ニュートリノ振動実験に用いる鉛ガラス検出器の特性測定

剣持 範
新潟大学自然科学研究科

１９９７年3月２６日

目 次

1 実験の目的 **2**

1.1 electron beam 2

2 setup **2**

2.1 lead glass の set up 2

2.2 ブロックダイヤグラム 3

2.3 鉛ガラス 3

3 測定 **4**

3.1 beam Energy 依存性 4

3.2 ADC ゲート幅依存性 4

4 解析結果 **5**

4.1 fitting 5

4.2 beam Energy 依存性 6

4.3 resolution 8

5 考察 **10**

5.1 beam Energy 50MeV の場合 10

5.2 ゲート幅依存性 11

5.3 low Energy の resolution 12

6 pedestal **13**

7 low Energy の scan **17**

8 電子ビーム入射位置依存性 **20**

8.1 set up 20

8.2 測定結果 21

9 電子ビーム入射角依存性 **31**

9.1 set up 31

9.2 解析方法 32

9.3 測定結果 33

9.4 角度依存性 41

10 考察 **42**

11 今後の予定 **43**

1 実験の目的

E362(ロングベースライン neutrino 振動実験）では ν_μ ビームを使用するが、この ν_μ ビームには微量の ν_e が含まれる。この ν_e の量を見積もるため、 ν_e 荷電カレント反応からくる電子のエネルギーを測定するのに鉛ガラスを用いる。そこで用いられる鉛ガラスの特性を本実験では調べた。

1.1 electron beam

東京大学原子核研究所の 1.3GeV 電子シンクロトロンをを利用して測定は行なわれた。リング内に挿入したラディエータからの制動放射γ線を引きだし、標的にあて、そこで対生成した電子または陽電子を磁石で運動量を選択して利用した

2 setup

2.1 lead glass のset up

今回の setup は以下の図 1 のとおりである。

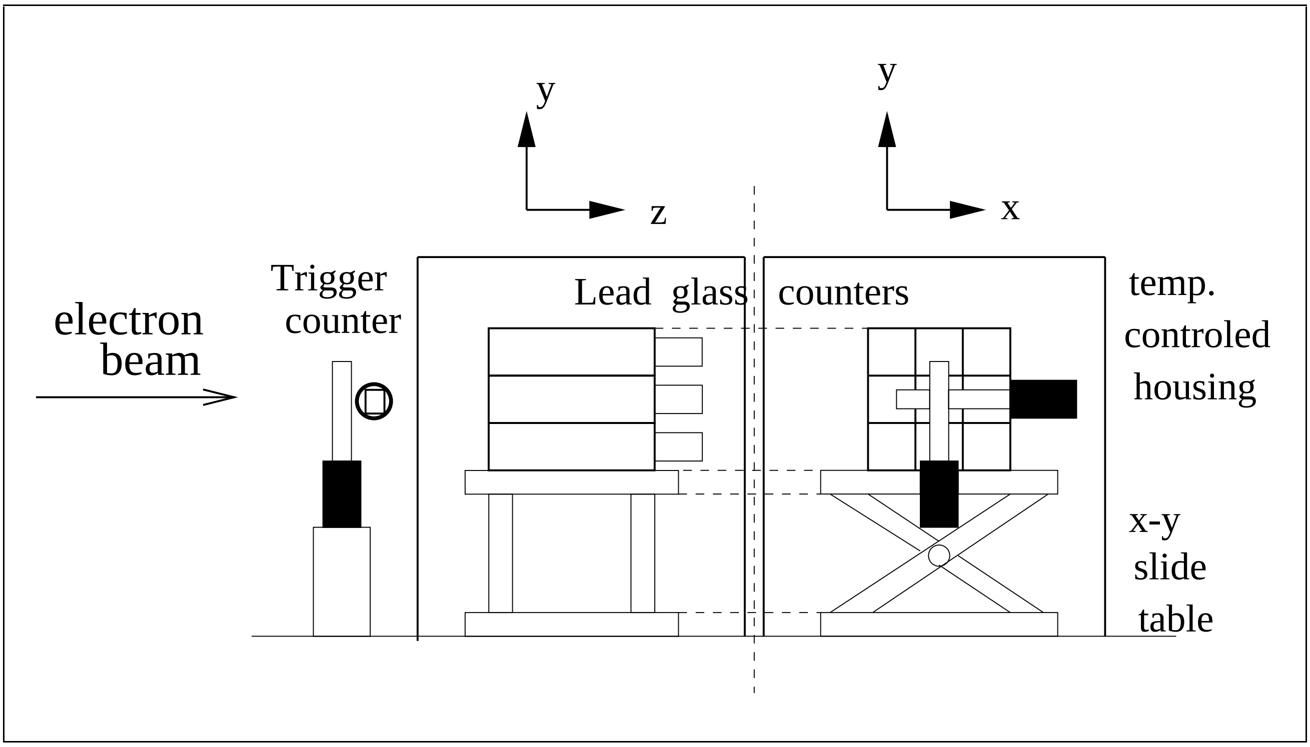

図 1: セットアップ

2.2 ブロックダイヤグラム

鉛ガラスの測定のためのブロックダイヤグラムは図 2 の通りである。

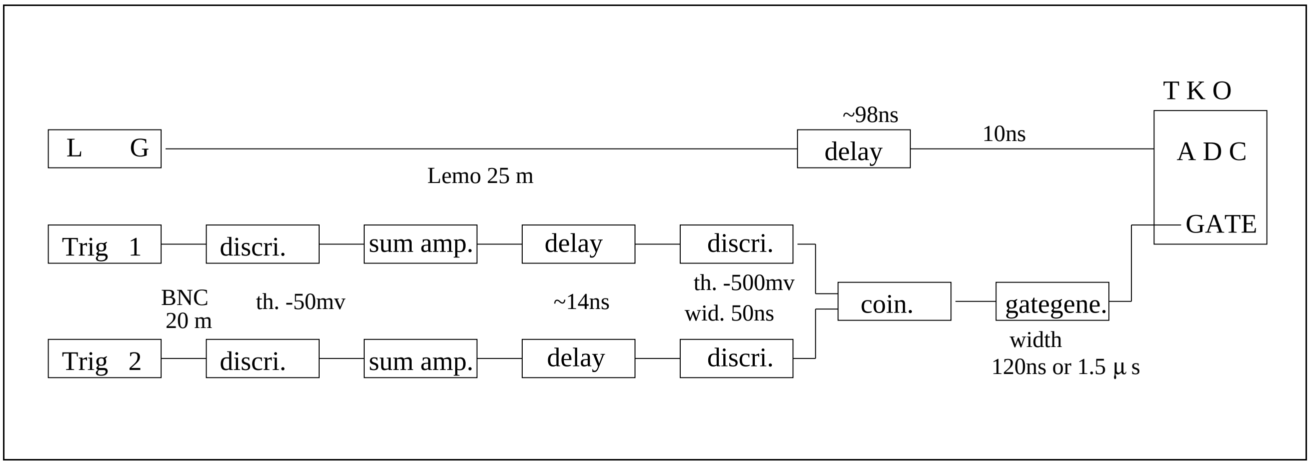

図 2: ブロックダイヤグラム

2.3 鉛ガラス

9 個の鉛ガラスは図 3 の様に set した。

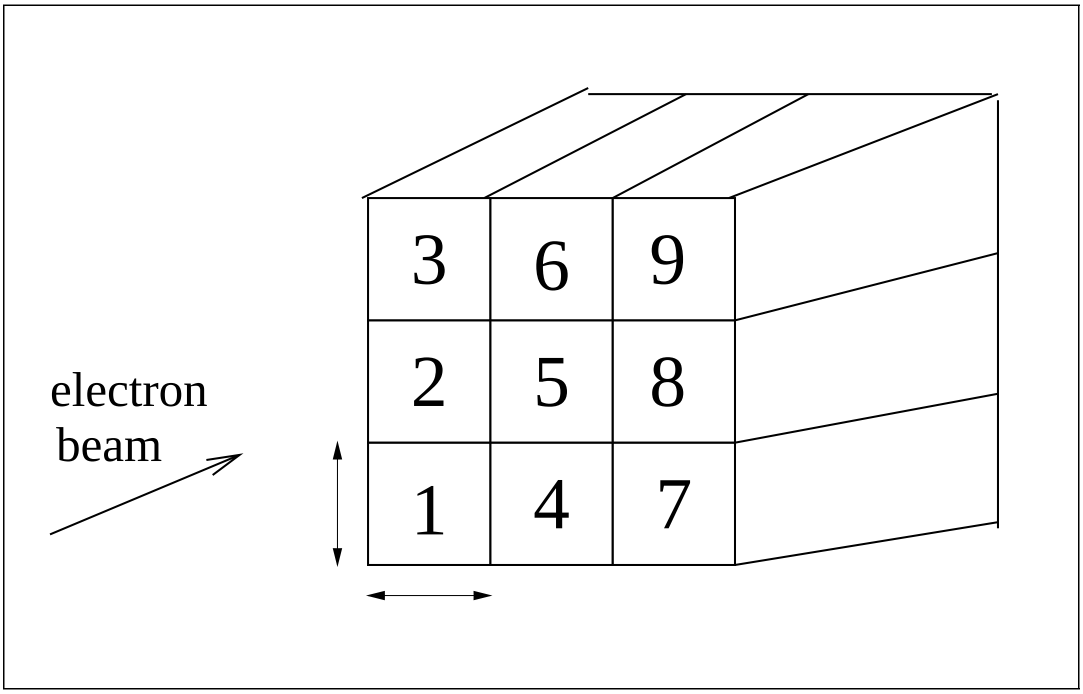

図 3: 鉛ガラスのセットアップ

今後はそれぞれの番号のふられている鉛ガラスをそれぞれ LG1,LG2,......LG9 と呼ぶことにする。

3　測定

3.1　beam Energy 依存性

beam Energy 依存性は各鉛ガラスの中心に beam を入射角度 0°で打ち込んだ場合の測定を行なった。
beam の 入射エネルギーは 50MeV ~ 1100MeV の数点である。

3.2　ADC ゲート幅依存性

また TKO の ADC ゲートのゲート幅については、 120ns と 1.5μs にした場合について測定を行ない、比較を行なうことにした。

4 解析結果

4.1 fitting

図 4 に測定結果の例を示した。横軸は TKO の ADC count で、縦軸は event 数である。各測定結果は gauss 分布で fitting を行なった。それぞれに各パラメータが書かれている。
また、各測定結果からは pedestal の値は引いてある。

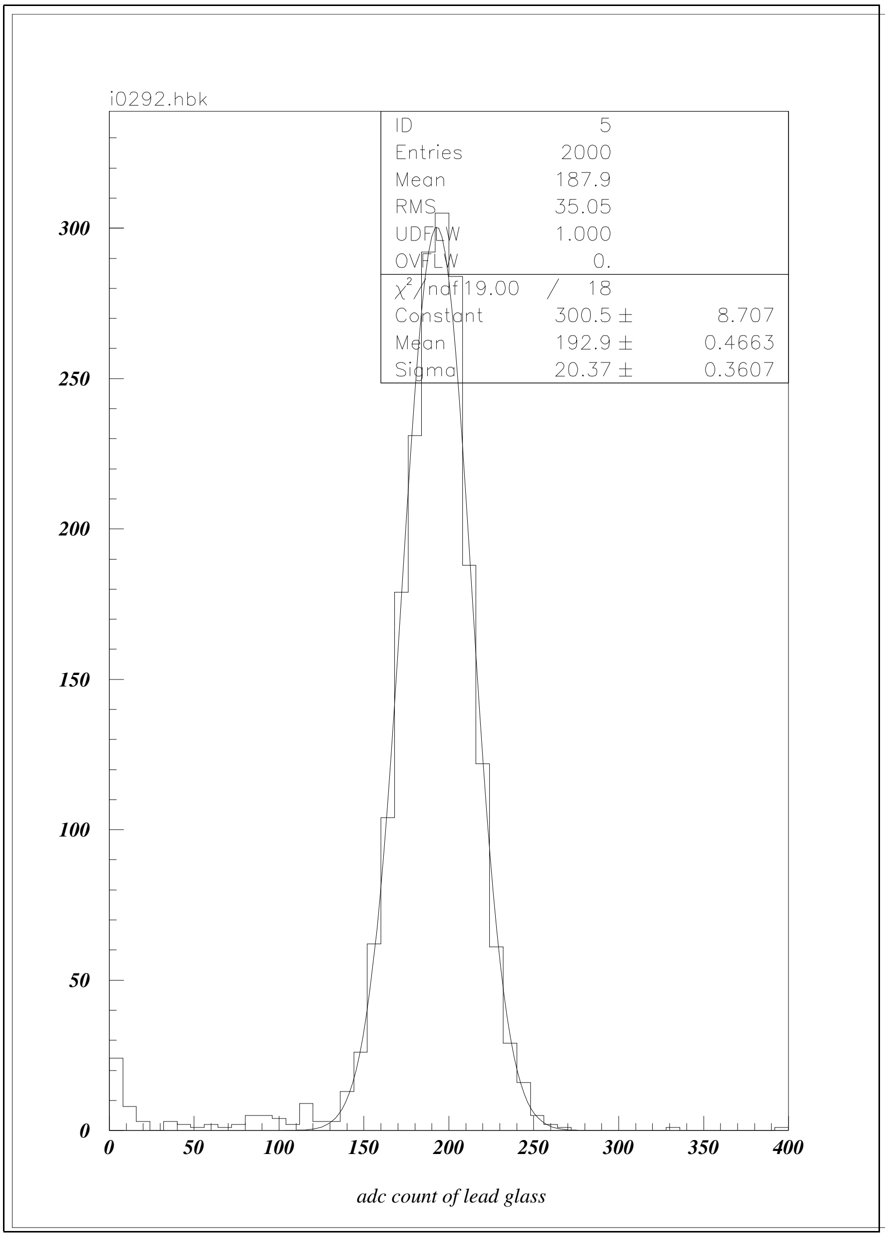

図 4: 測定結果の例 (Gauss fit したもの)

