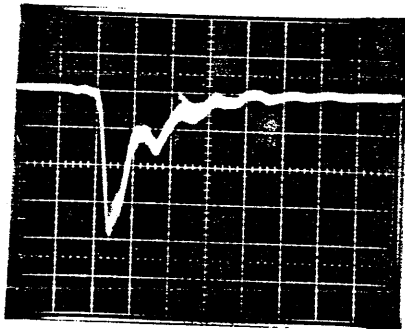
②



1 / 3 / 0.3

$$\begin{aligned} \text{H.V.} &= 3.8 \text{ kV} / 1.038 \text{ (kg/cm}^2) \\ &= 3.66 \text{ kV/(kg/cm}^2) \end{aligned}$$

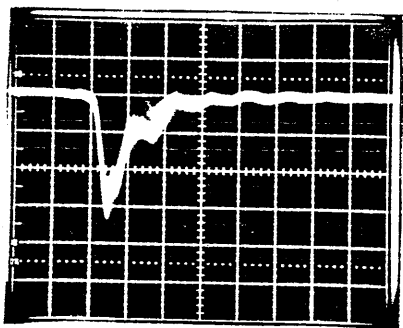
③



1 / 4 / 0.4

$$\begin{aligned} \text{H.V.} &= 3.8 \text{ kV} / 1.020 \text{ (kg/cm}^2) \\ &= 3.73 \text{ kV/(kg/cm}^2) \end{aligned}$$

④



1 / 6 / 0.6

$$\begin{aligned} \text{H.V.} &= 3.8 \text{ kV} / 1.026 \text{ (kg/cm}^2) \\ &= 3.70 \text{ kV/(kg/cm}^2) \end{aligned}$$

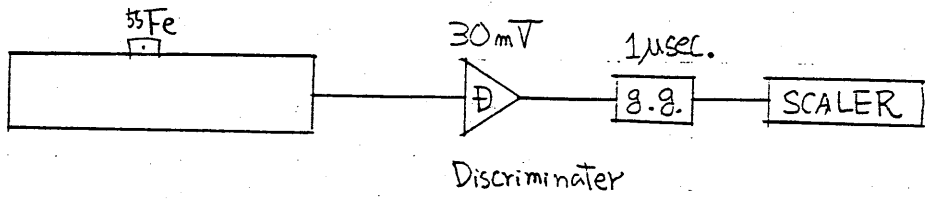


Fig. 4-2

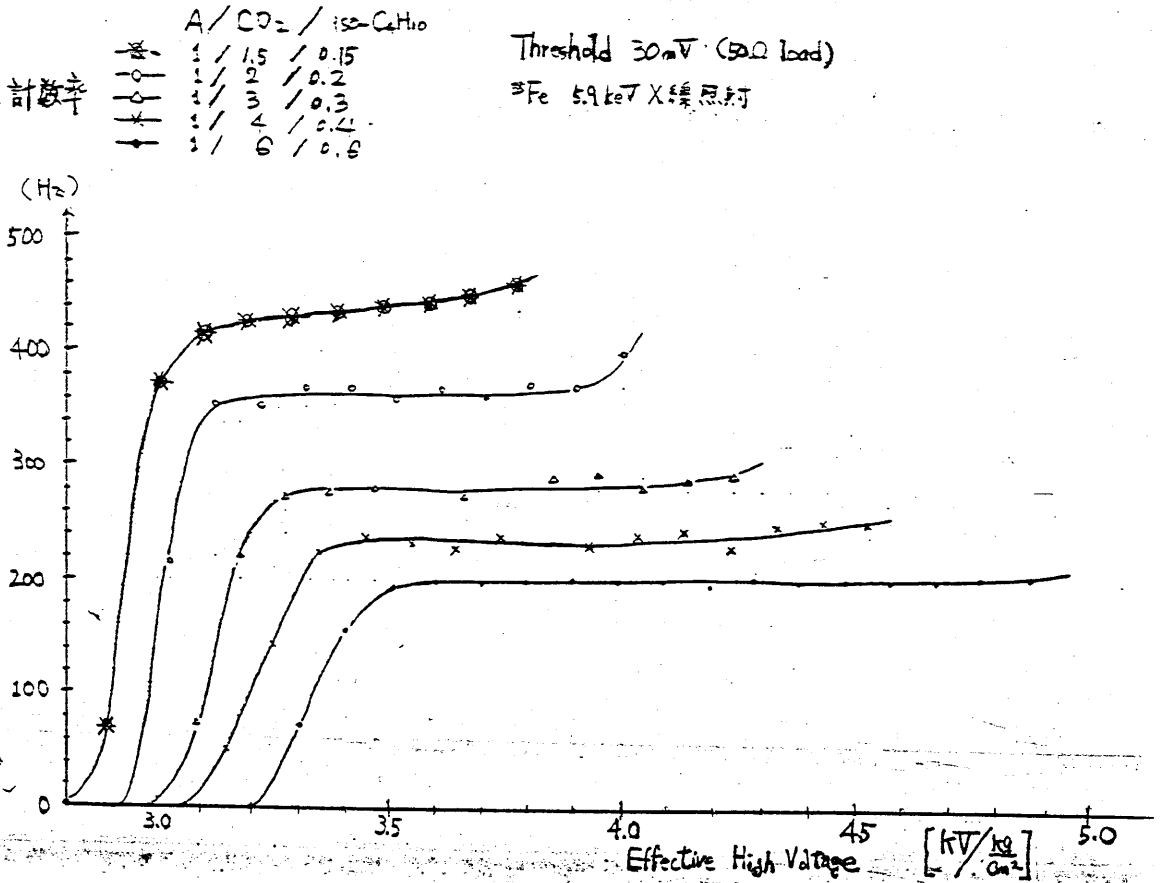


Fig. 4-3

Count Rate .vs. A Ratio

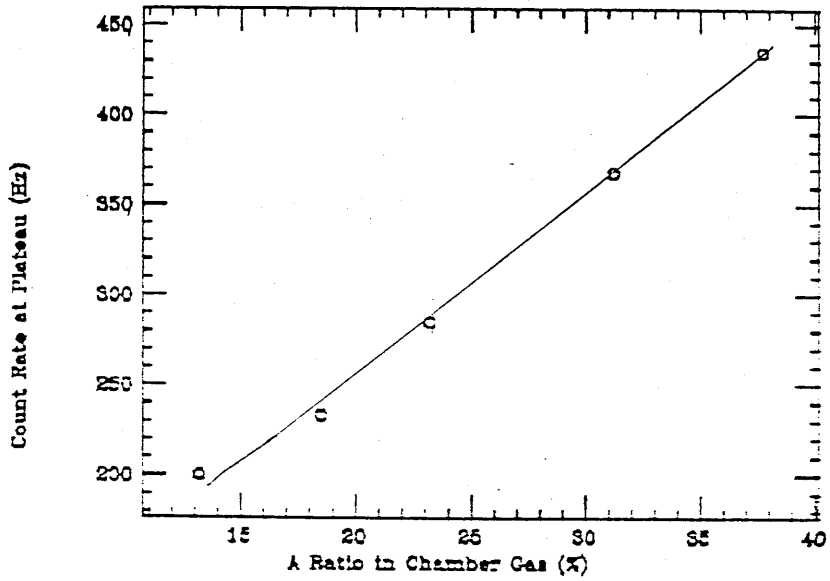


Fig. 4-4

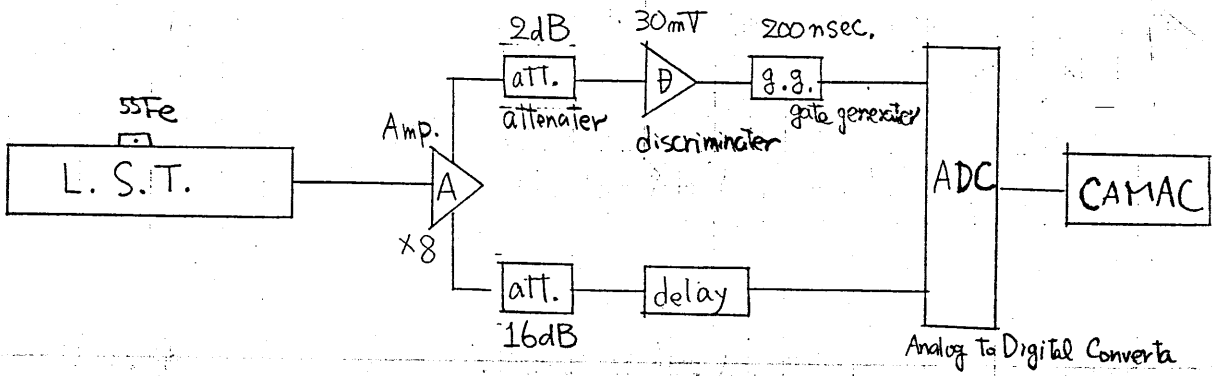
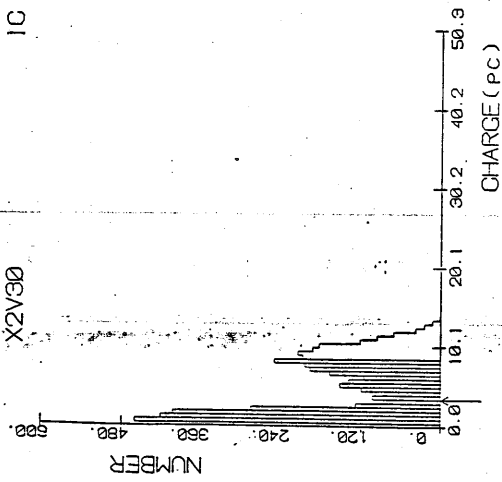
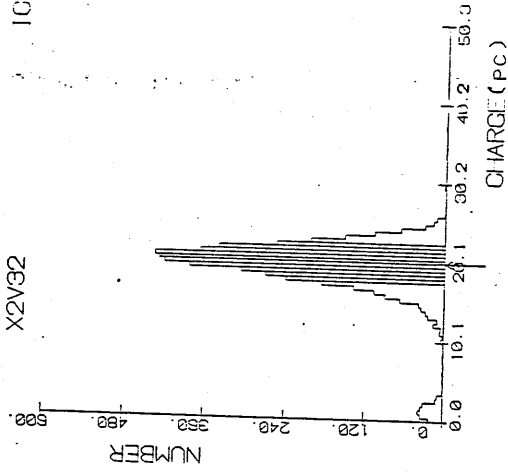


Fig. 4-5

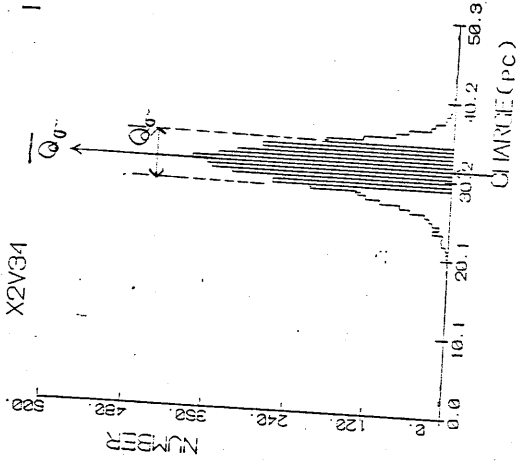
Fig. 4-6



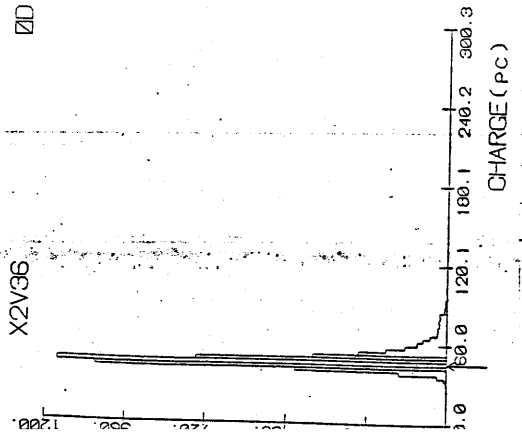
①, 2.93 [KT/K_g]



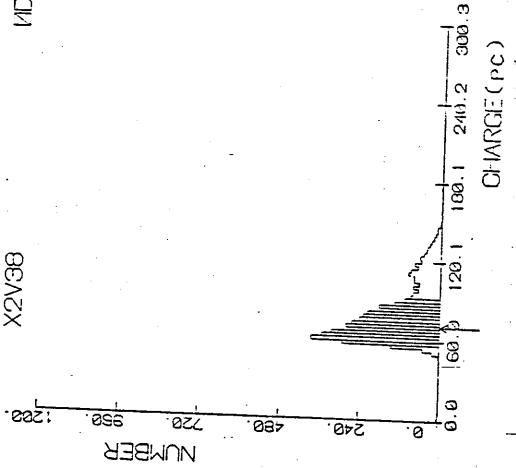
②, 3.19



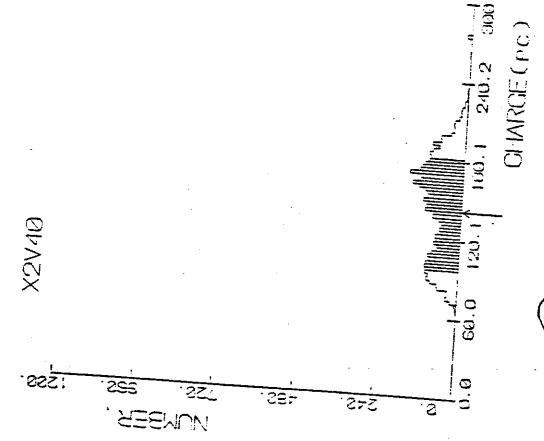
③, 3.32



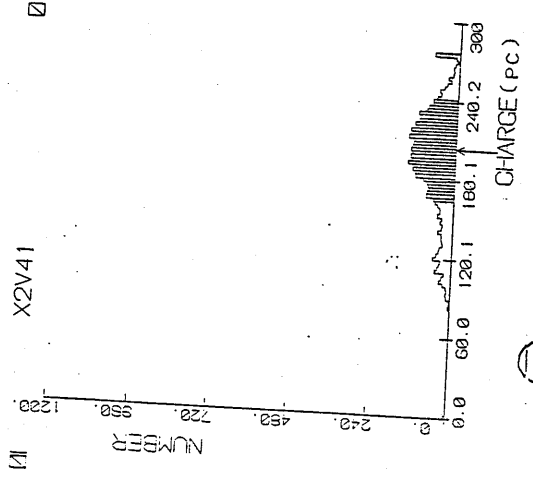
④, 3.51 [KT/K_g]