4.2 beam Energy 依存性

各鉛ガラスについて、 beam Energy 依存性は図 5 に示した。横軸は beam Energy、縦軸は gauss fit によって求めた。 ADC の mean value である。
ADC のゲートは 120ns,1.5μs の場合について、それぞれ beam Energy 依存性を調べた。各図は

$$adc\ mean = (P1) + (P2) \times E_e$$

として、線形最小二乗法で fitting した。
ここで、 E_e は electron beam Energy で、 P1,P2 はは fitting のパラメーターである。

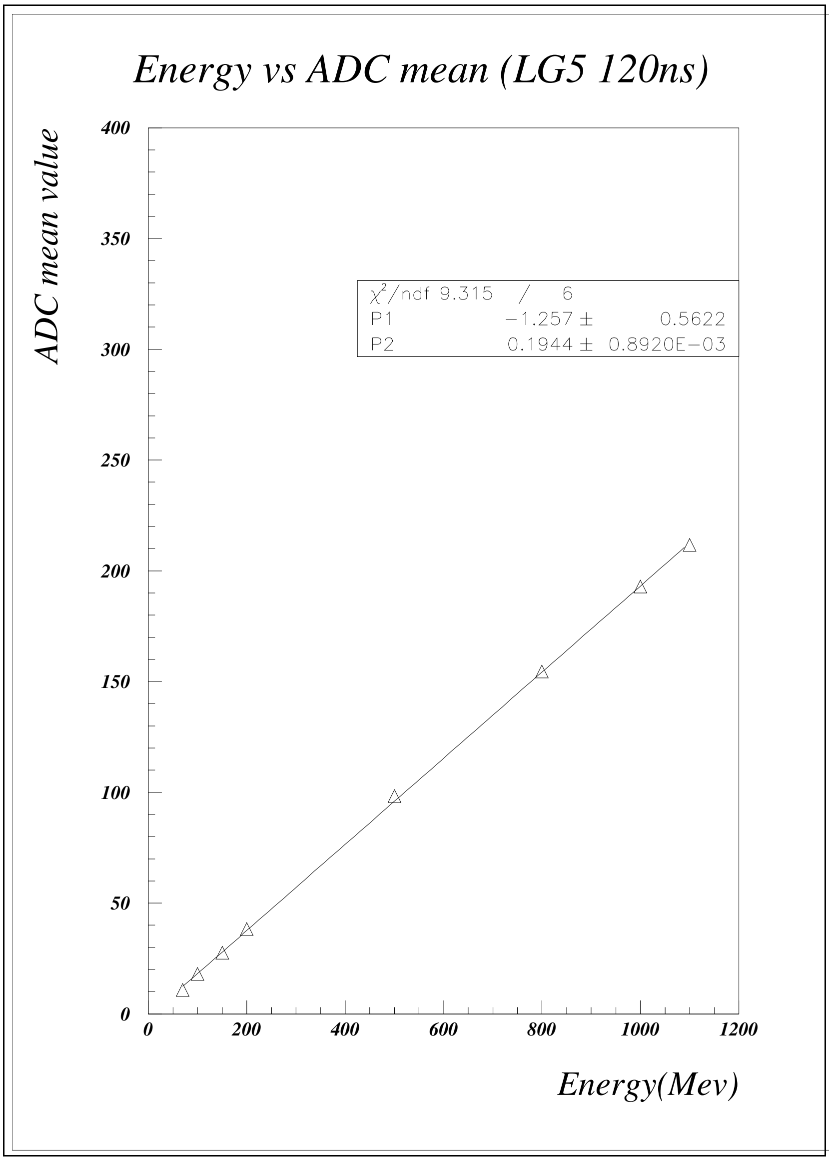

図 5: beam Energy vs adc mean の例 (LG5 120ns)

ADC ゲート幅 120ns の際の各 LG について、パラメータは以下の表 1 に示した。但し誤差は fitting の誤差である。

表 1: ADC mean vs. Energy の fitting parameter(120ns)

ゲート幅： 120ns	P1	P2
LG1	-0.318 $\pm$ 0.778	0.206 $\pm$ 0.001
LG2	-1.349 $\pm$ 0.638	0.196 $\pm$ 0.001
LG3	-0.887 $\pm$ 0.640	0.207 $\pm$ 0.001
LG4	0.115 $\pm$ 0.782	0.183 $\pm$ 0.001
LG5	-1.257 $\pm$ 0.562	0.194 $\pm$ 0.001
LG6	-1.457 $\pm$ 0.641	0.225 $\pm$ 0.001
LG7	-1.638 $\pm$ 0.777	0.199 $\pm$ 0.001
LG8	-0.766 $\pm$ 0.532	0.205 $\pm$ 0.001
LG9	-0.600 $\pm$ 0.523	0.199 $\pm$ 0.001

ADC ゲート幅 1.5μs の際の各 LG について、パラメータは以下の表 2 に示した。但し誤差は fitting の誤差である。

表 2: ADC mean vs. Energy の fitting parameter(1.5 μ s)

ゲート幅： 1.5μs	P1	P2
LG1	-3.398 $\pm$ 0.779	0.285 $\pm$ 0.001
LG2	-4.885 $\pm$ 0.637	0.274 $\pm$ 0.001
LG3	-7.680 $\pm$ 0.640	0.276 $\pm$ 0.001
LG4	-8.660 $\pm$ 0.616	0.267 $\pm$ 0.001
LG5	-4.692 $\pm$ 0.563	0.274 $\pm$ 0.001
LG6	-4.361 $\pm$ 0.518	0.309 $\pm$ 0.001
LG7	-4.078 $\pm$ 0.776	0.290 $\pm$ 0.001
LG8	-3.043 $\pm$ 0.648	0.292 $\pm$ 0.001
LG9	-3.523 $\pm$ 0.380	0.290 $\pm$ 0.001

今後の解析は上で求められたパラメータを使って、 adc mean の値より energy の値を求め、 beam 入射位置依存性などを調べる。

4.3 resolution

各測定結果の resolution は、 gauss fit の際のパラメーターにより resolution=sigma/mean として、求めることが出来る。

図 6 は各 LG について beam Energy と resolution の関係（ゲート幅 120ns,1.5μs）を示したものである。
横軸が beam Energy で縦軸が resolution(sigma/mean) である。両軸ともに Log plot にしてある。

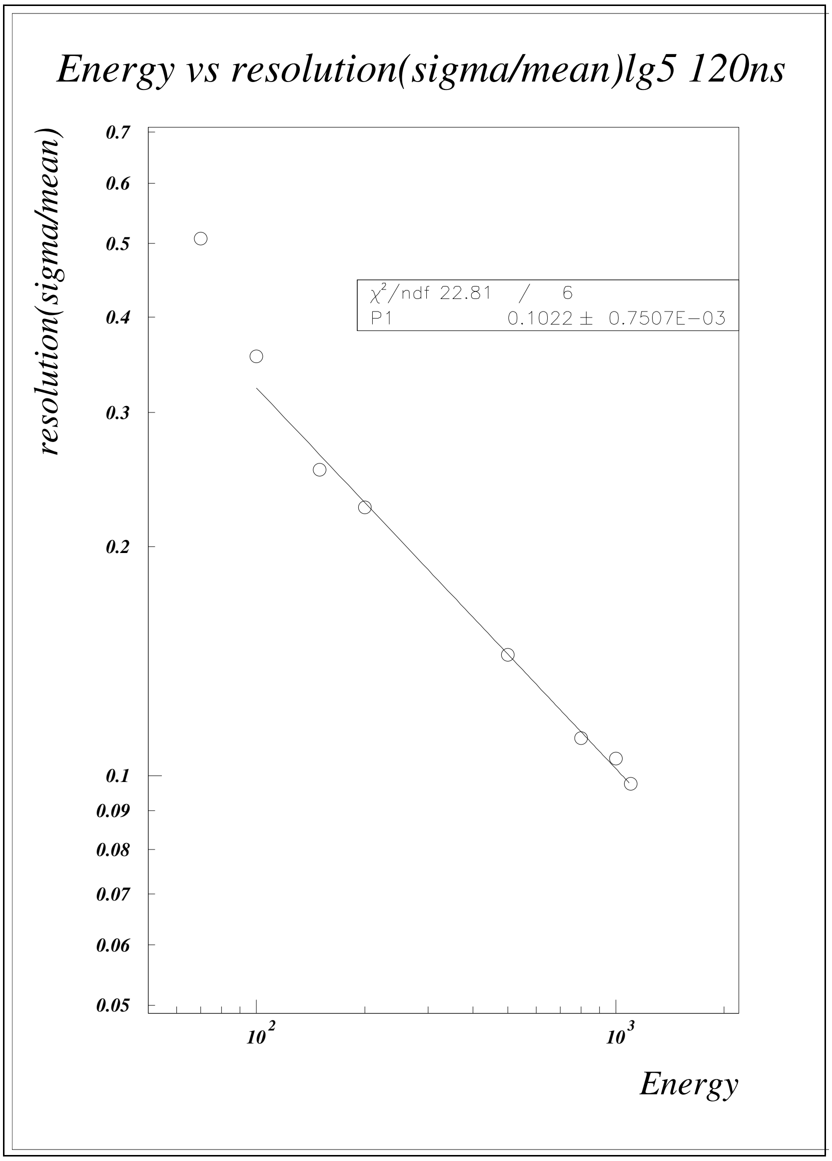

図 6: beam Energy vs resolution(sigma/mean) の例 (LG5 120ns)

ここで、 beam Energy と resolution の間には以下の関係があることが知られている。

$$resolution = \frac{k}{\sqrt{E_e}}$$

k は定数。よって、図 6 はそれぞれ上式によって fitting を行なった。

各 fitting パラメータは以下の表 3 の様になった。但し誤差は fitting の誤差である。

表 3: beam Energy vs resolution のパラメーター

	k(ゲート幅 120ms)	k(ゲート幅 1.5 μ s)
LG1	0.0844 ± 0.0006	0.0968 ± 0.0008
LG2	0.0860 ± 0.0008	0.0986 ± 0.0013
LG3	0.0929 ± 0.0008	0.0984 ± 0.0011
LG4	0.0850 ± 0.0007	0.0932 ± 0.0009
LG5	0.1022 ± 0.0007	0.1171 ± 0.0009
LG6	0.0809 ± 0.0007	0.0918 ± 0.0010
LG7	0.0934 ± 0.0008	0.1162 ± 0.0002
LG8	0.0956 ± 0.0007	0.1101 ± 0.0009
LG9	0.0940 ± 0.0010	0.1067 ± 0.0012

5　考察

5.1　beam Energy 50MeV の場合

図 7 に入射エネルギー 50MeV の測定結果を示した。明らかに pedestal の中に peak が埋もれているのがわかる。よって入射エネルギー 50MeV のデーターは省いてある。 low energy での LG の HV を変えた場合については、今後改めて議論したい。

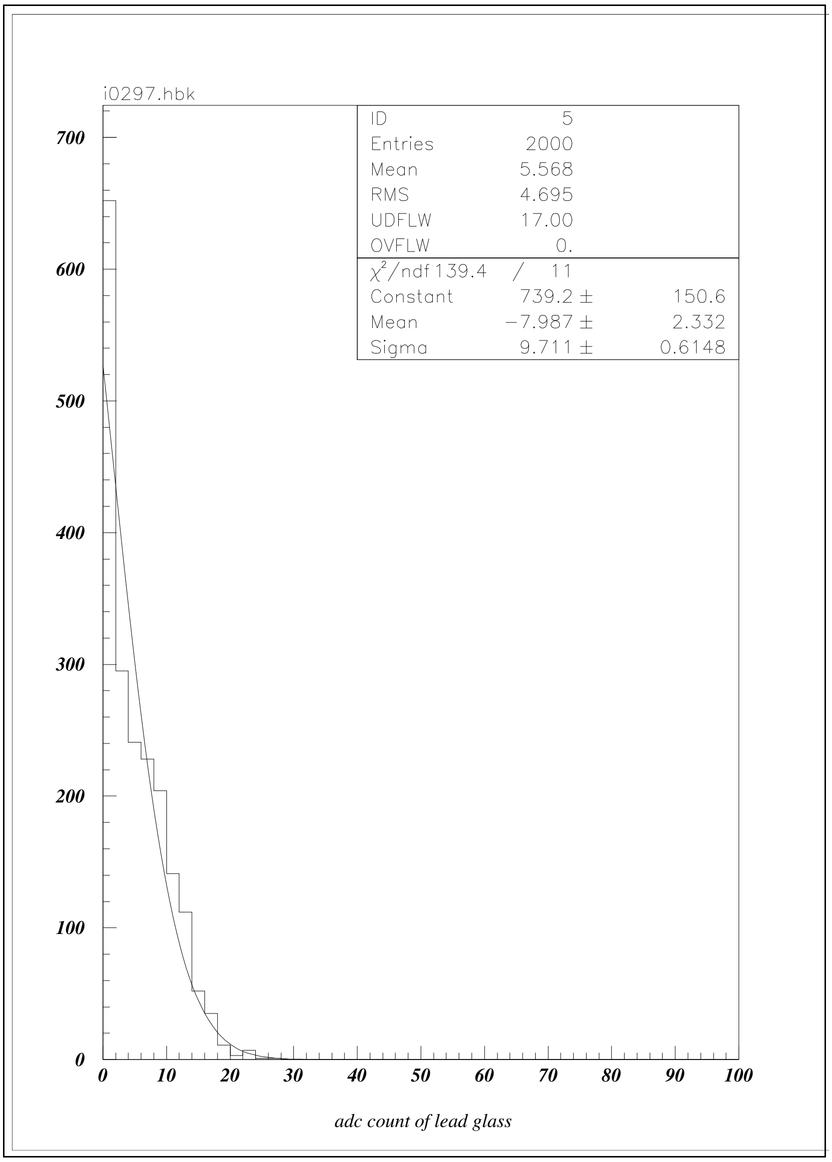

図 7: 入射エネルギー 50MeV(LG5 120ns)

5.2 ゲート幅依存性

TKO の ADC ゲート幅を 120ns と $1.5\mu s$ にした場合、図 8 のような違いがみられた。

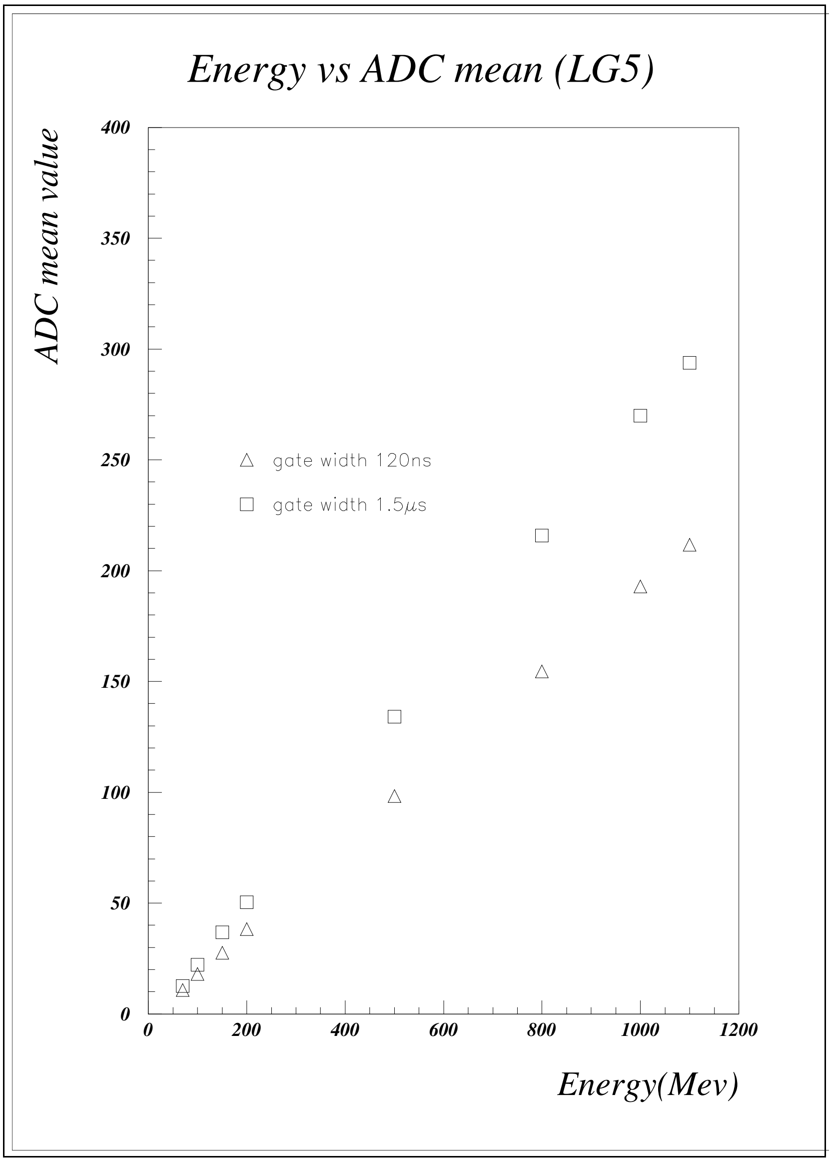

図 8: ゲート幅依存性 (LG5)

このように、ゲート幅 120ns の時の方が 1.5μs のときより ADC count が小さいのがわかる。これは、 LG のシグナルと GATE をオシロスコープでみたところ（図９）によると LG からの signal が tale を引いていて、 ADC のゲートに完全に入りきってないということが考えられた。

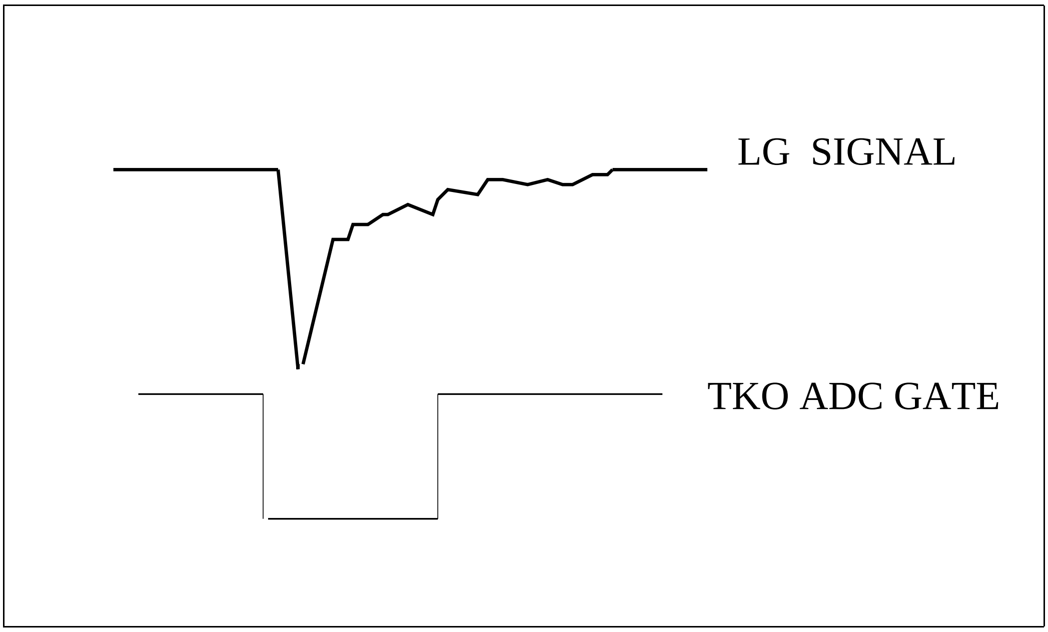

図 9: シグナルと ADC ゲートのスケッチ

5.3 low Energy の resolution

図６のように、 beam の Energy の低いところ (70MeV ~ 100MeV) では、resolution=k/$\sqrt{E_e}$ の fitting からはずれているようにおもわれる。これは、他の鉛ガラスにおいても同じような傾向がみられる。誤差の議論をしてみないことには、はっきりとはわからないが、 beam の Energy の低いところでは、 pedestal の寄与が大きく、正確な mean、 sigma が求められていないようにおもわれる。

6 pedestal

pedestal についての解析をしておく。

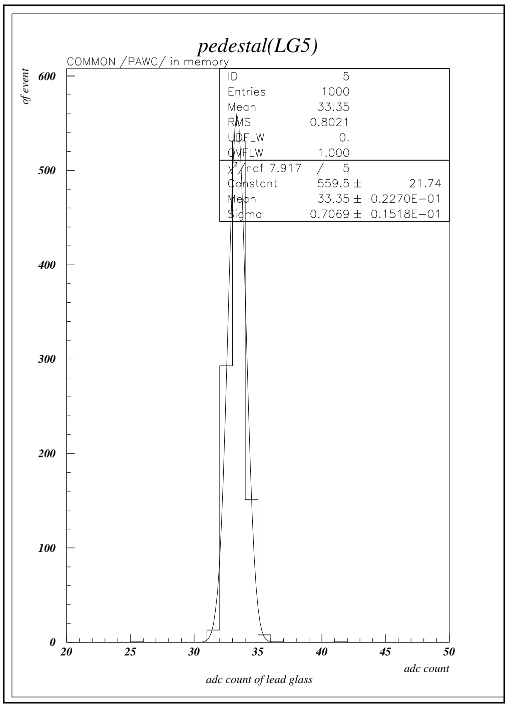

図 10: pedestal(lg5)