⑤, 3.71



⑥, 3.90



⑦, 4.10

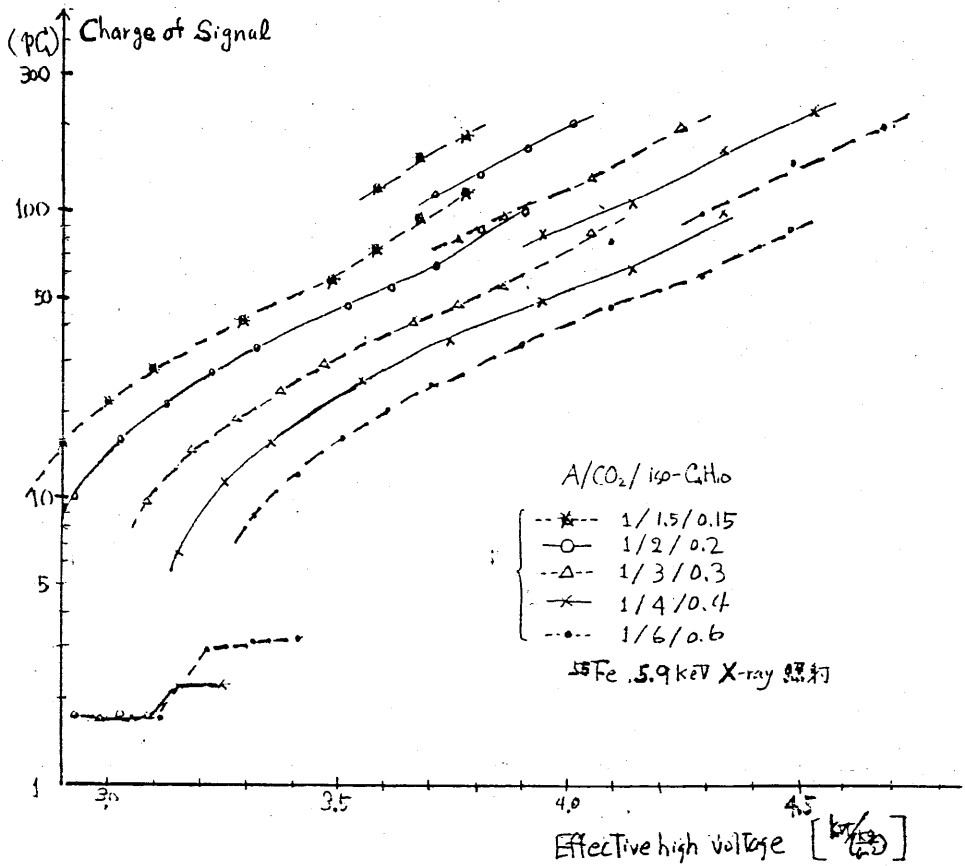


Fig. 4-7

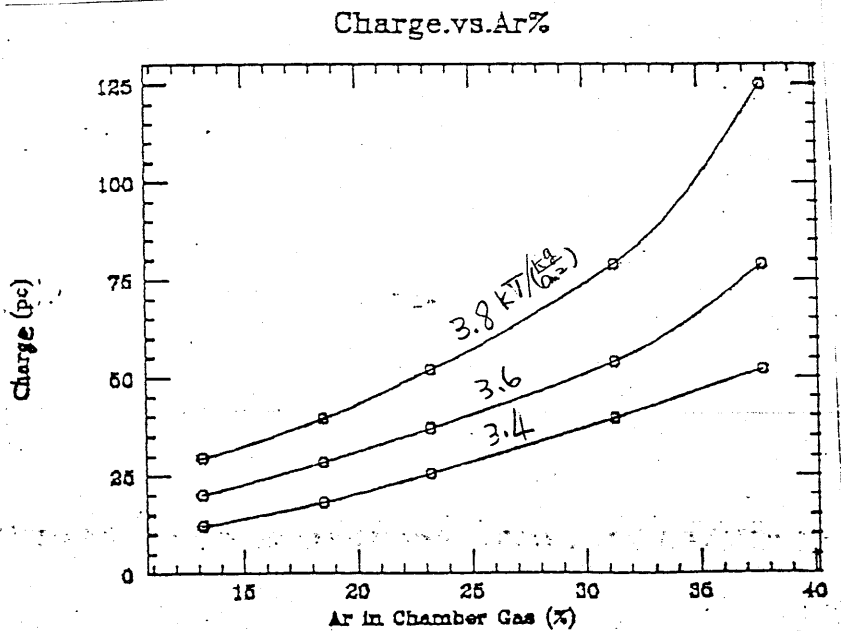


Fig. 4-8

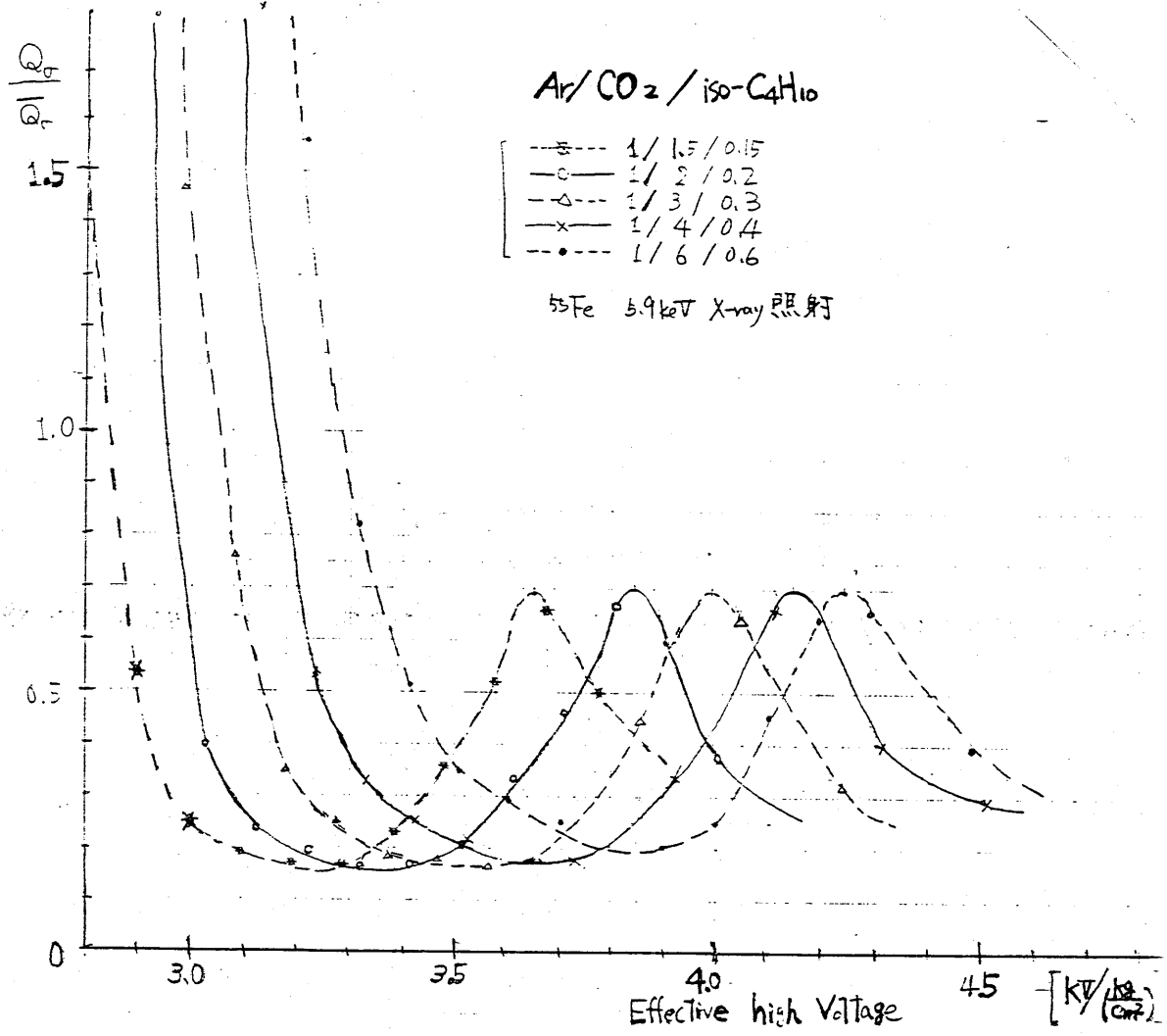


Fig. 4-9

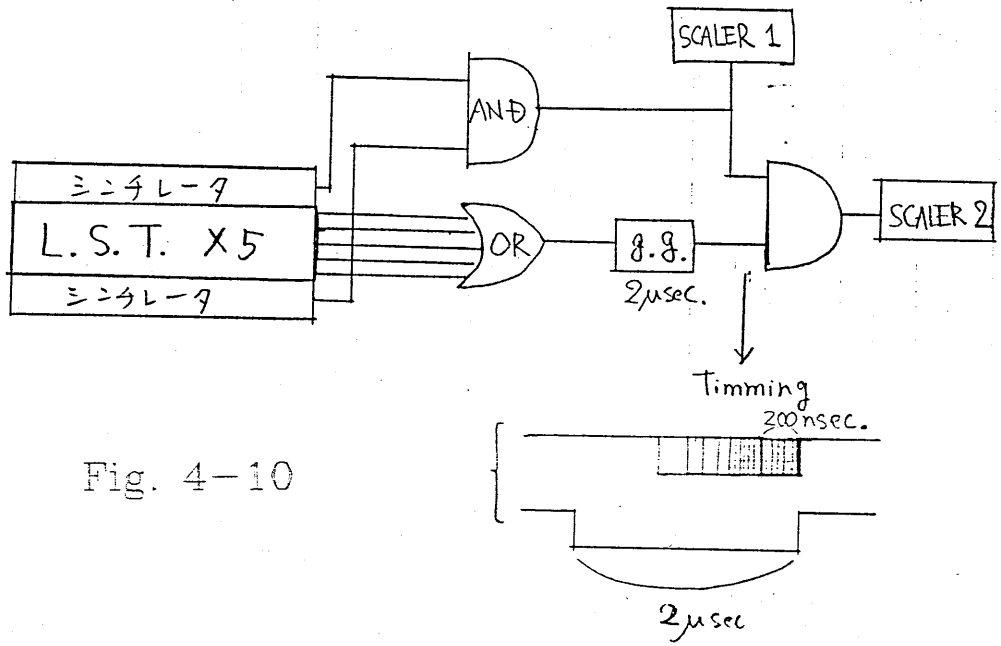


Fig. 4-10

A/CO₂/iso-GH₁₀

- --- 1 / 2 / 0.2
- --- 1 / 4 / 0.4
- --- 1 / 6 / 0.6
- △ --- 1 / 8 / 0.8
- --- 1 / ∞ / 1