上図は lg5 の pedestal の分布である。 pedestal の解析は lg5 についてのみ行なった。各解析は pedestal の値を引いてあるが、その pedestal は測定に出来るだけ設定の近いものを引いてある。しかし、 lg への HV や Energy は影響しないものとしているため、それを確かめておく必要がある。同様に時間依存性等についても調べておく。

pedestal の LG への HV 依存性は以下のとおりである。

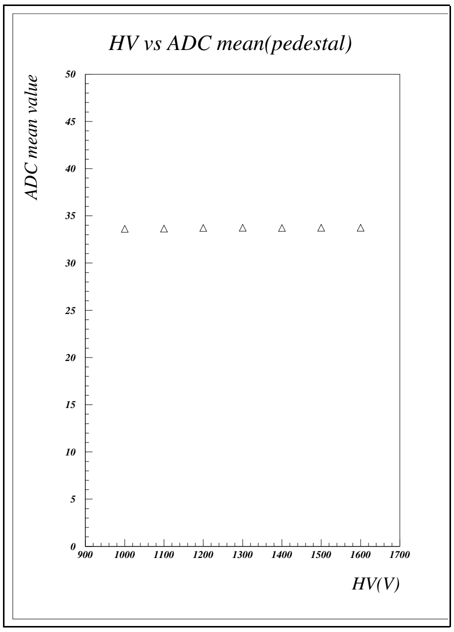

図 11: pedestal の LG への HV 依存性

pedestal の LG への入射エネルギー依存性は以下のとおりである。

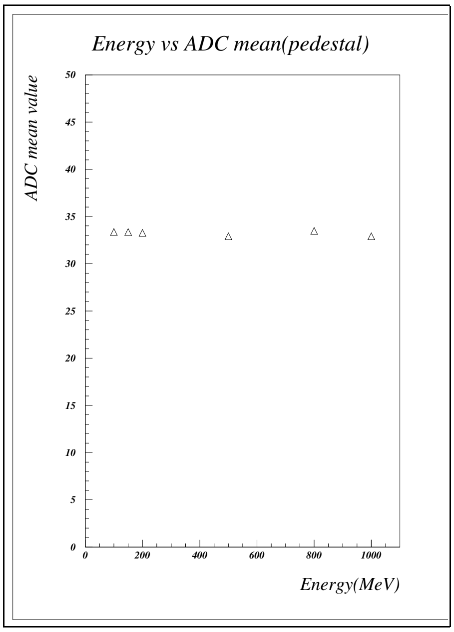

図 12: pedestal の lg への入射エネルギー依存性

以上の結果より HV および入射エネルギーは影響しないことが確認された。

以下に pedestal の gate 幅依存性を示す。

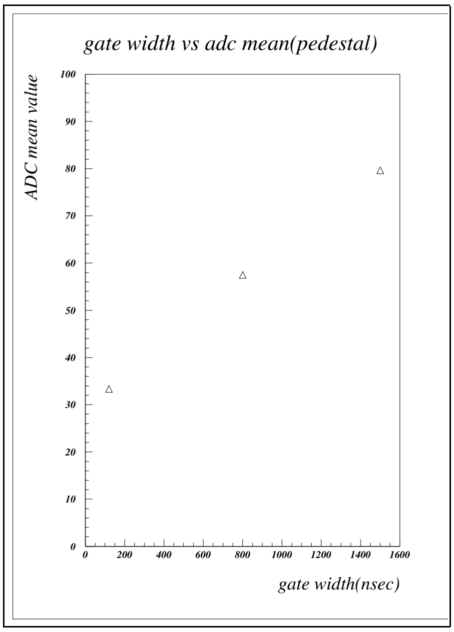

図 13: pedestal の gate 幅依存性

以下に sigma（幅）のゲート幅依存性を示す。

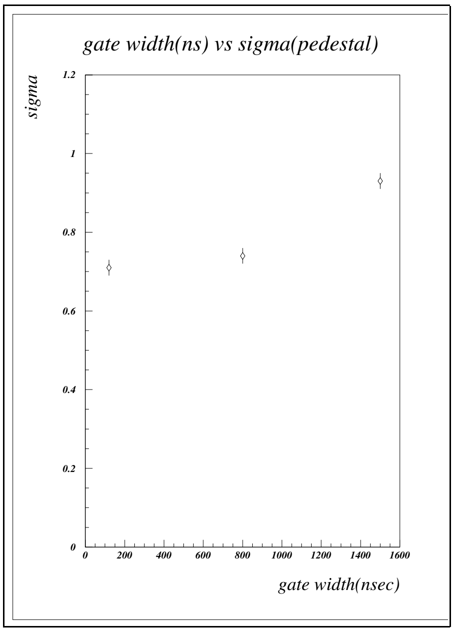

図 14: sigma（幅）のゲート幅依存性

sigma（幅）については、ある程度の傾向は見えるがあまり大きな差はない。

時間依存性について
pedestal の時間依存性について以下に示す。

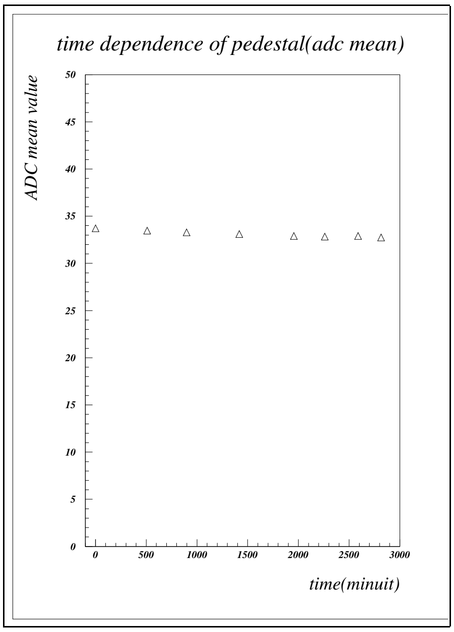

図 15: pedestal の時間依存性

sigma（幅）の時間依存性について以下に示す。

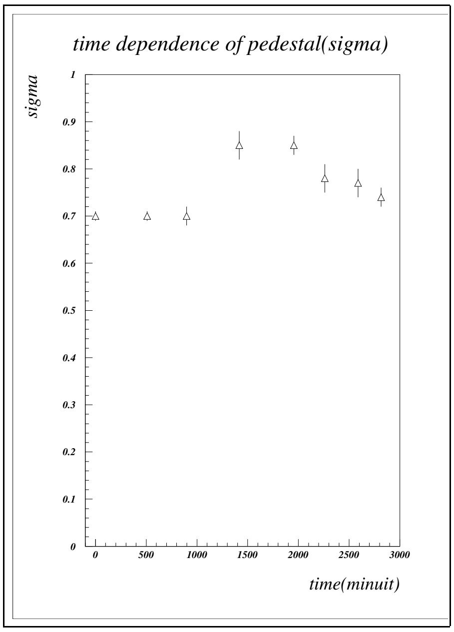

図 16: sigma（幅）の時間依存性

pedestal の値については特に時間依存性はみられない。 sigma（幅）についても、 0.9 という値は ADC の 2 count ぐらいであまり大きさはないといってよい。

sigma（幅）が時間によって不安定なのは beam の intensity が影響しているとおもわれる。このことについてもっと議論するためには、分解能の良い ADC を使う必要がある。

7 low Energy の scan

最初、解析を行なったように、入射 Energy 50MeV のとき、シグナルをみることはできなった。そこで、 low Energy について、 LG への HV を高くすることによってシグナルをみることができるかどうか、確かめることにした。
予定では lg5 で行なうことになっていたが、一番 gain の低い lg5 では最大定格電圧をかけても signal が見えなかったため、もっとも gain の高い lg6 を用いることになった。

測定は beam Energy が 50MeV から 200MeV の数点。 lg6。
HV=1340V(通常 1140V)。 TKO への gate width は 120ns,1.5μs の 2 つについて。

gate width 120ns の結果は以下のようになった。

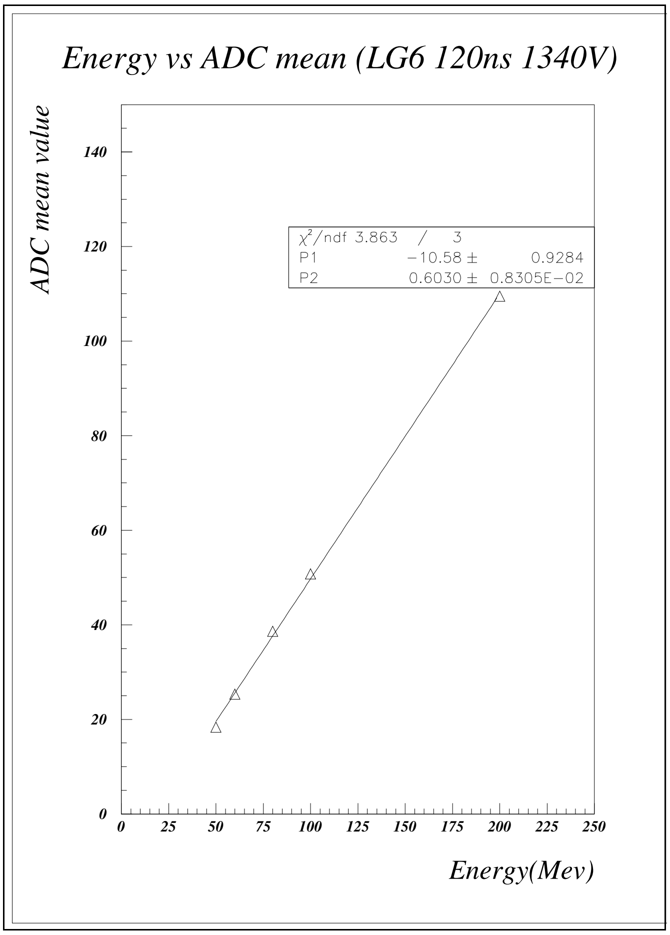

図 17: low Energy scan(lg6,120ns)

Energy について、直線性がみえる。これにより LG への印加電圧を高くすることによって、 low Energy においても signal がみえるものもあるということがわかる。

HV=1140V との比較は以下の様になった。

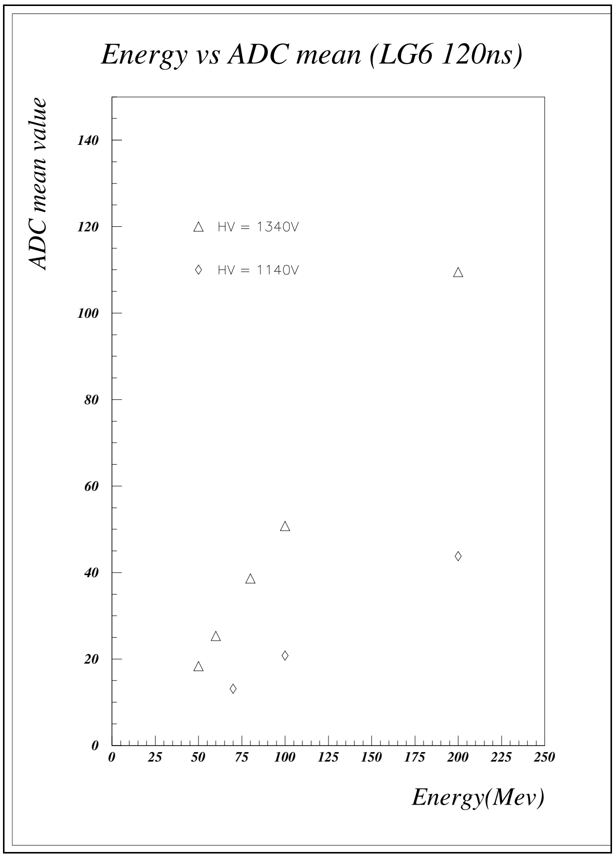

図 18: low Energy scan(HV による違い,120ns)

HV の値を高くすることによって signal の ADC の値が増えていることがわかる。これにより、 ADC peak は signal であることが確認できる。

同様に、 gate width 1.5μs の結果は以下のようになった。

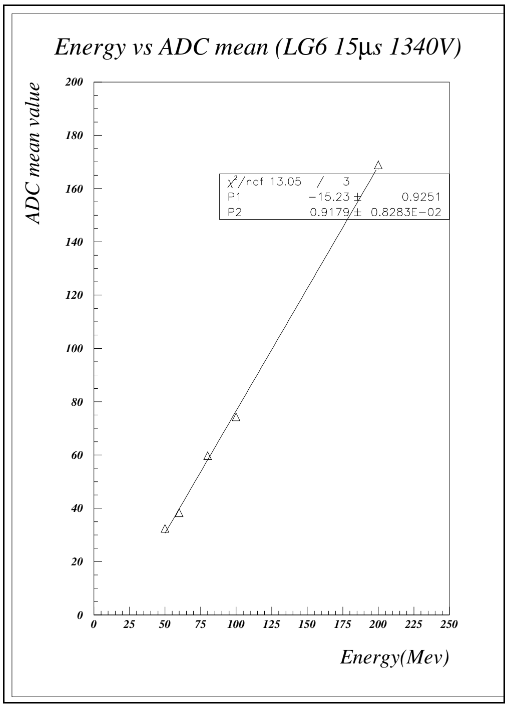

図 19: low Energy scan(lg6,1.5μs)

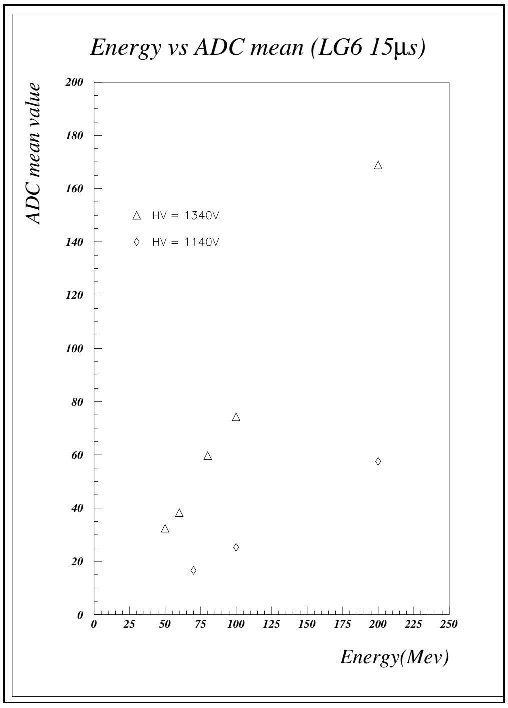

図 20: low Energy scan(HV=1140V との比較,1.5μs)

8　電子ビーム入射位置依存性

8.1　set up

　電子ビームの入射位置依存性は、 lg の x テーブル及び y テーブルを移動することによって測定を行なった。
座標は真中に置いてある LG5 の中心を (0,0) 決め、図２１のように +x 方向、 +y 方向とした。

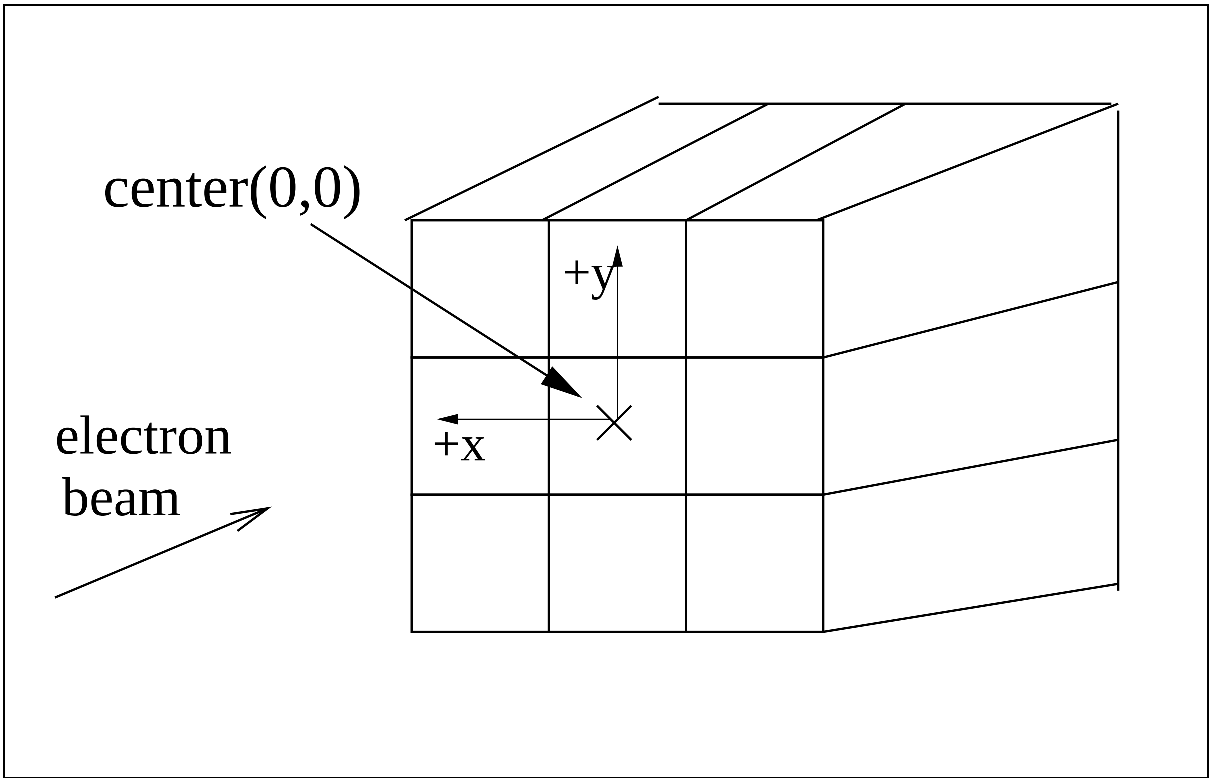

図 21: 入射位置依存性の set up

　各 LG の ADC の値は、 Energy vs ADC count で求められたパラメーター（表１）により event by event で Energy の値に換算して足し合わせた。
その結果を入射したビームのエネルギーと比較を行なった。
測定はゲート幅 120ns、 x = -100mm ~ 100mm、 y = 0,40,60mm
入射エネルギー 100MeV,200MeV,500MeV,800MeV,1000MeV で行なった。

8.2　測定結果

各 LG の Energy 換算したものは以下のようになった。
以下の図２２は、 x = 60mm,y=60mm, 入射ビーム 800MeV の場合である。

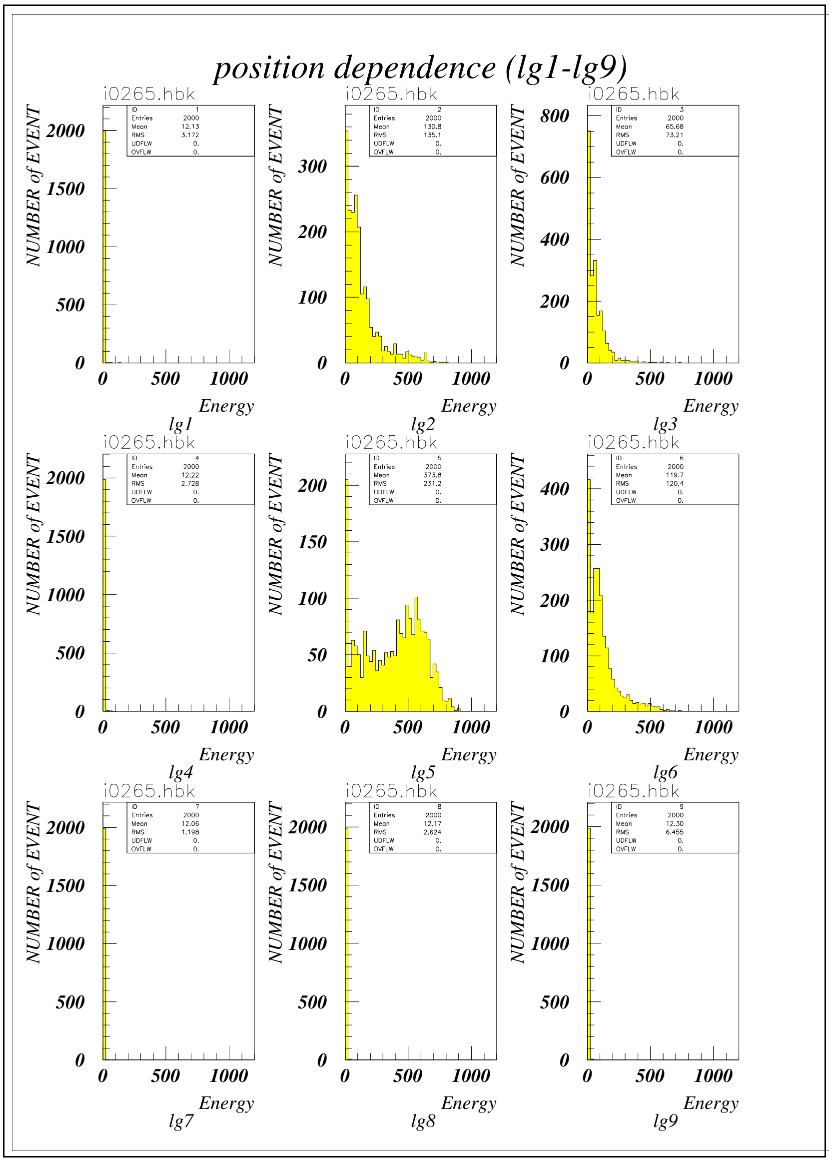

図 22: 各 LG の Energy

x = 60mm,y=60mm は、４つの LG の境界点の位置に当る。そのため、４つの LG それぞれに signal が見えていたことが上の図よりわかる。

先ほど (x=60mm,y=60mm,800MeV) の各 LG （１～９）のエネルギーを足し合わせたものが図２３である。

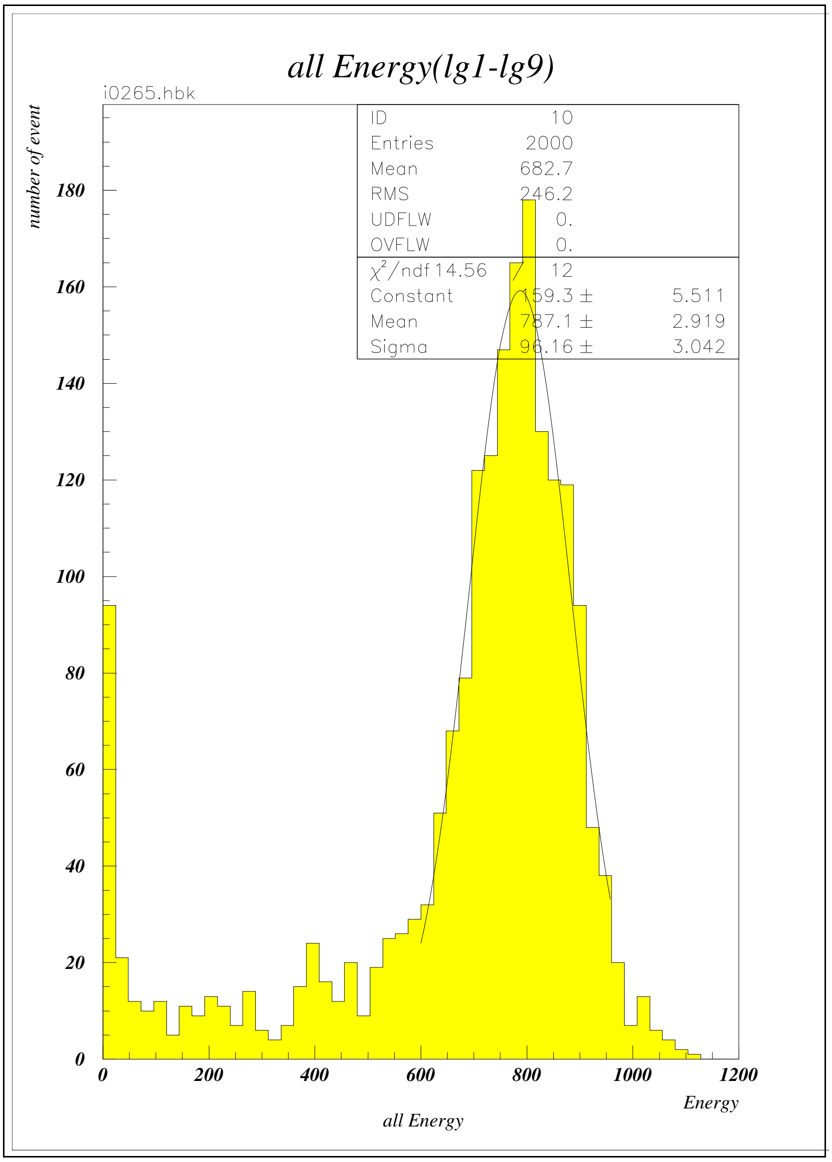

図 23: Energy 換算して足し合わせたもの

上の図を gauss fit することによって mean の値をもとめて Energy の再構成を行なった。その結果上の図より再構成された Energy は $787.1 \pm 2.9(MeV)$ であることがわかる。(x=60mm,y=60mm,800MeV)

以下に position dependence の結果を示す。
800MeV、 y=0,40,60mm

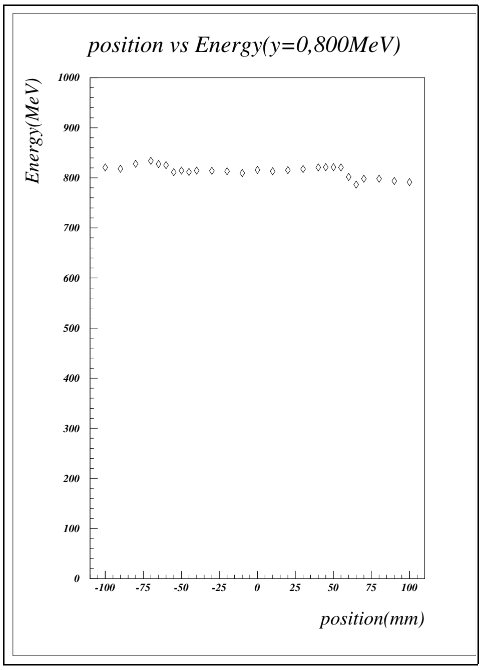

図 24: position vs Energy(y=0,800MeV)