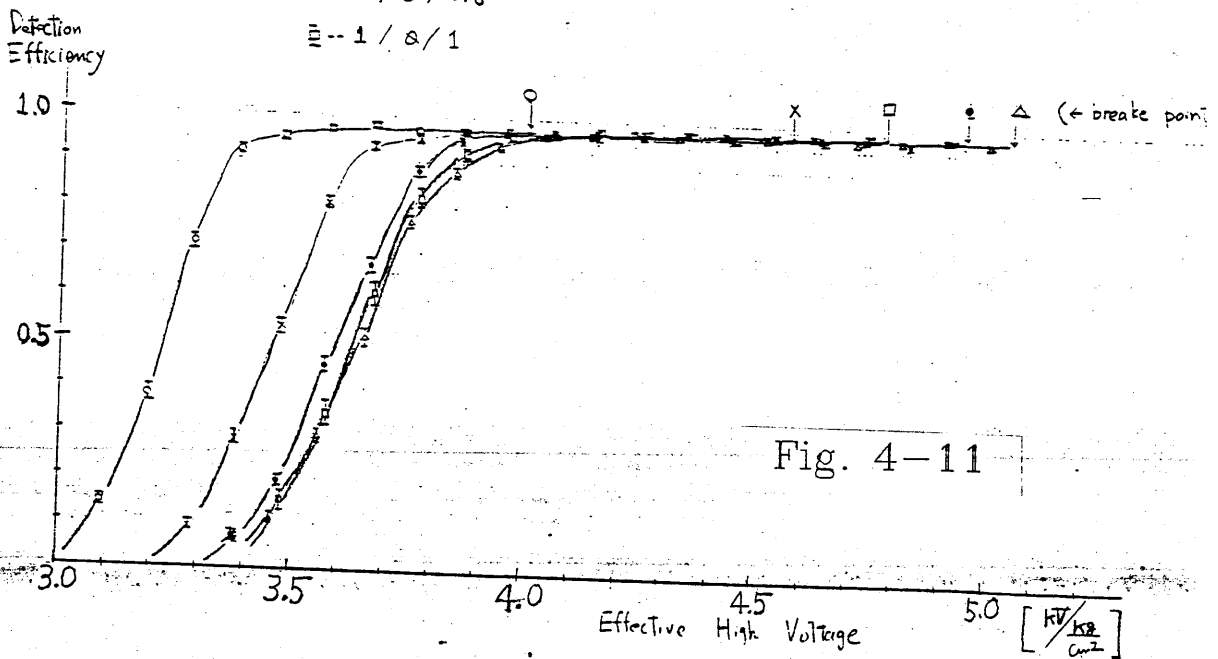


Fig. 4-11

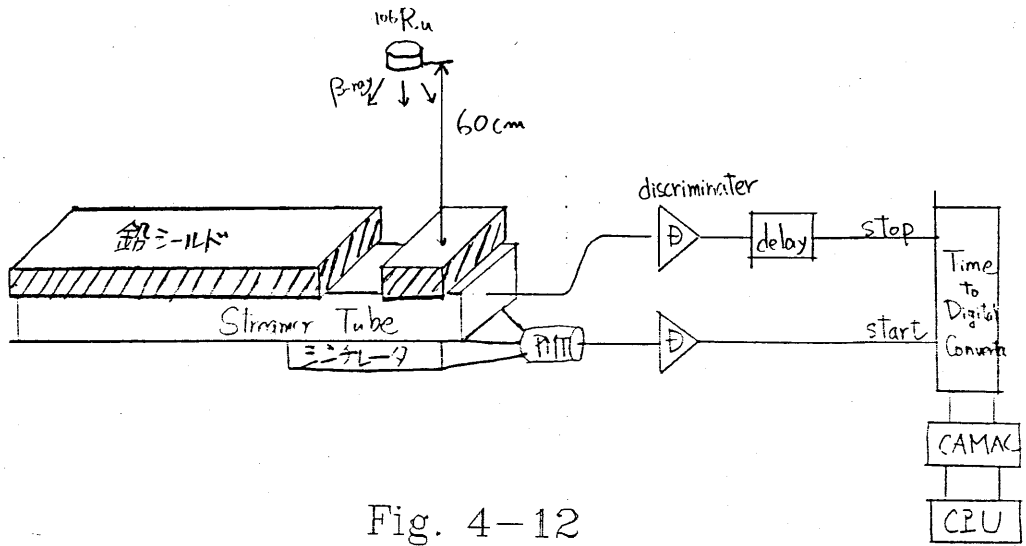


Fig. 4-12

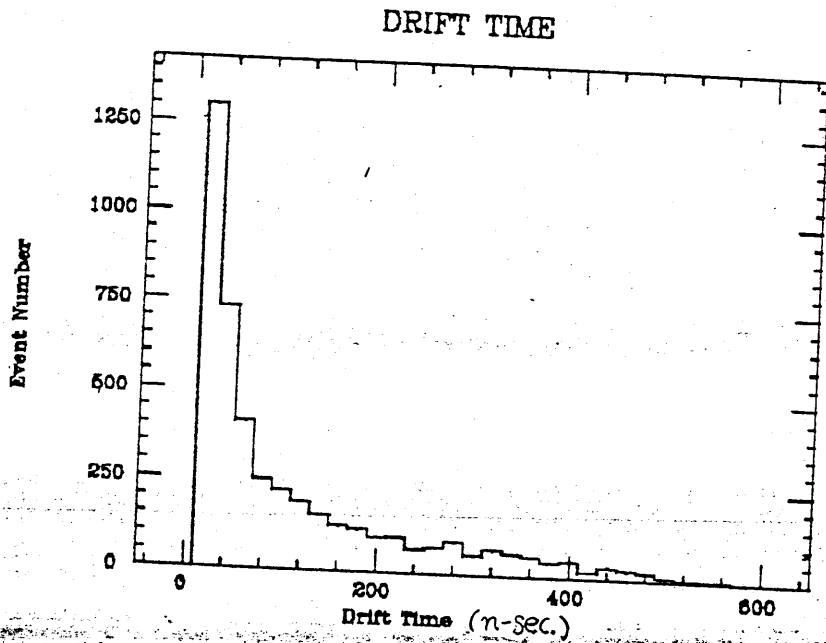


Fig. 4-13

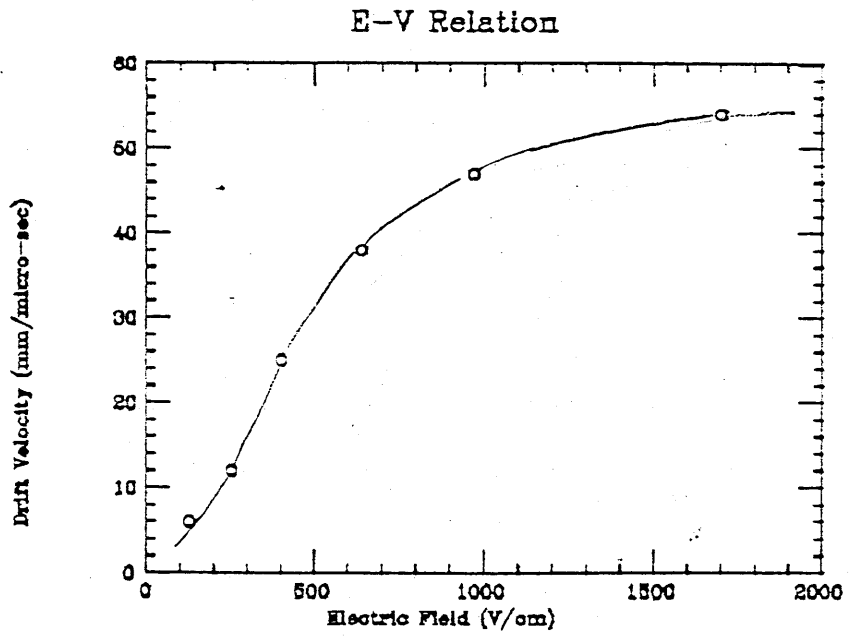


Fig. 4-14

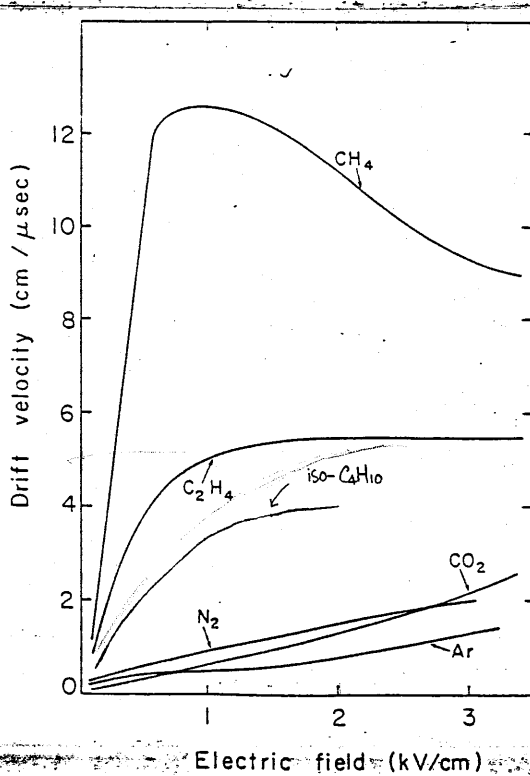


Fig. 4-15

Drift velocity of electrons in several gases at normal conditions^{12,22,23)}

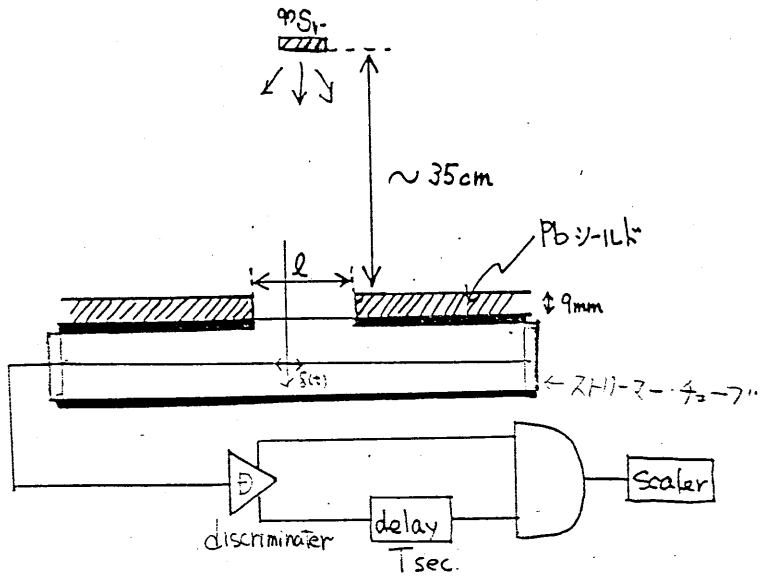


Fig. 4-16

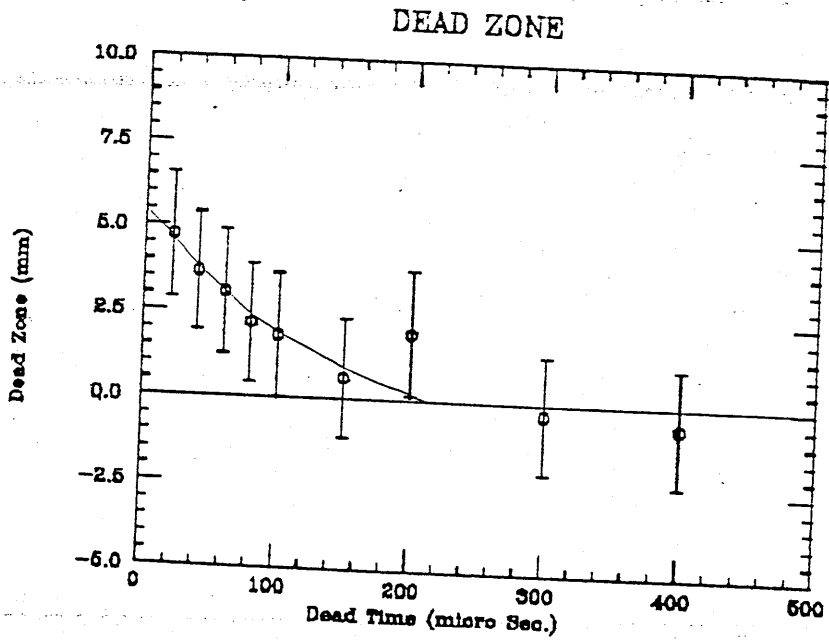


Fig. 4-17

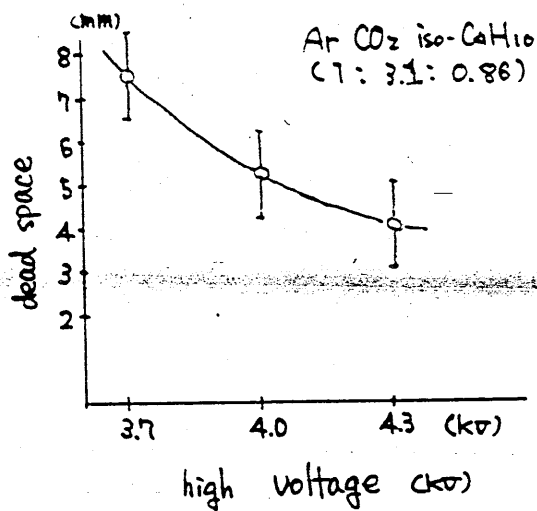
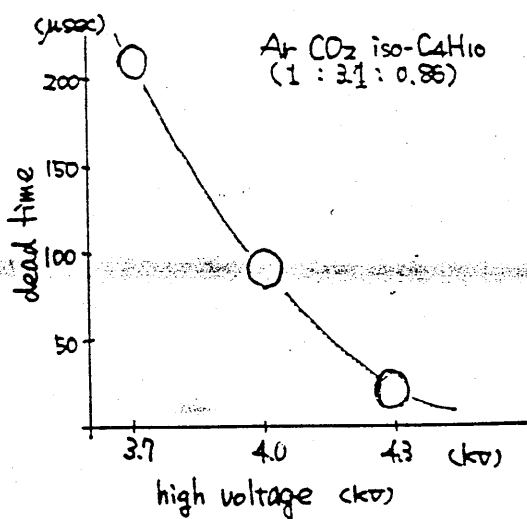
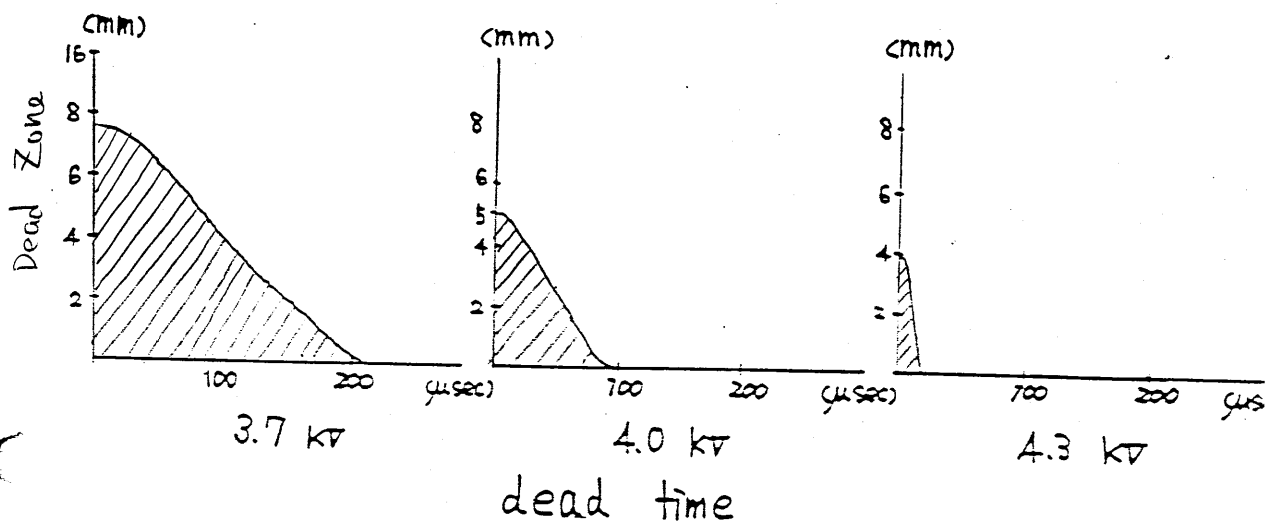
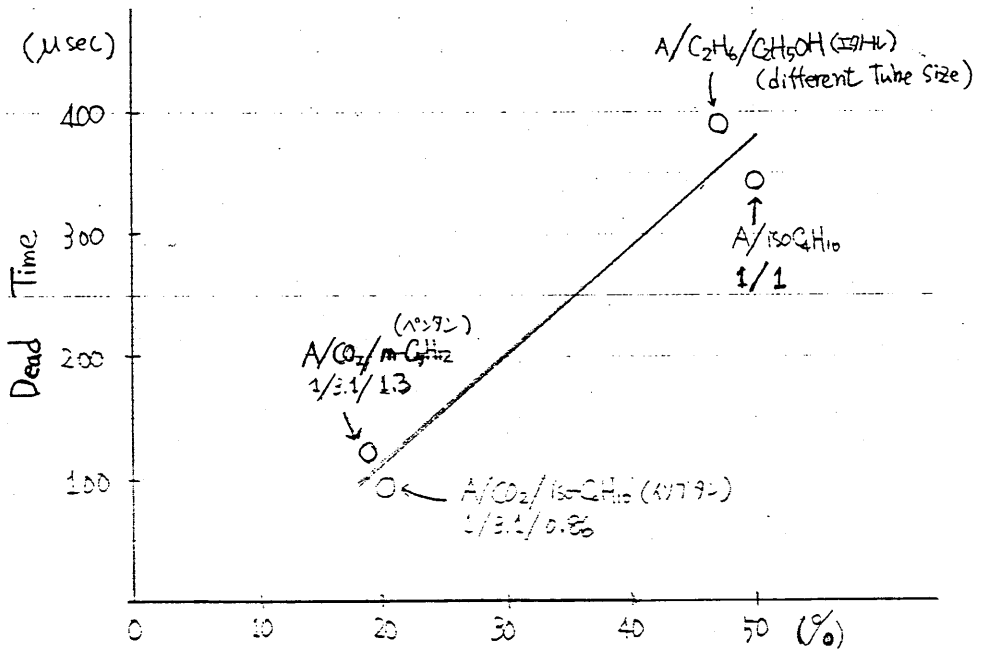


Fig. 4-18



A ratio in chamber Gas

Fig. 4-19

Table 2.