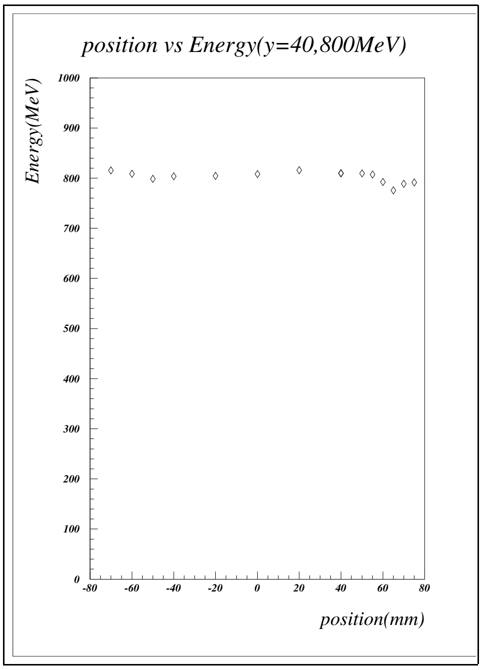

図 25: position vs Energy(y=40,800MeV)

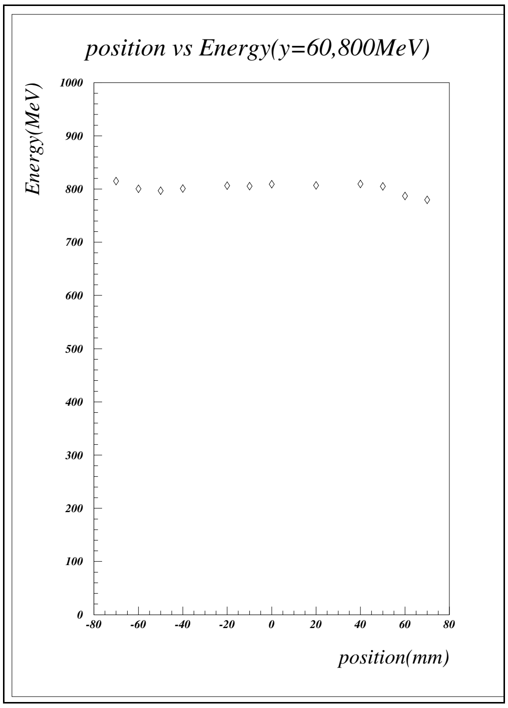

図 26: position vs Energy(y=60,800MeV)

200MeV、 y=0,40,60mm

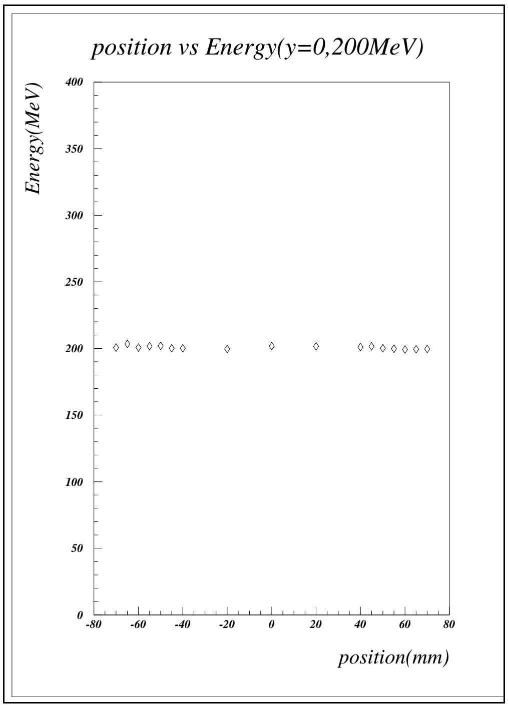

図 27: position vs Energy(y=0,200MeV)

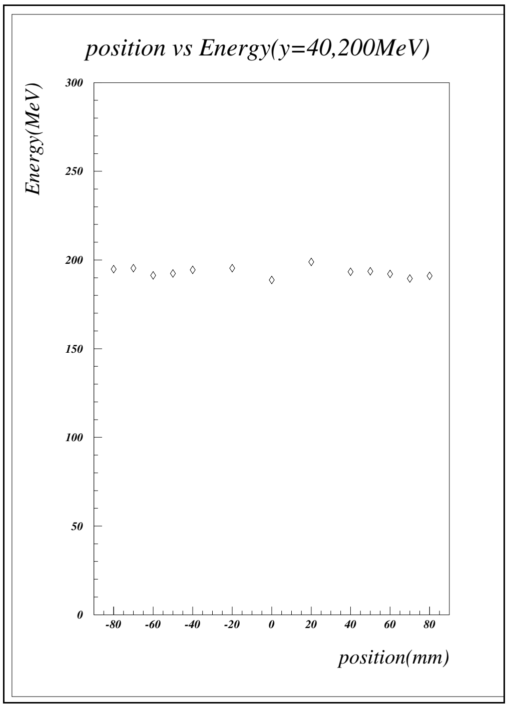

図 28: position vs Energy(y=40,200MeV)

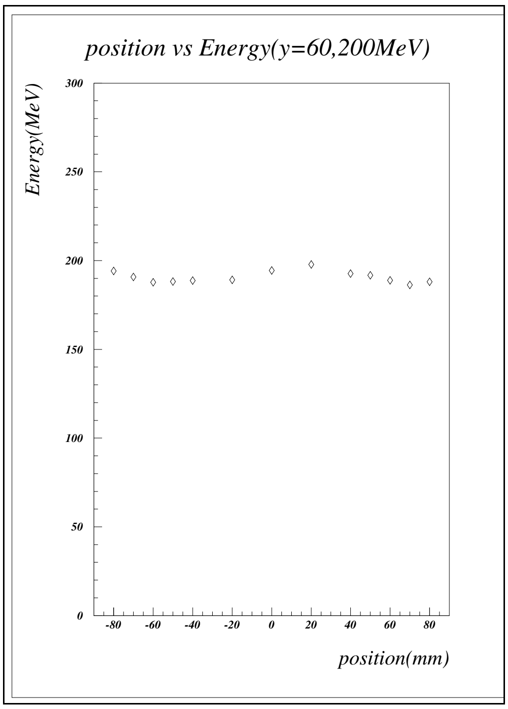

図 29: position vs Energy(y=60,200MeV)

y=0、 100,500,1000MeV

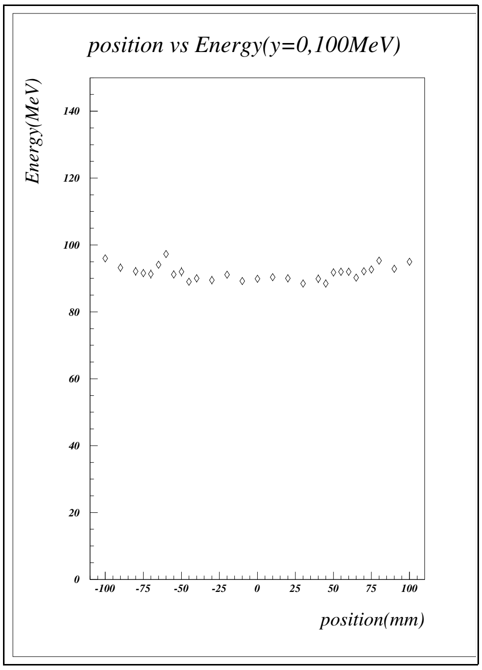

図 30: position vs Energy(y=0,100MeV)

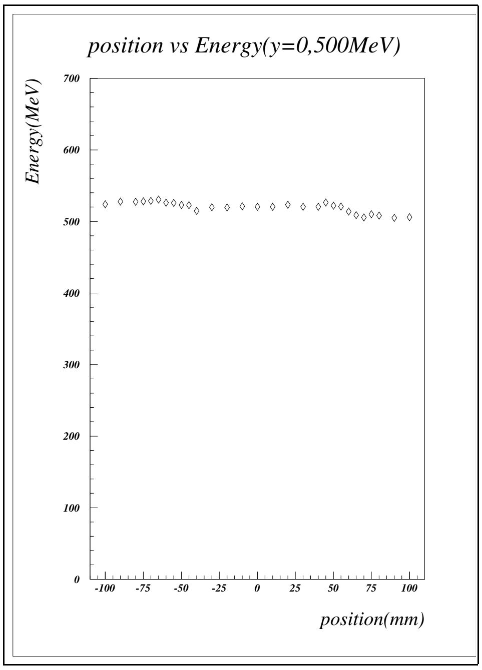

図 31: position vs Energy(y=0,500MeV)

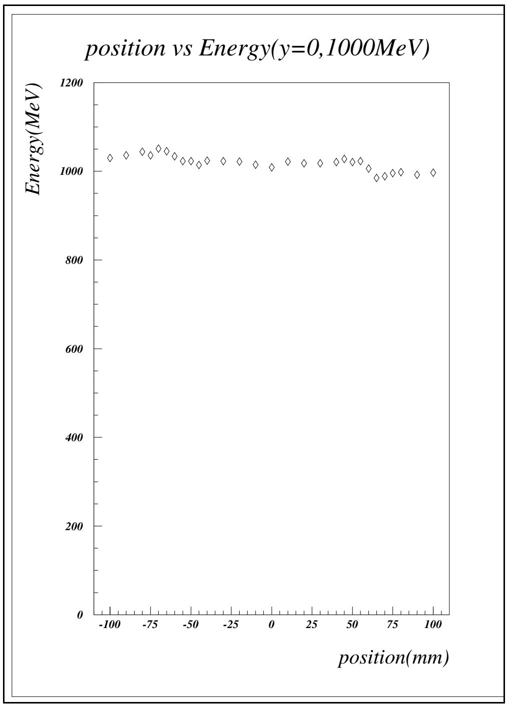

図 32: position vs Energy(y=0,1000MeV)

いずれも、だいたいは入射 Energy を再構成しているが、各 LG の境界の部分で変化が見られることがわかる。

gauss 分布の sigma は以下のようになった。

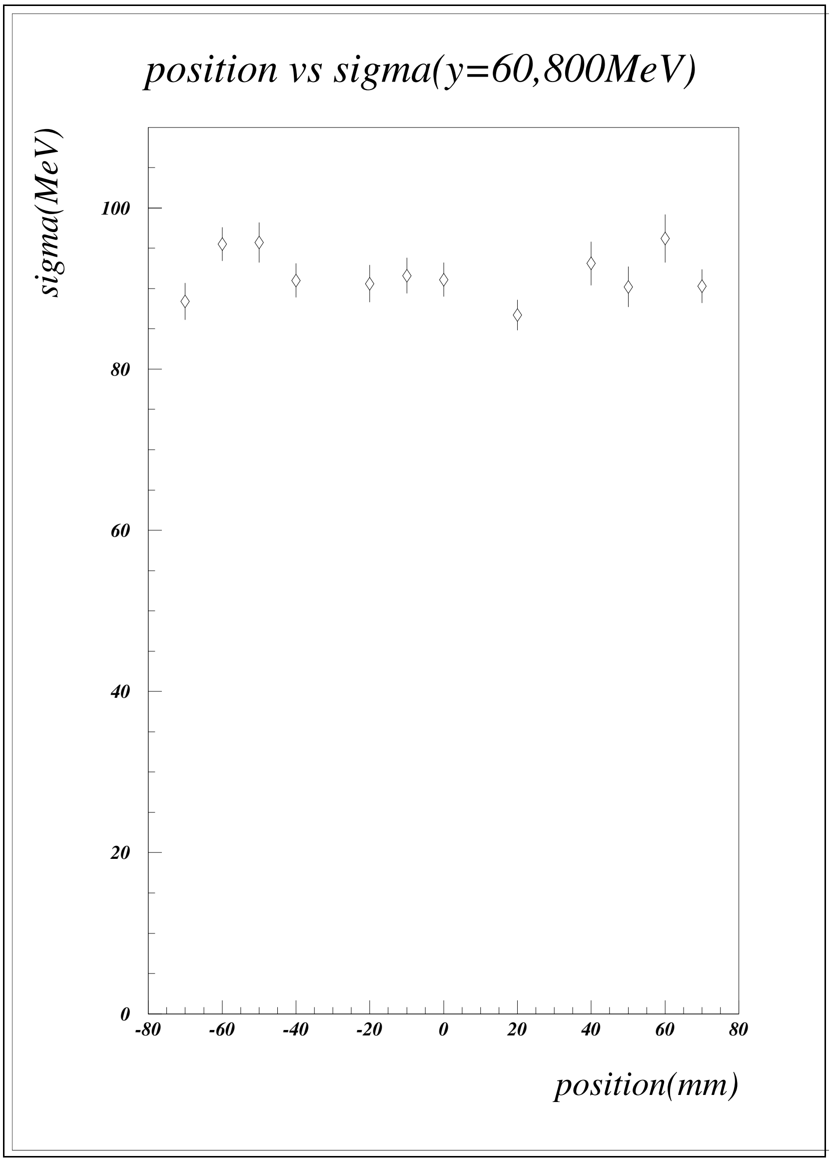

図 33: position vs sigma(y=60,800MeV)