混合ガス	混合比 (%)
Ar/CO ₂ /iso-79ン	20.2 / 62.5 / 17.3
Ar/CO ₂ /m-79ン	18.5 / 57.4 / 24.1
Ar/iso-79ン	50 / 50
Ar/イタノ/イタノ-IV	47.2 / 47.2 / 5.6 (*)

(* ref. 5)

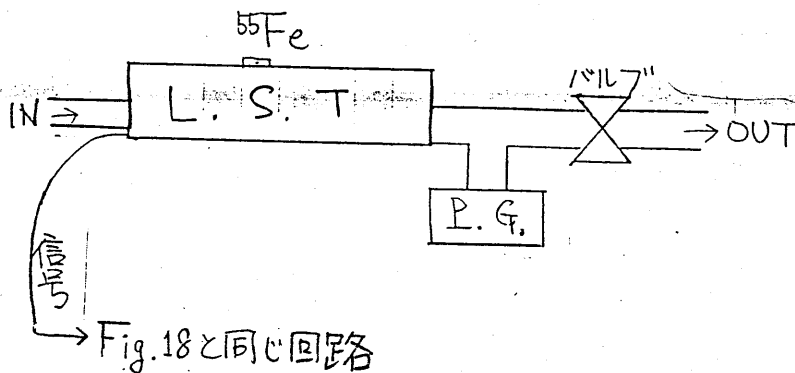


Fig. 4-20

Pressure Variation of Charge

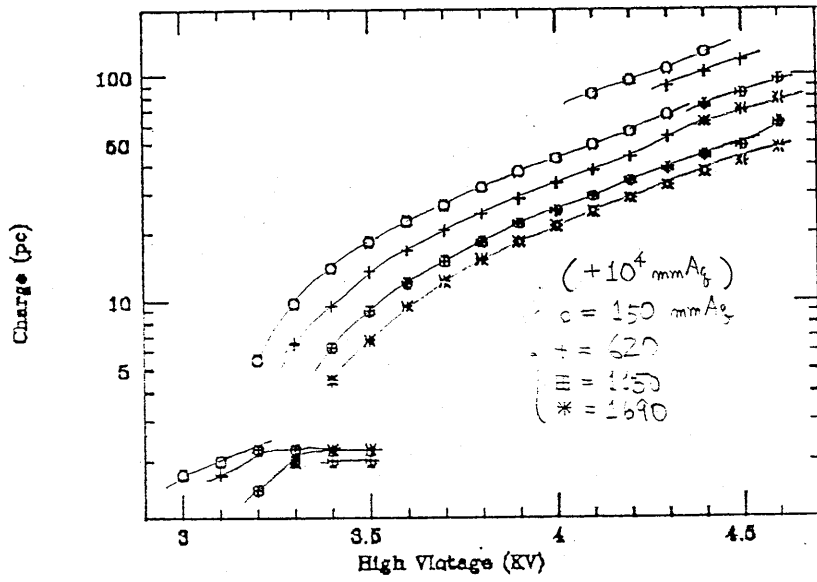


Fig. 4-21

10^4 mmHg $\approx 10^{13}$ mb

Pressure Variation of Charge #2

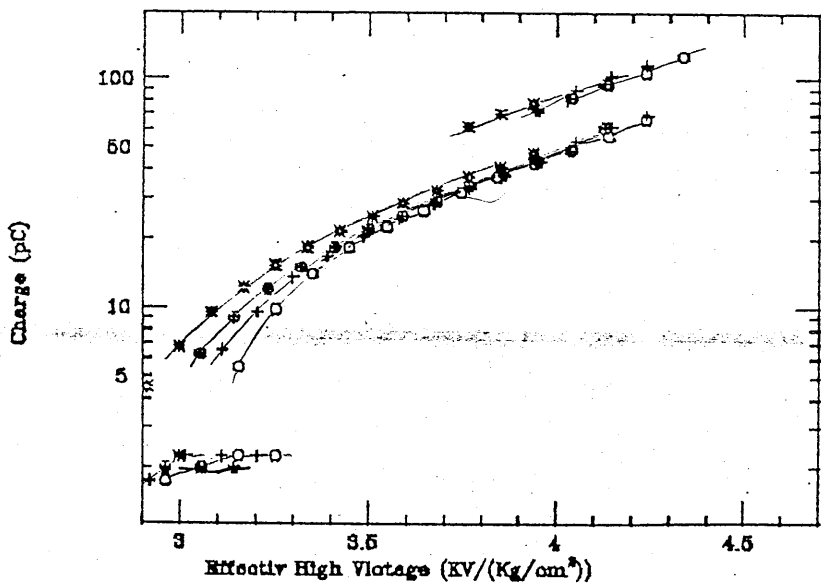


Fig. 4-22

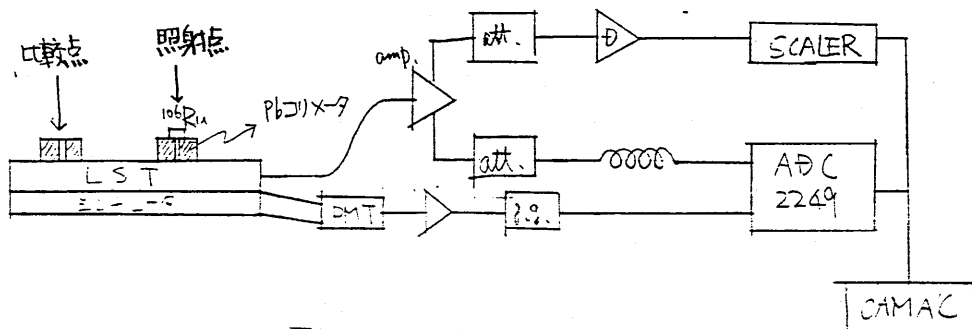


Fig. 4-23

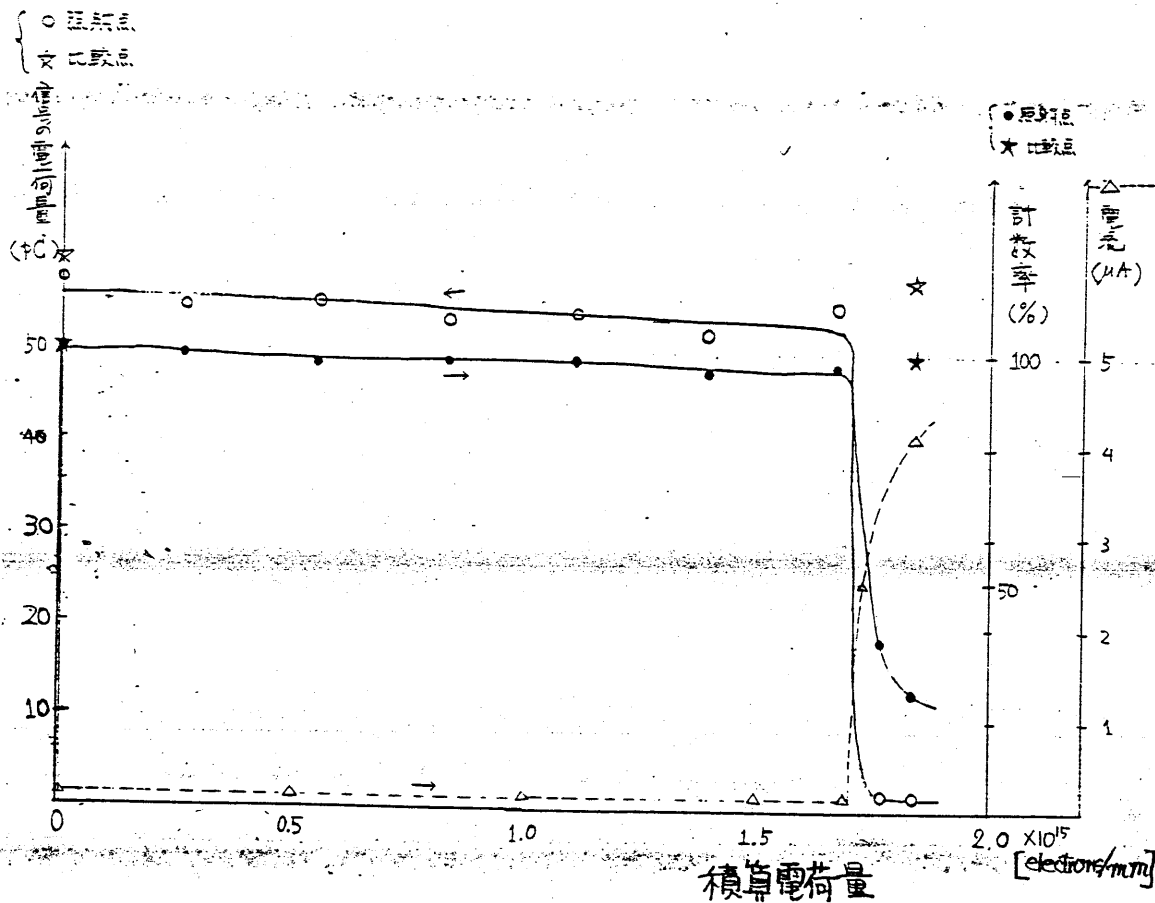
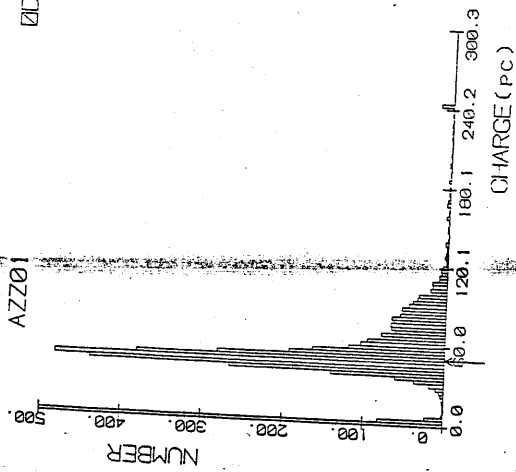
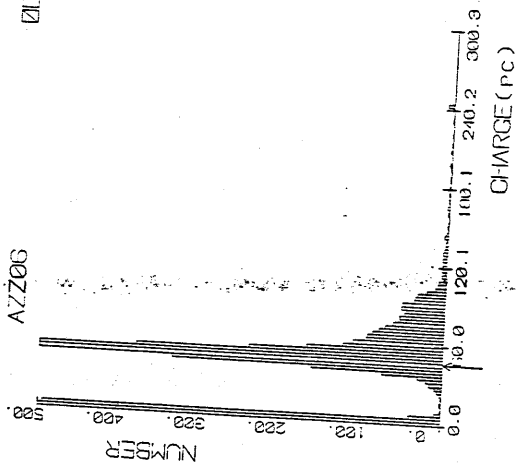