誤差は fitting の誤差である。

y=0,800MeV の場合について、各 LG のエネルギーの変化を以下に示した。
ここで、各 LG の値はエネルギーの平均値を用いた。

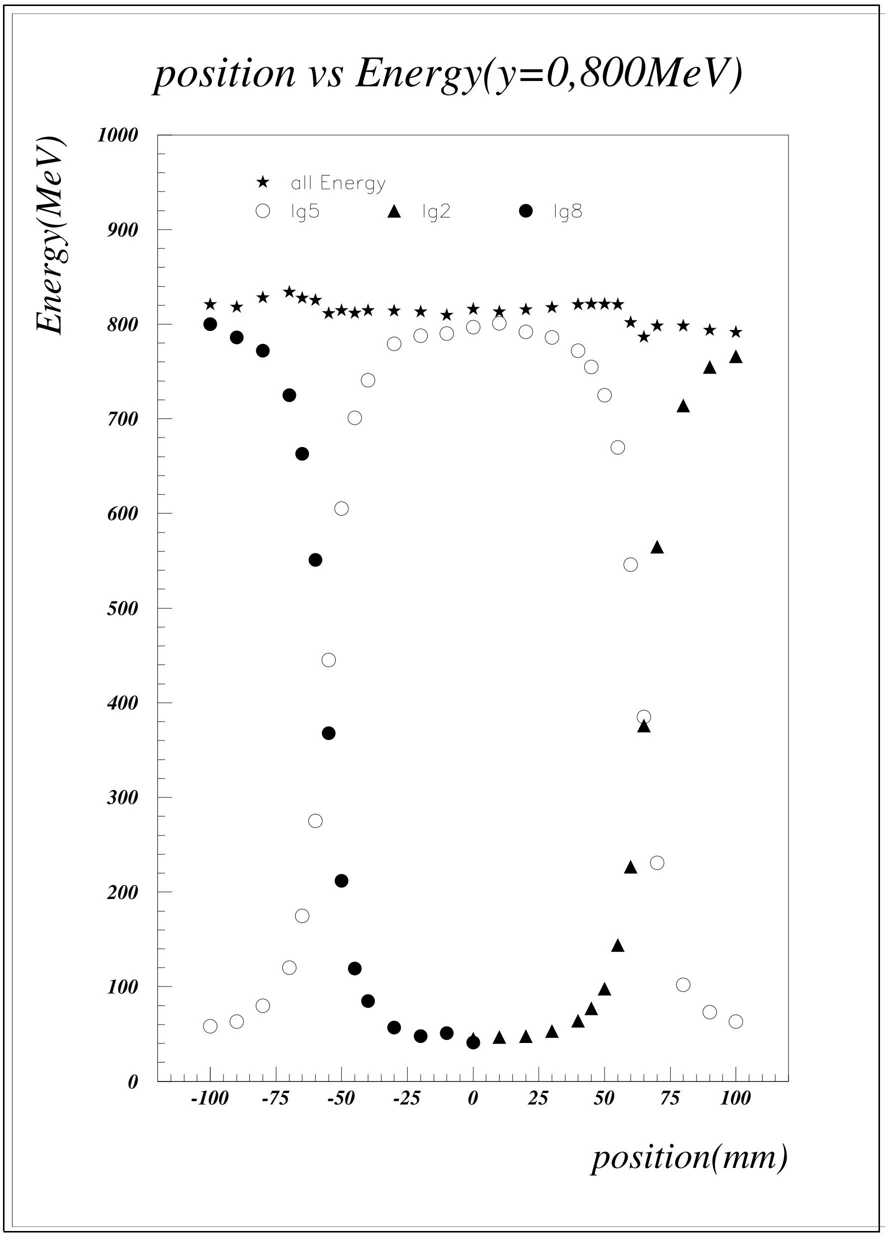

図 34: 各 LG の position 依存性 (y=0,800MeV)

中心部分では主に LG5 でエネルギーを検出し、 + 方向に移動するにつれ LG2 の値が増加し、 - 方向では LG8 が増加している。またそれぞれで、 lg5 の値が減少していることがわかる。
それぞれの交点が LG の境界線の位置であることがわかる。

同様にして、 y=60,800MeV の場合について、各 LG のエネルギーの変化を以下に示した。

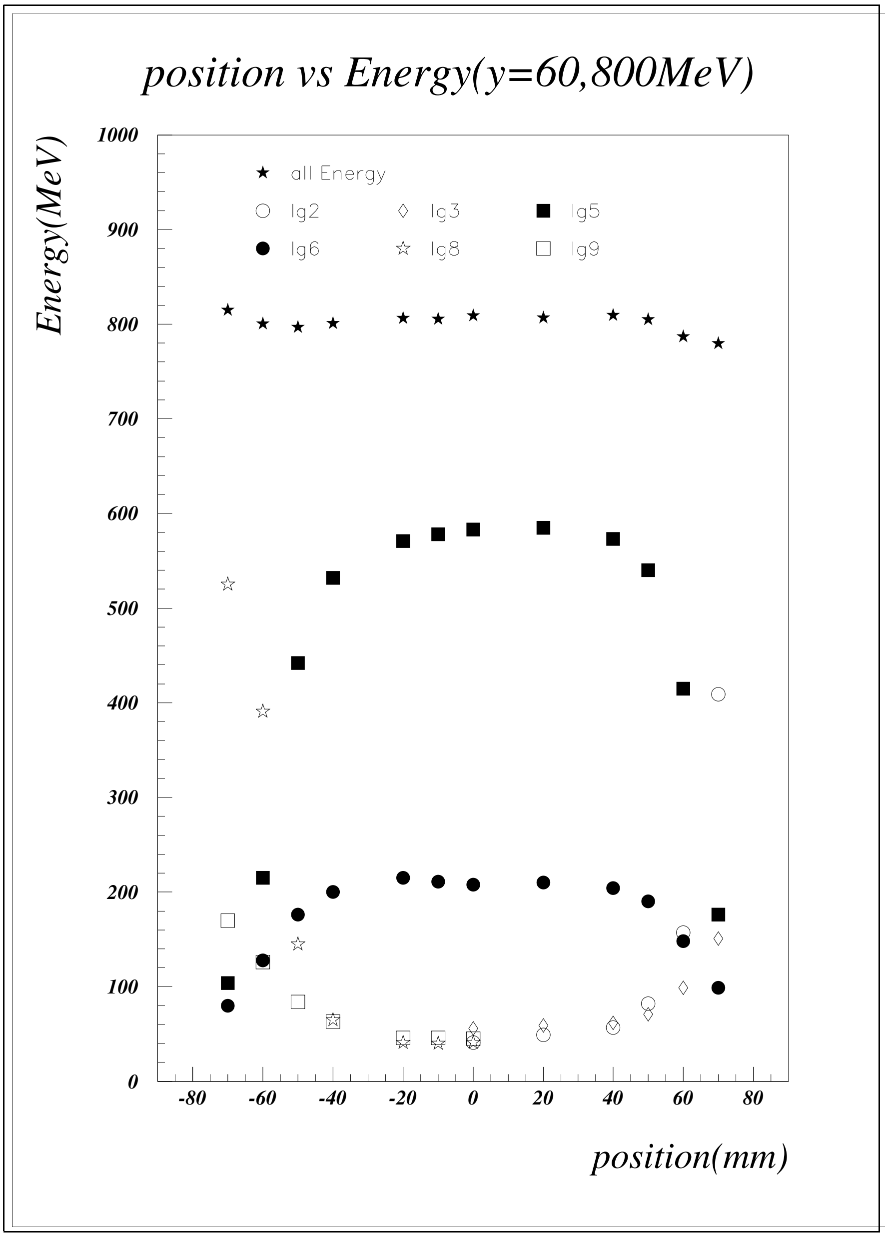

図 35: 各 LG の position 依存性 (y=60,800MeV)

これは、多少複雑ではあるが、先ほどと同じようなことがいえる。

9　電子ビーム入射角依存性

9.1　set up

ビーム入射角依存性は図３６のようにして行なった。

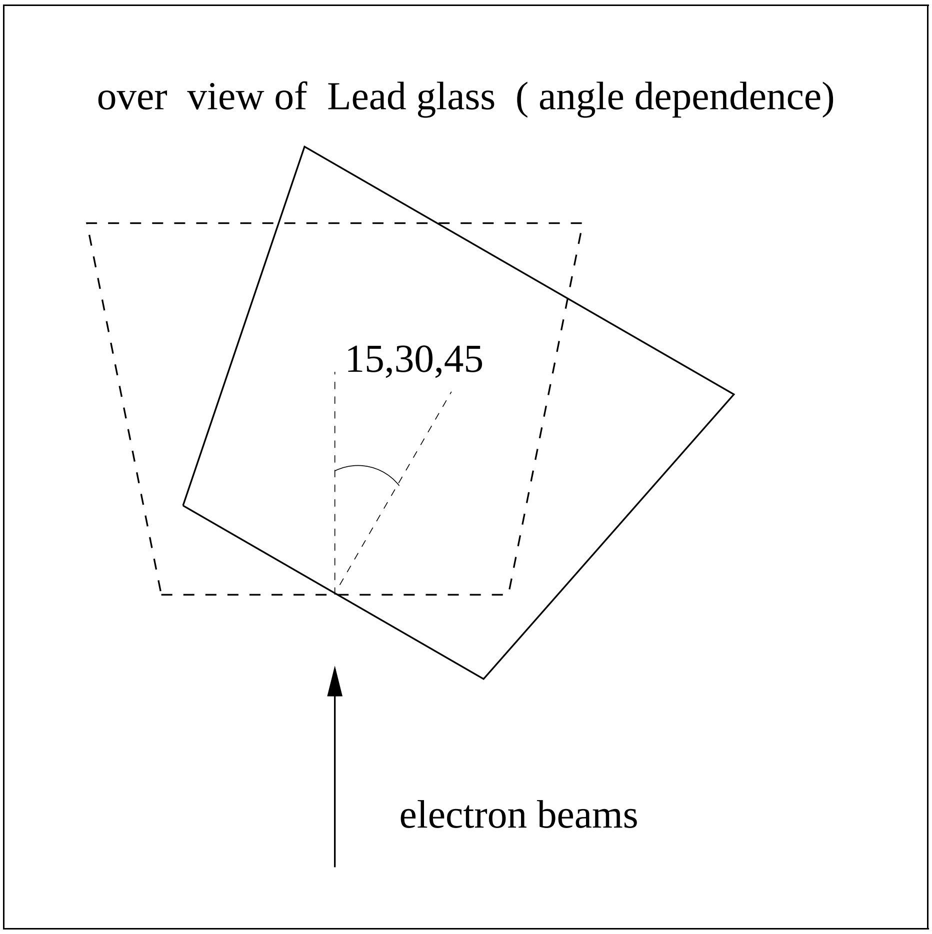

図 36: 入射角依存性の set up

図 36 は LG を上から見たところである。 lead glass を electron のビーム軸に対して、 15°,30°,45°に傾けて置き、位置依存性同様に x テーブルを移動することにより測定を行なった。 (y=0, ゲート幅 120ns)
解析も同様に、各 LG の ADC の値を event by event で Energy の値に換算して足し合わせた。

9.2　解析方法

position dependence と同様である。図３７は angle45°、入射ビームエネルギー 800MeV、座標 (10,0) の場合の各 LG の Energy の値である。

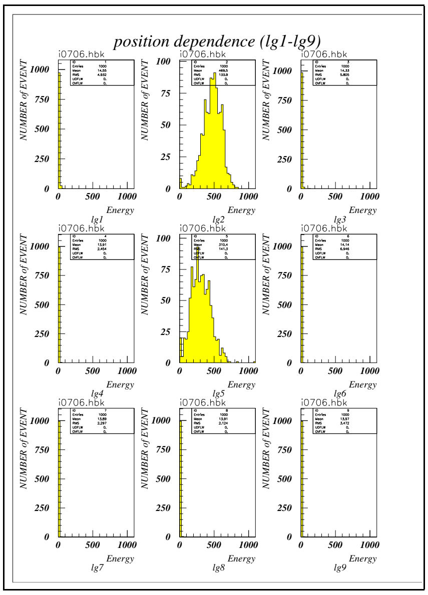

図 37: 入射角度 45°,800MeV, 座標 (10,0)

position dependence 同様に、上の各 LG で求められた Energy を足し合わせ、energy の再構成を行なったものが以下の図３８である。