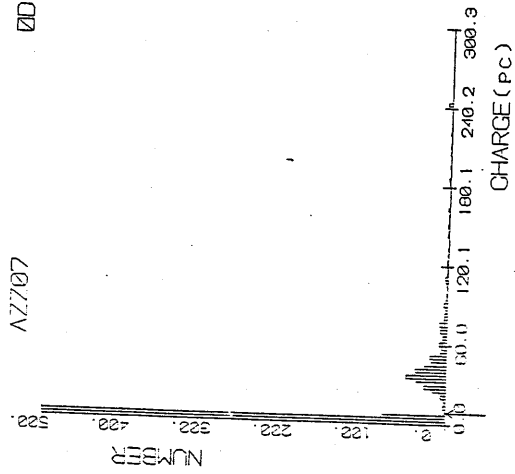
Fig. 4-24



0 elec./mm



1.67×10^{15} elec./mm



1.16×10^{15} elec./mm

估算電荷量

Fig. 4-25



FUJICOLOR 87

FUJICOLOR 87

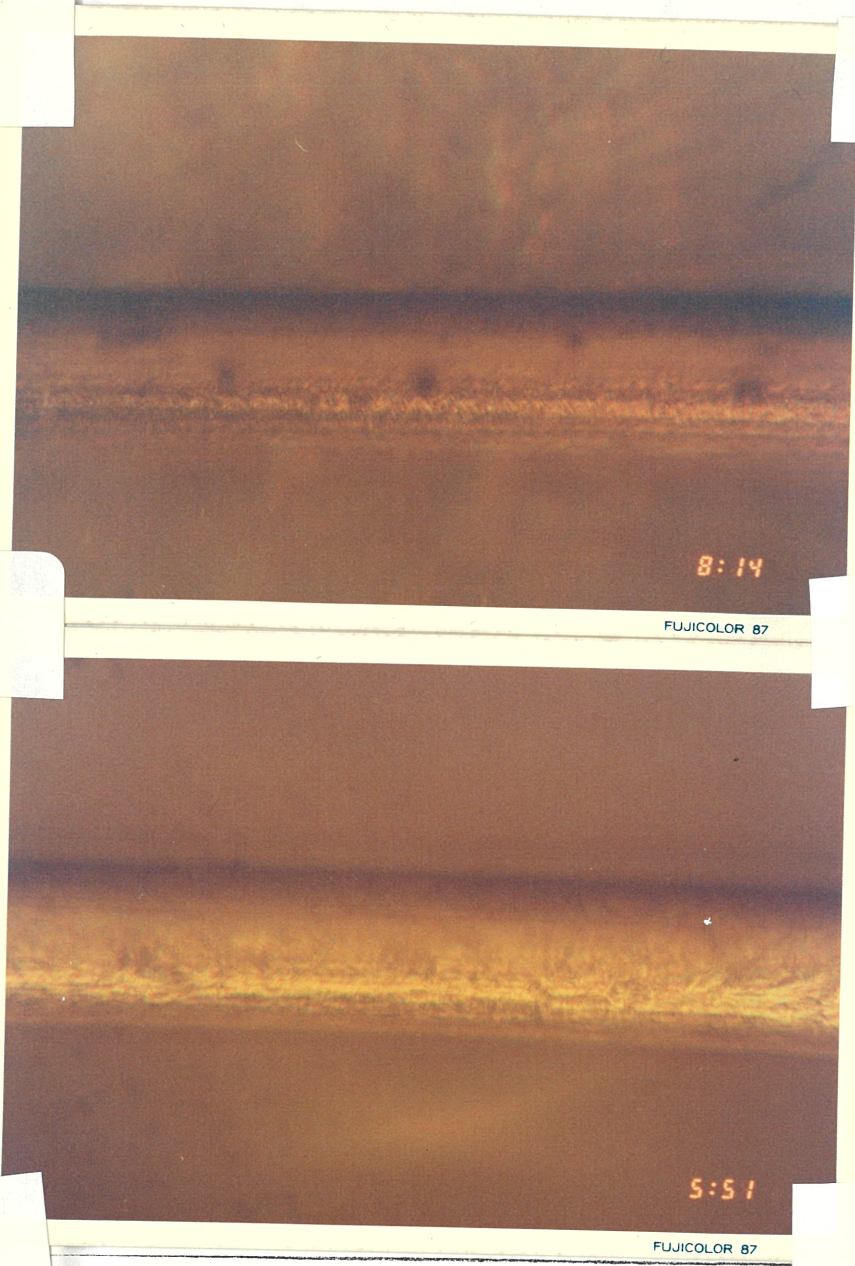
FUJICOLOR 87

①

②

③

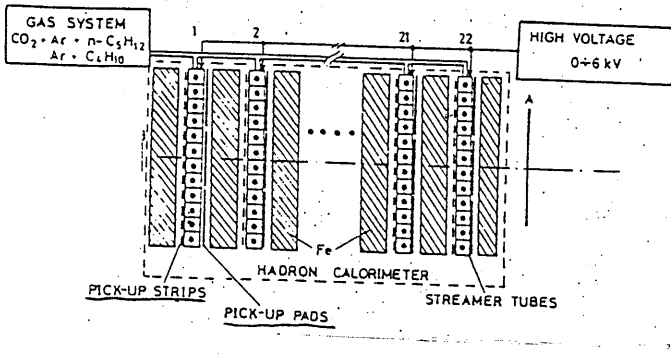
Fig. 4-26 ①, ②, ③



④

⑤

Fig. 4-26 ④, ⑤



← Fig. 4-27

(ref. 91-83)

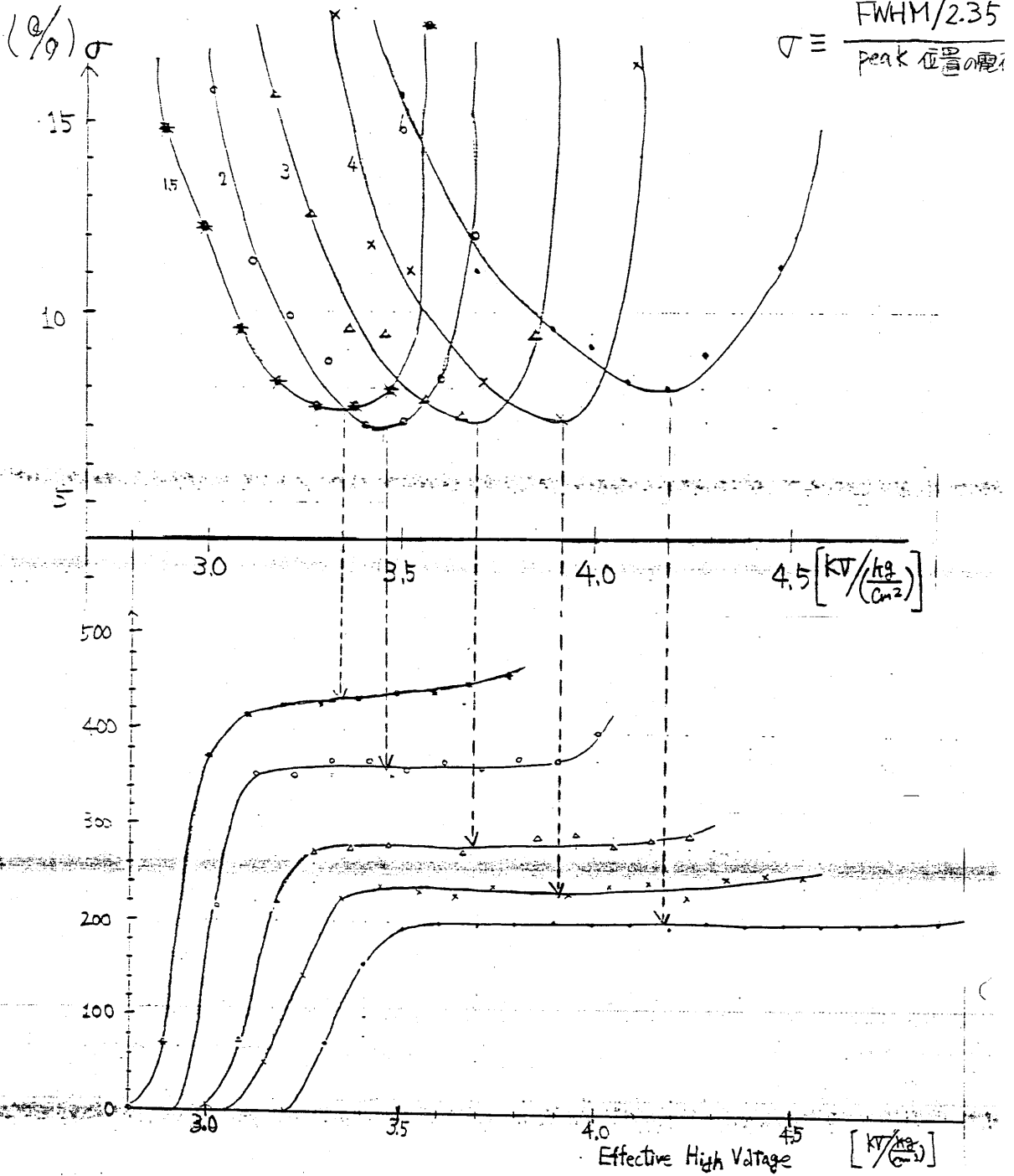
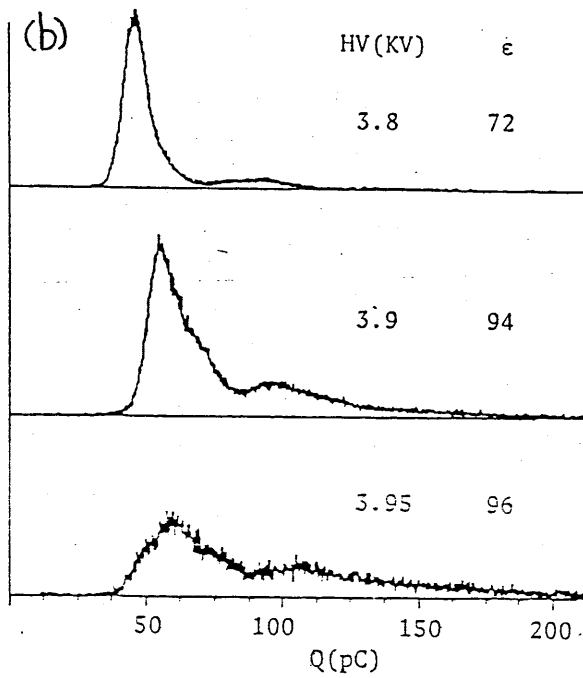


Fig. 4-28

(7F)



Charge spectra for argon/CO₂ bubbled through isopropanol at 15°C, (3%). (a) (1/1) argon/CO₂, (b) (1/3) argon/CO₂.

↑ OPAL ケルゲン等のテスト例。Ar/CO₂/iso-7°D¹⁰/-1¹² (1/3/0.12)

↓ A/CO₂/iso-C₄H₁₀ (1/2/0.2) 混合ガス。

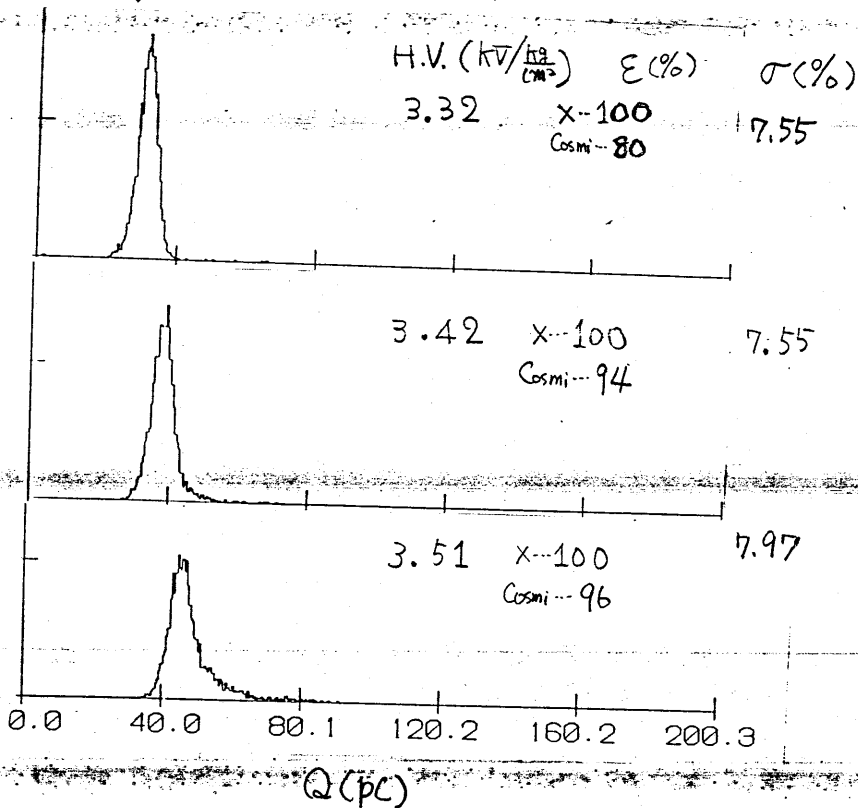


Fig. 4-29

224 1652 6
 IC(wir.pad) 39 15
 DC(total) 110
 LG 80.759
 LA 0.000

VENUS

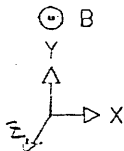
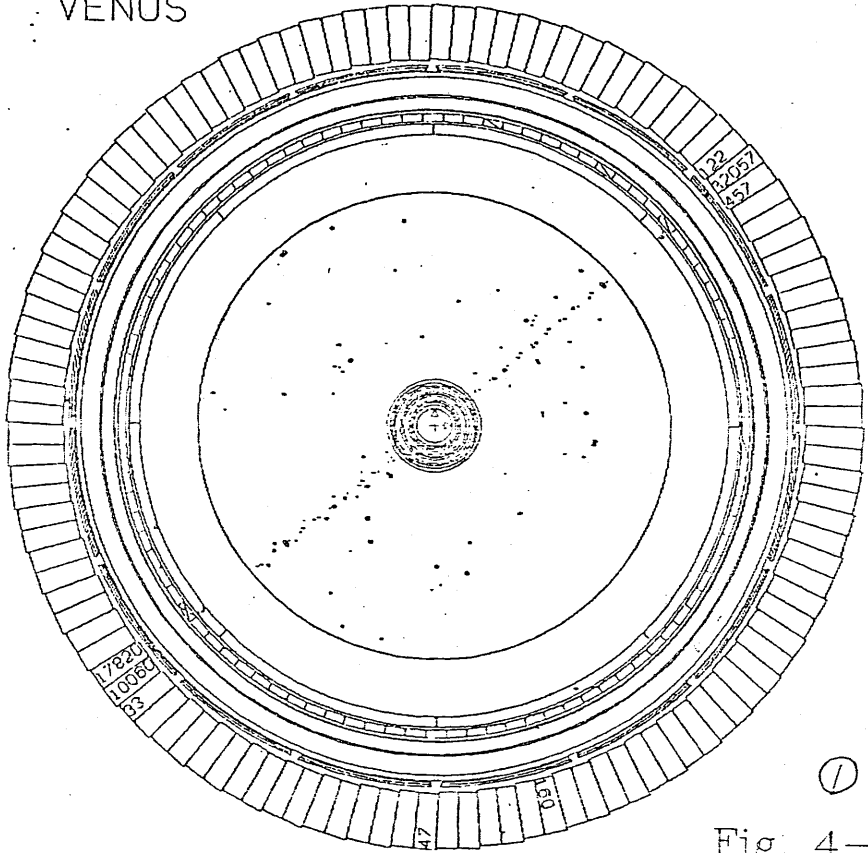
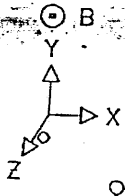
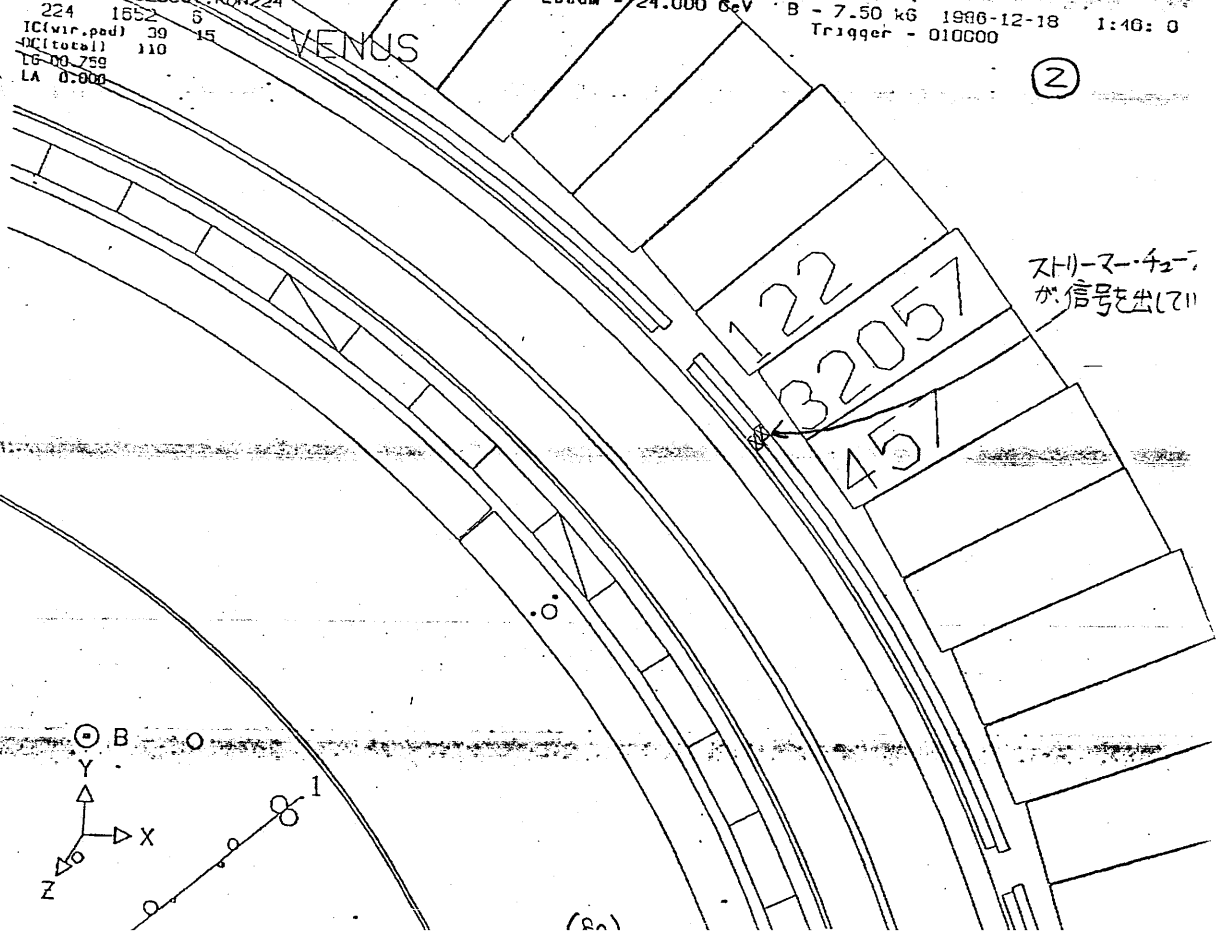


Fig. 4-30

224 1652 6
 IC(wir.pad) 39 15
 DC(total) 110
 LG 80.759
 LA 0.000

VENUS



87-02-05 23:49: 9 RP4 Z-radius Mode
 DSN VH06.HADSEL.RUN361
 361 5536 1
 IC(wir.padi) 86 183
 DC(totall) 592
 LG 32.634
 LA 0.000

Ebeam - 25.000 GeV B - 7.50 KG 1987-2-4 6: 9:43
 Trigger - 0100101

VENUS

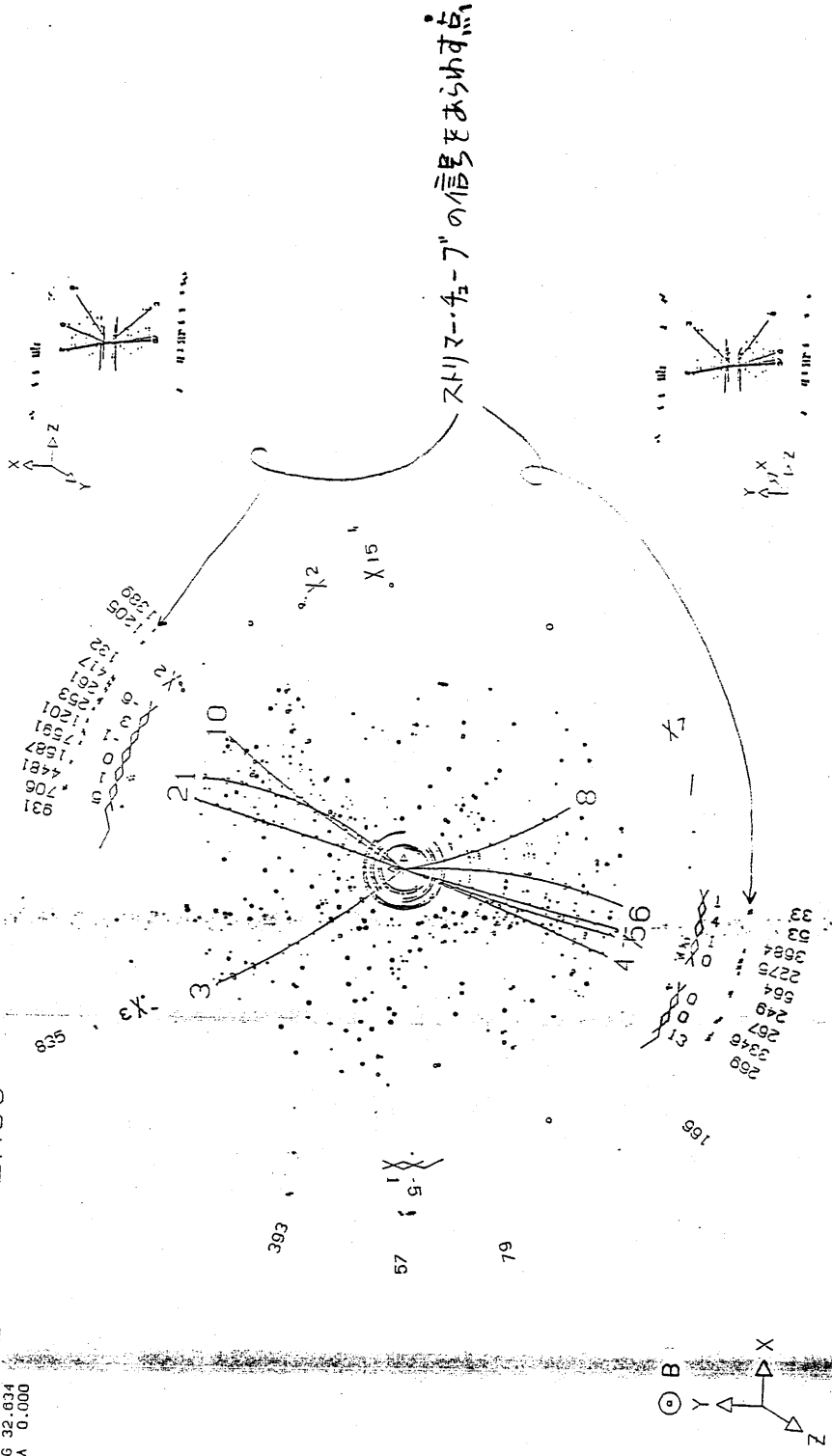
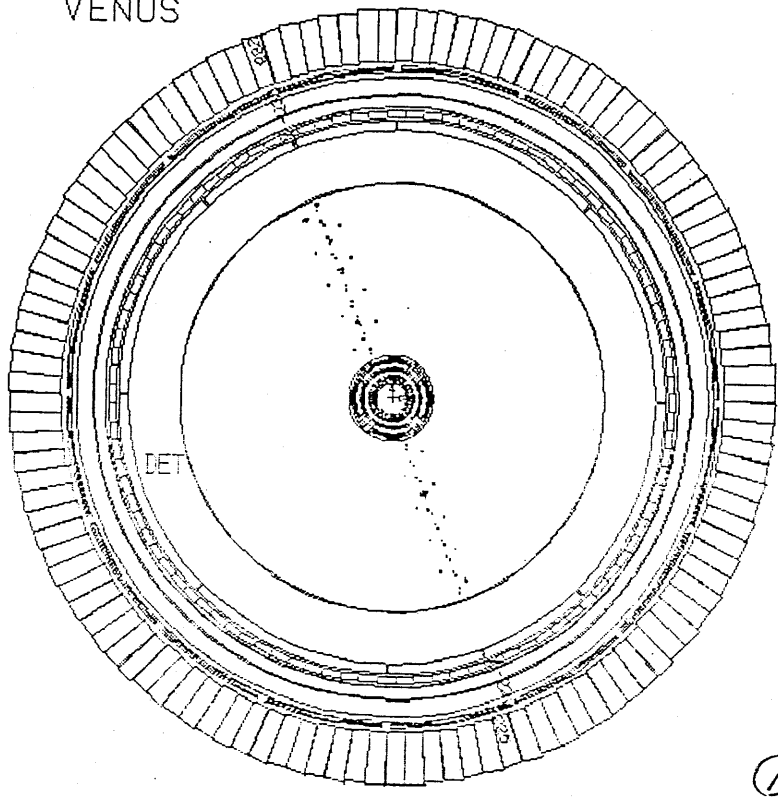


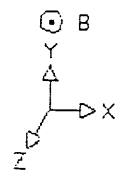
Fig. 4-31

87-02-11 U:49:48 RP4 Z-radius Mode Ebeam = 0.000 GeV B = 0.00 kG 1987-1-20 17:14:5
 DSN VUEB.R0248.R0248.CAL
 248 4 4
 ID(vir,pad) 13 20
 DC(total) 82
 LB 0.312
 LK 0.000

VENUS



--->
 --->

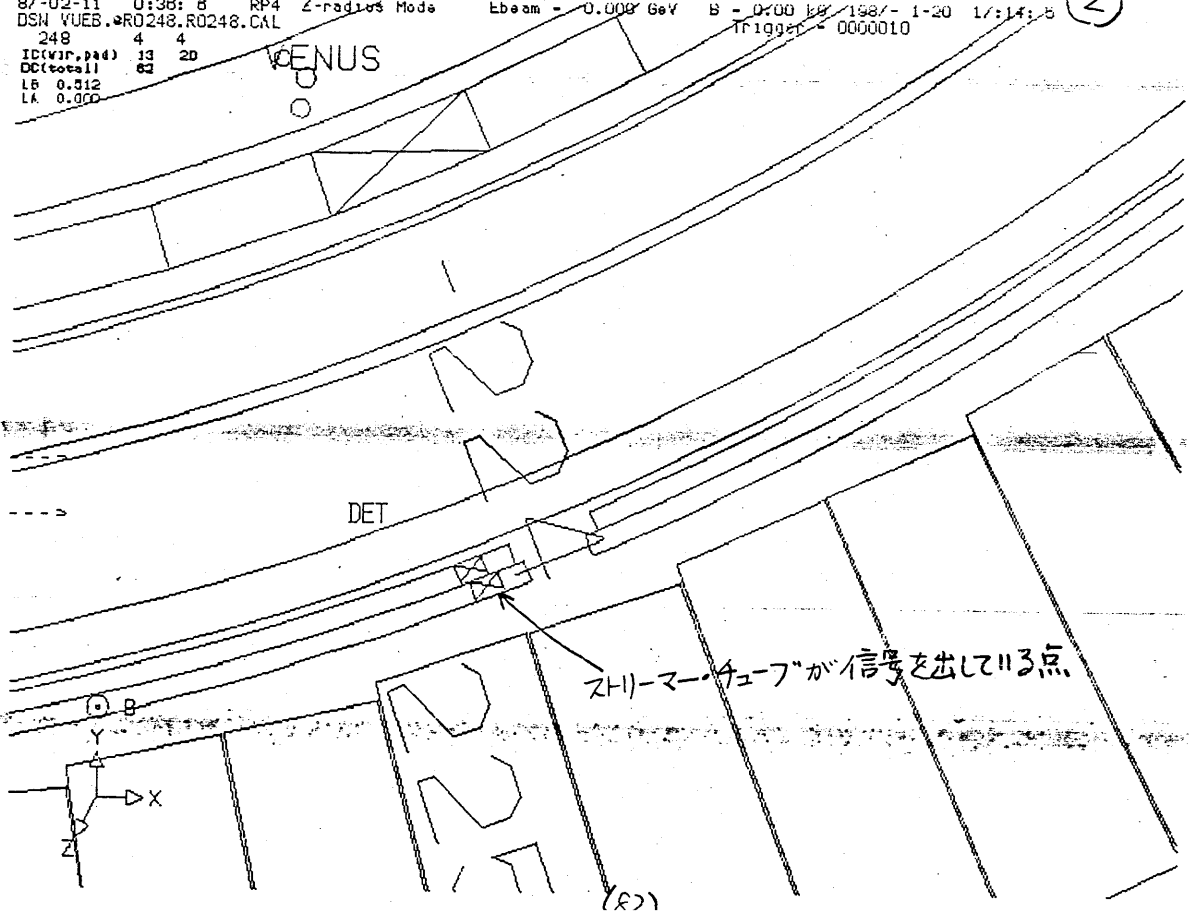


①

Fig. 4-32

87-02-11 0:36:5 RP4 Z-radius Mode Ebeam = 0.000 GeV B = 0.00 kG 1987-1-20 17:14:5
 DSN VUEB.R0248.R0248.CAL
 248 4 4
 ID(vir,pad) 13 20
 DC(total) 82
 LB 0.312
 LK 0.000

VENUS

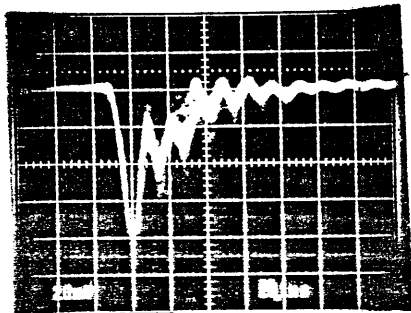


②

Z-11-マ-チューブ"が信号を出している点

(82)

Fig. 5-1



Ar/CO₂/C₂H₆
(17.3/53.5/29.2%)

20 mV/div, 20 msec/div

3.8 kV (h.v.), 50 Ω load

5.9 keV X-ray 照射。

Ar	CO ₂	C ₂ H ₆
26.8	59.0	14.2
19.8	61.5	18.7
17.3	53.5	29.2
15.1	46.7	38.2

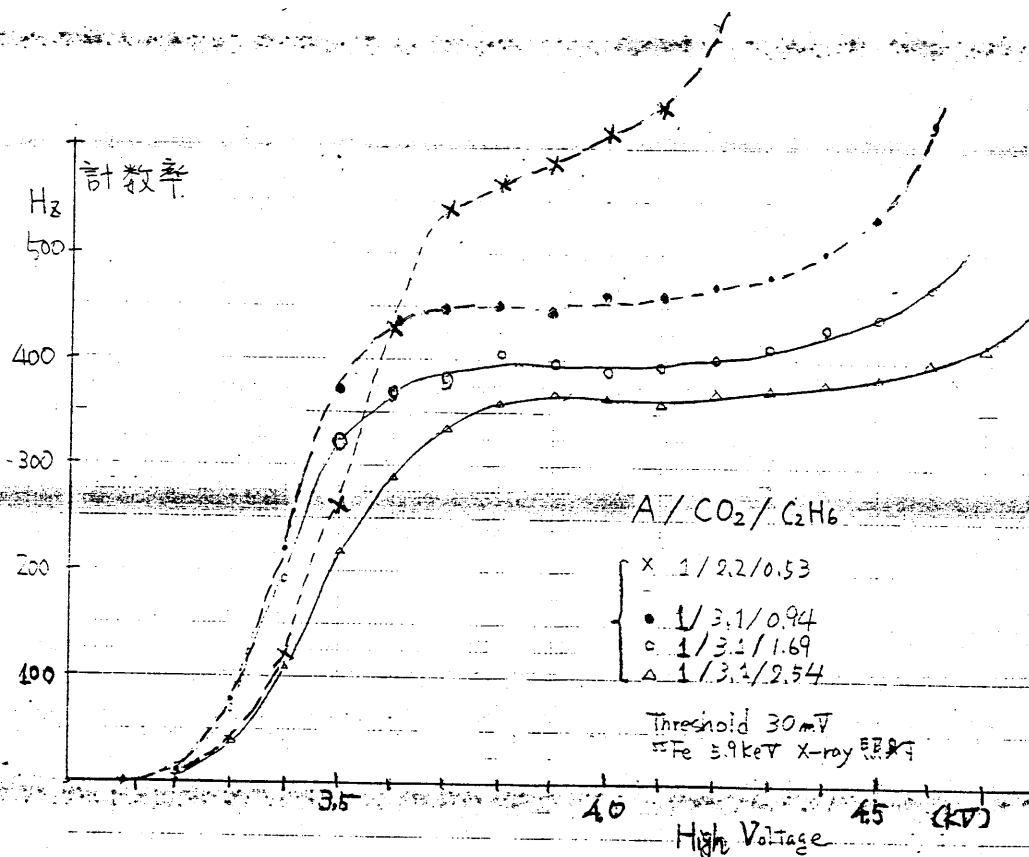


Fig. 5-2

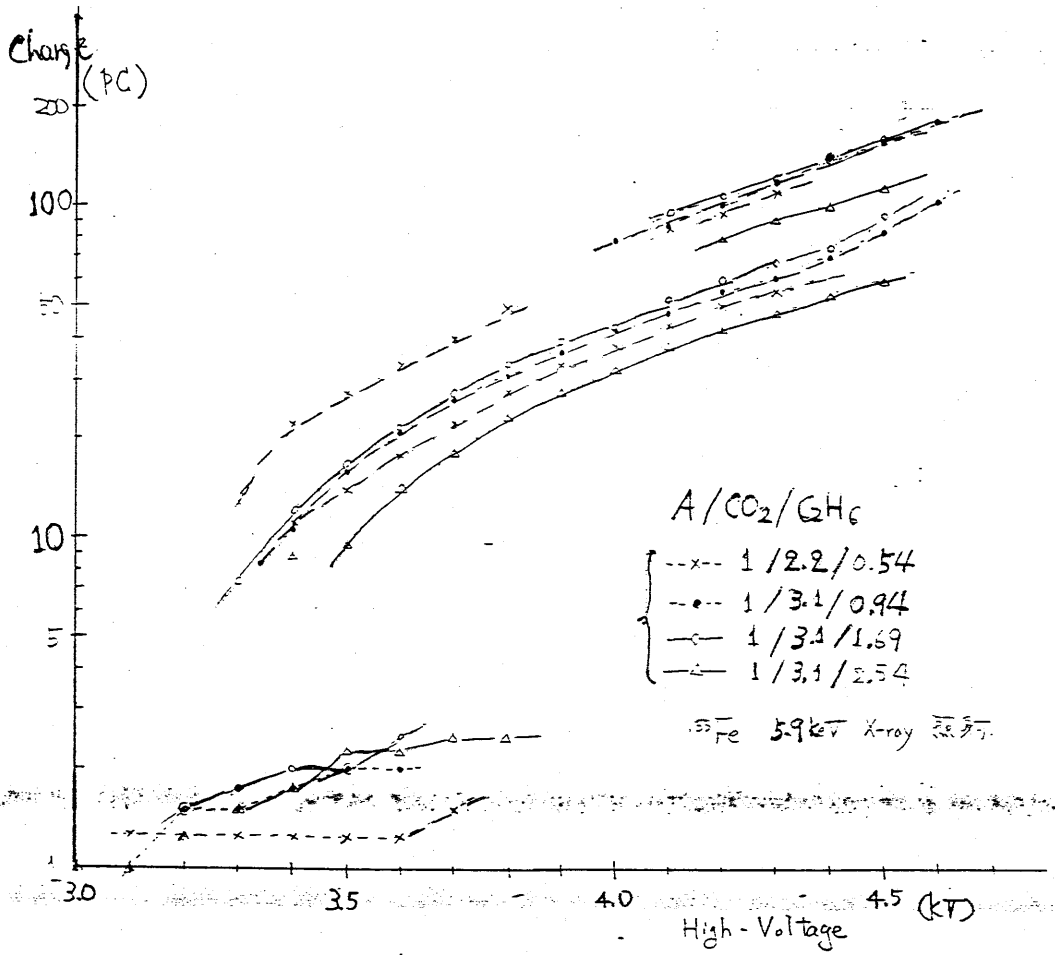


Fig. 5-3

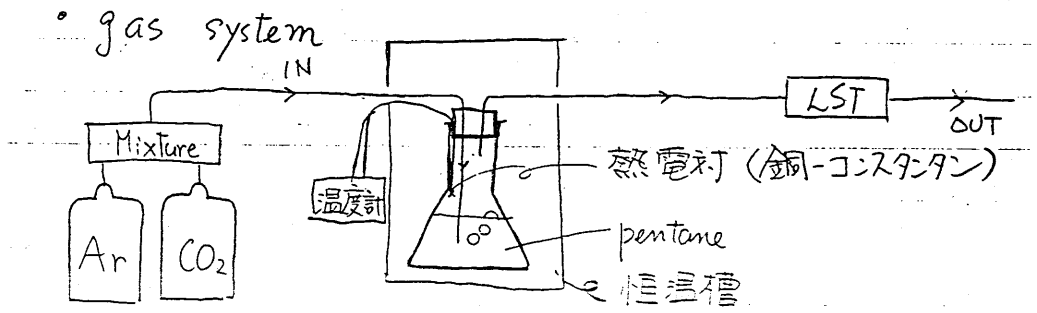


Fig. 5-4

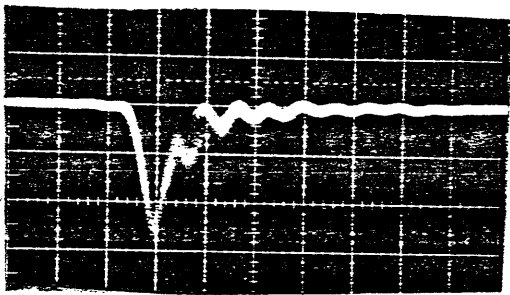


Fig. 5-5

Ar / CO₂ / m-C₅H₁₂
 25.4 / 50.8 / 23.8 (%)
 3.8 KV (i.v.)
 20mV/div
 20msec/div
 50-Ω load

(%)

Ar	CO ₂	m-pentane	m-pentan 温度
25.4	50.8	23.8	-0.3°C
23.2	46.4	30.4	5.0
20.8	41.7	37.5	10.0
18.3	36.6	45.1	14.5

Table. 4

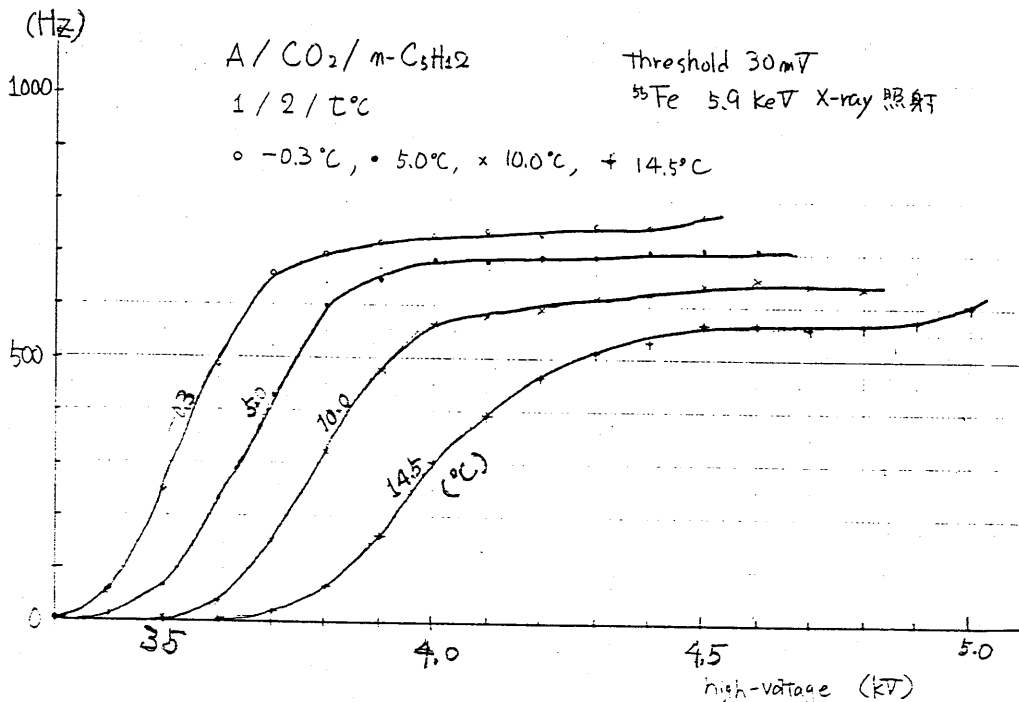


Fig. 5-6

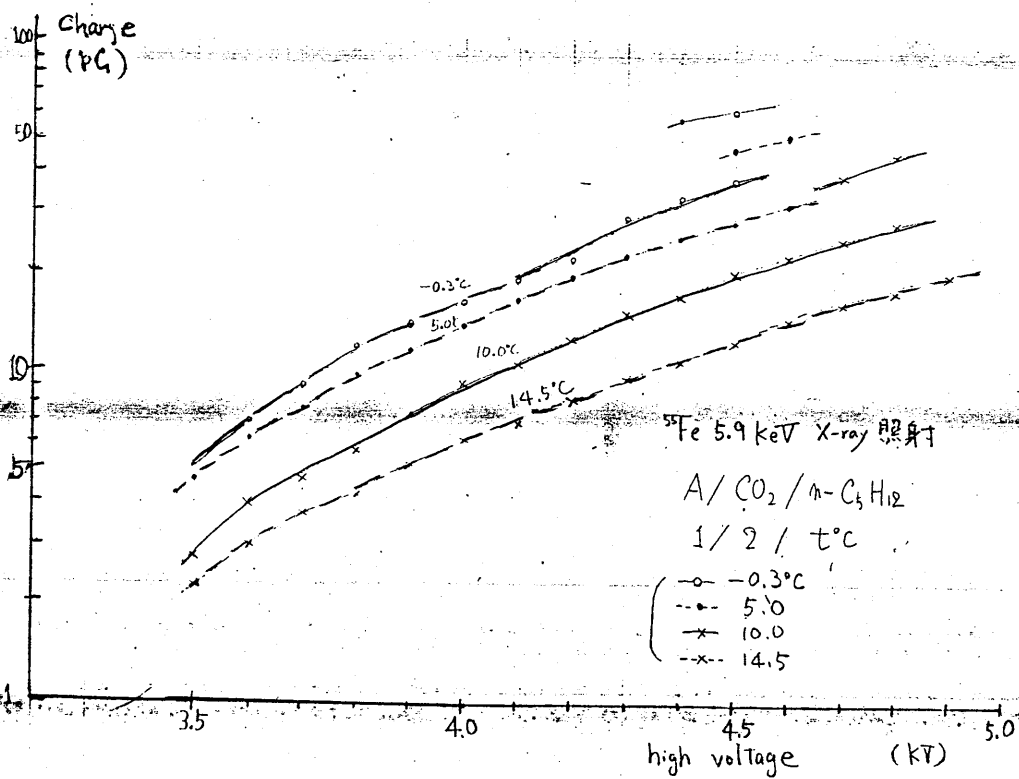


Fig. 5-7

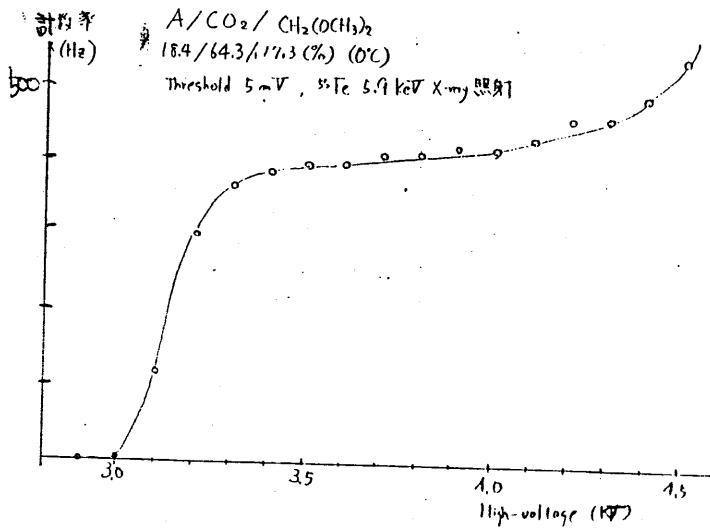


Fig. 5-8

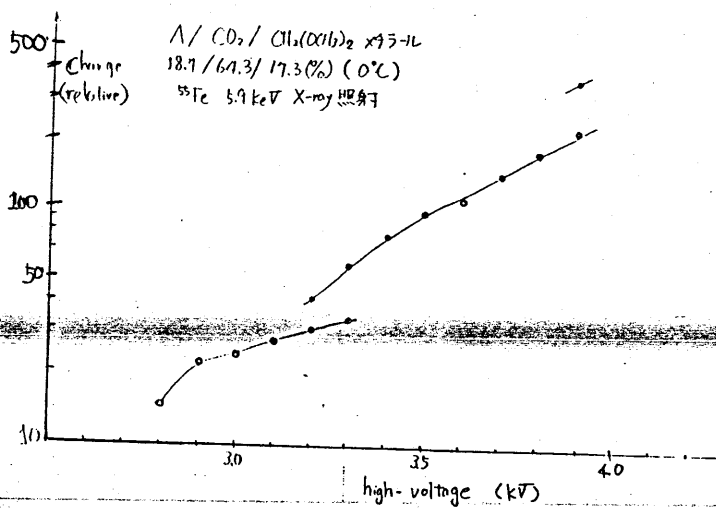


Fig. 5-9

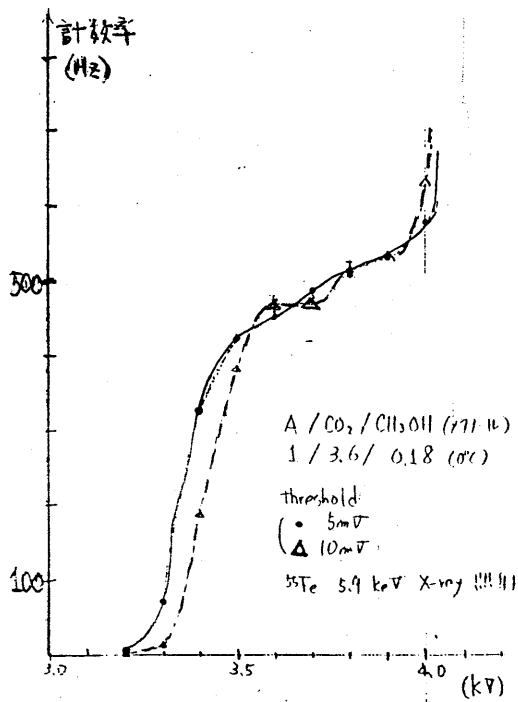


Fig. 5-10

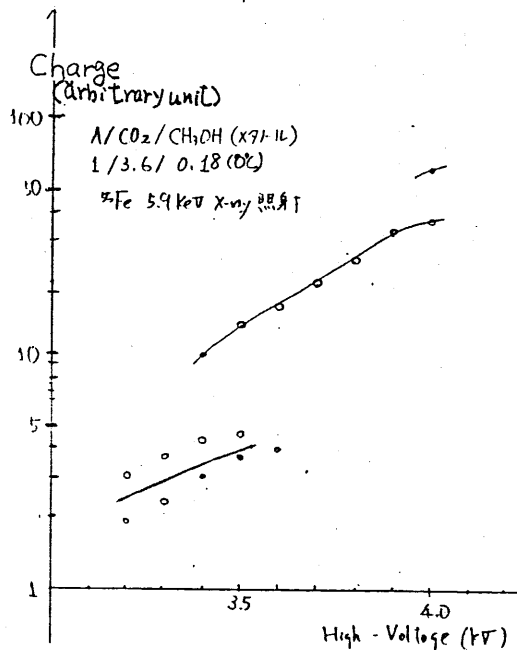


Fig. 5-11

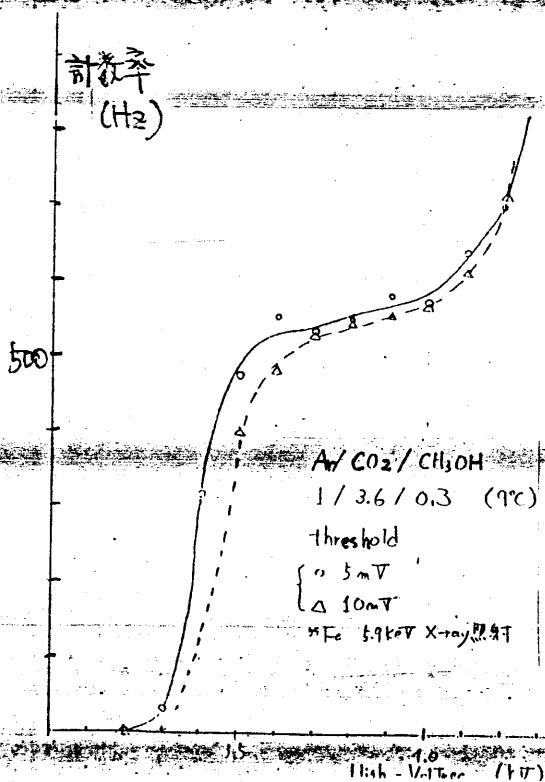


Fig. 5-12

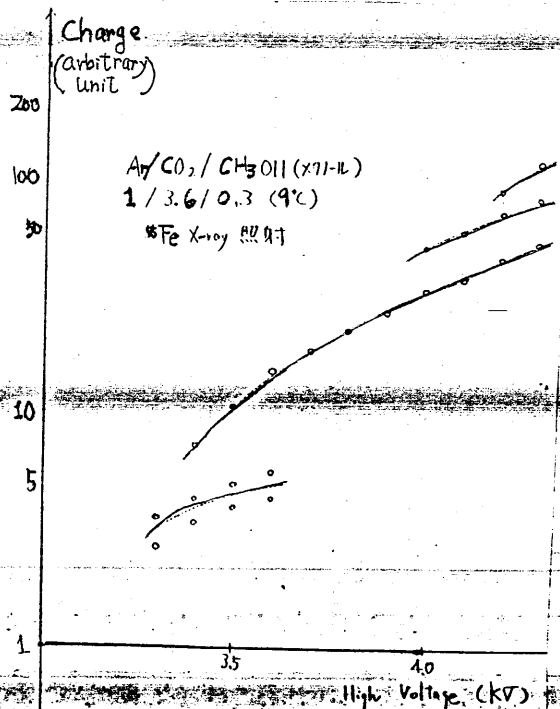


Fig. 5-13

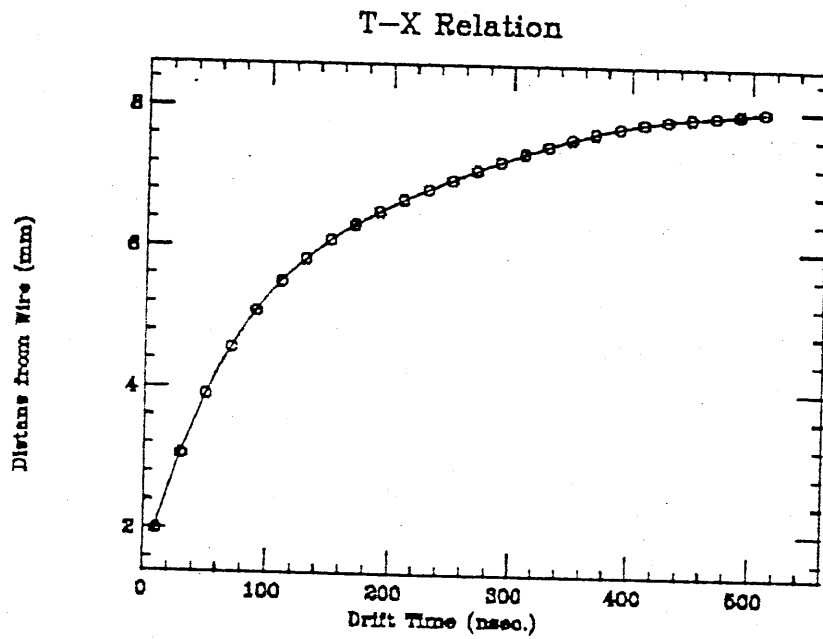


Fig. A-1

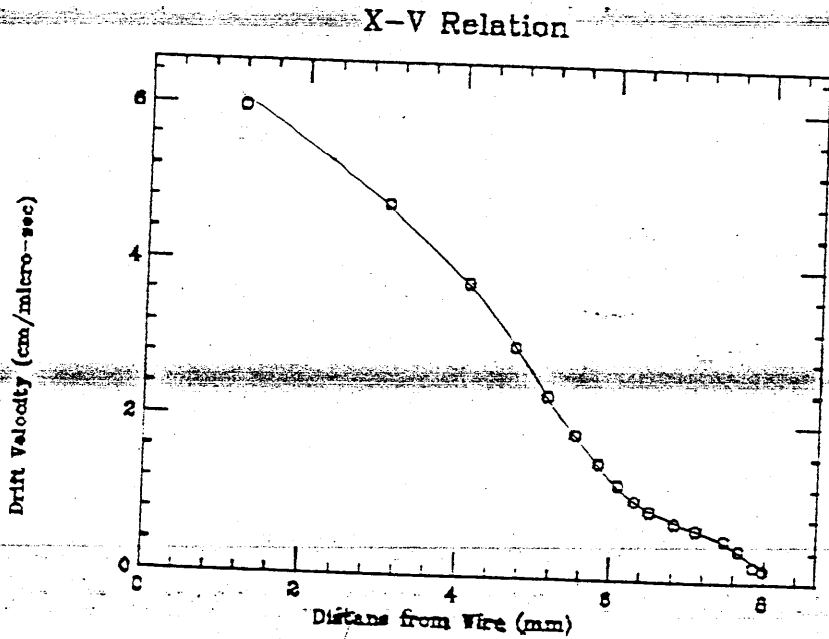


Fig. A-2

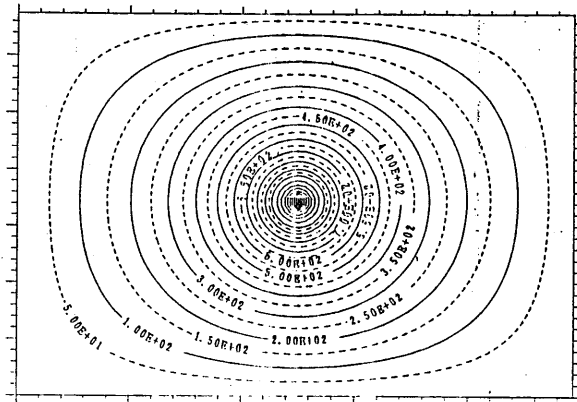


Fig. A-3

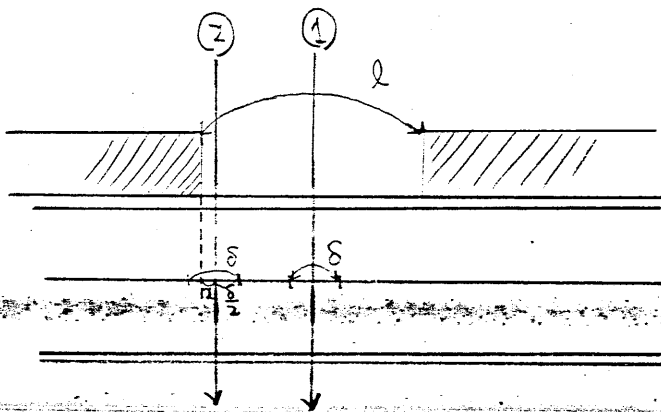


Fig. A-4

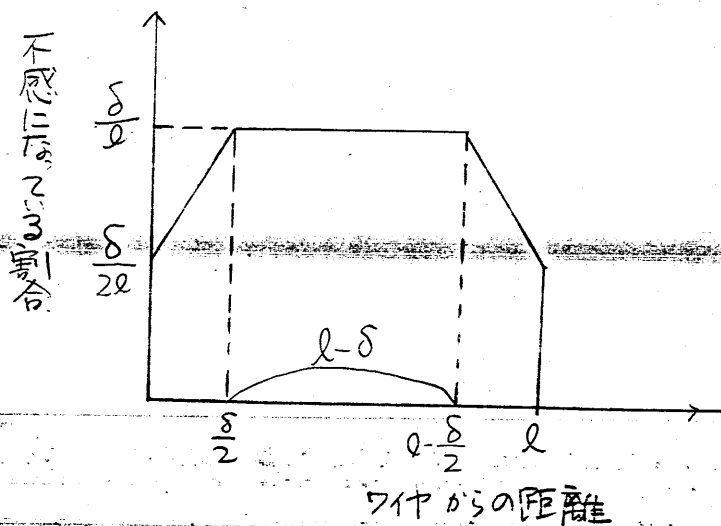


Fig. A-5