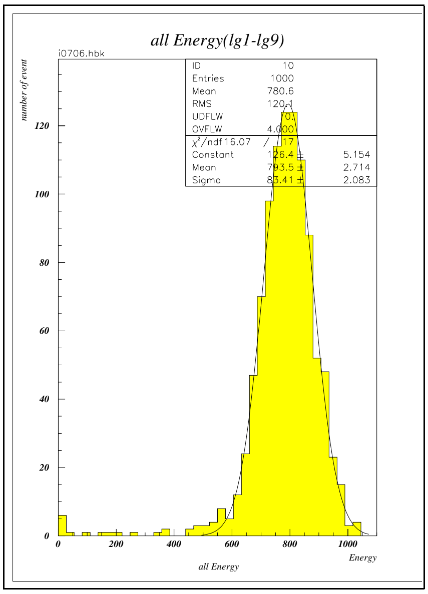

図 38: 全エネルギー (入射角度 45°,800MeV)

9.3 測定結果

以下に解析の結果を示す。横軸は position(mm)、縦軸は再構成された Energy(MeV) である。入射角度 15°、 Energy=100,200,500,800,1000MeV

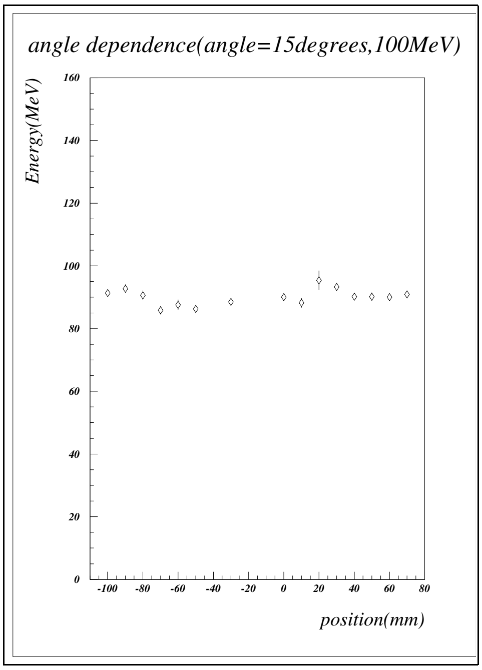

図 39: 入射角度 15°,100MeV

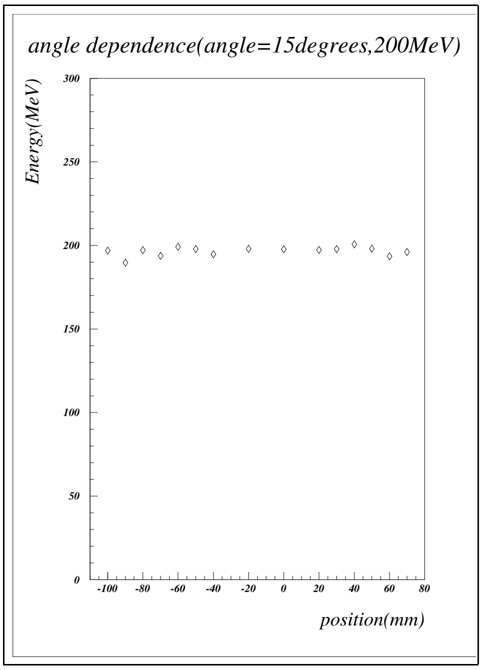

図 40: 入射角度 15°,200MeV

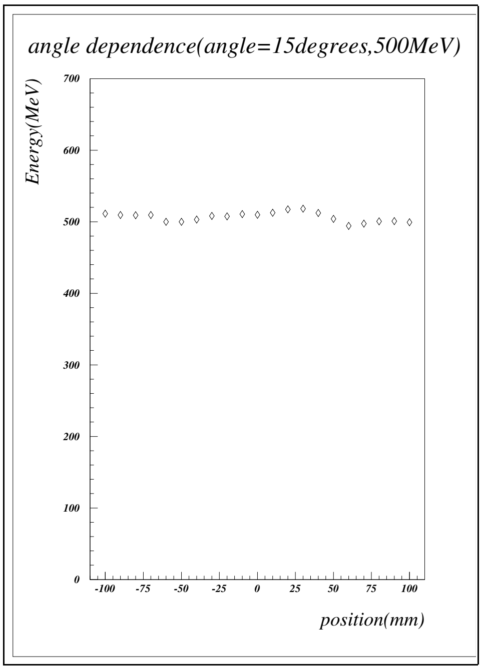

図 41: 入射角度 15°,500MeV

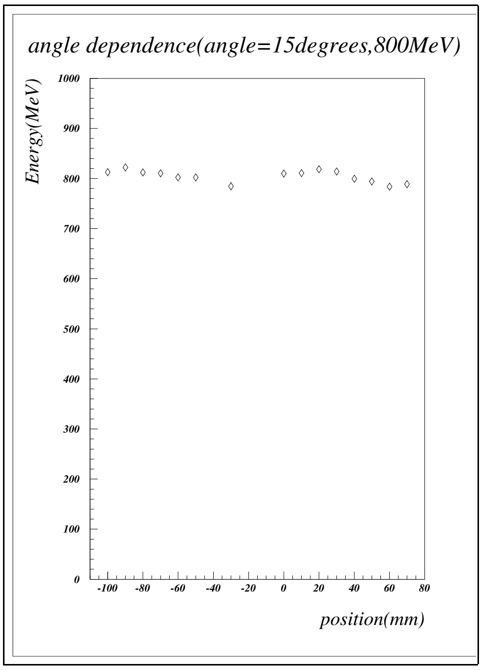

図 42: 入射角度 15°,800MeV

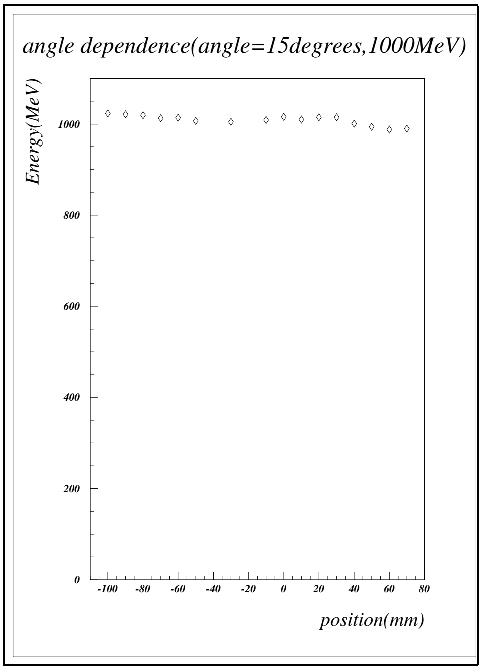

図 43: 入射角度 15°,1000MeV

入射角度 30°、 Energy=100,200,500,800,1000MeV

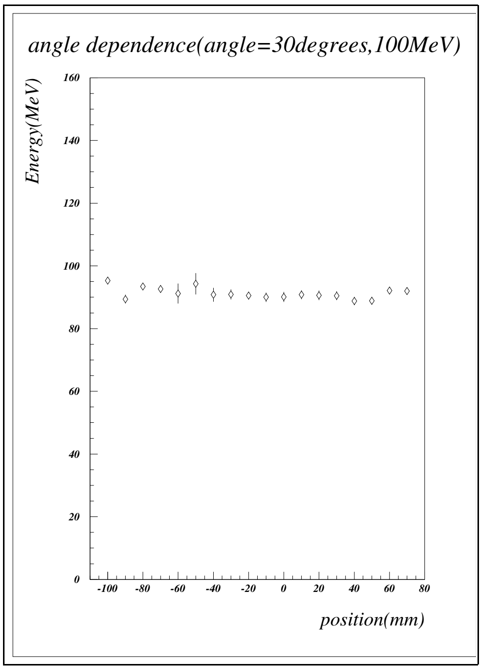

図 44: 入射角度 30°,100MeV

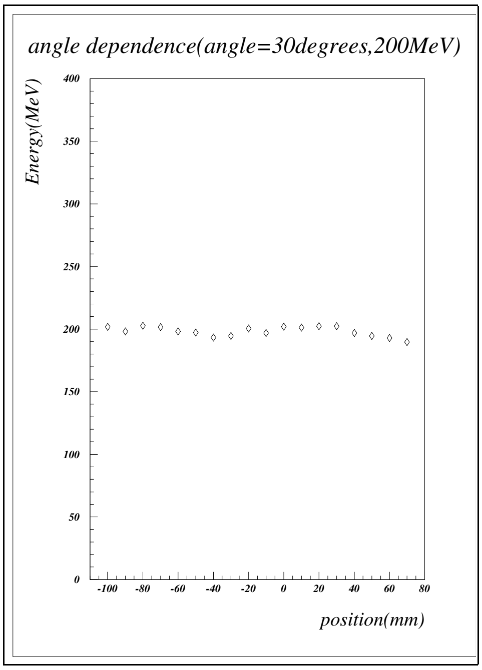

図 45: 入射角度 30°,200MeV

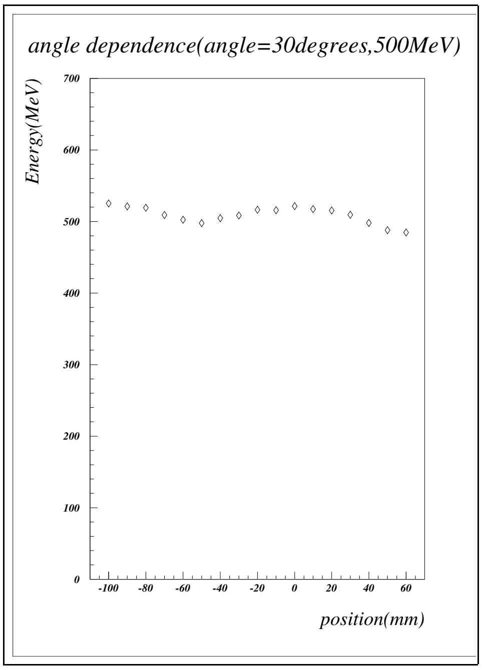

図 46: 入射角度 30°,500MeV

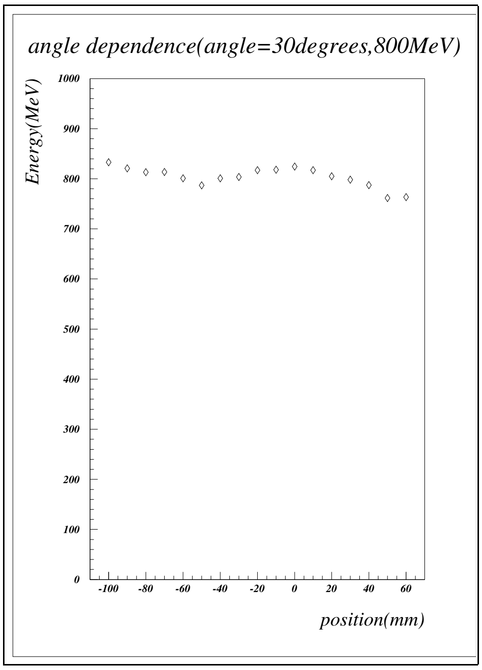

図 47: 入射角度 30°,800MeV

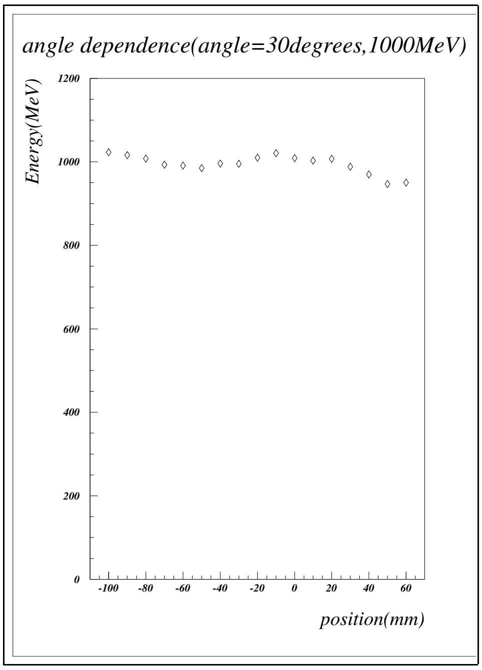

図 48: 入射角度 30°,1000MeV

入射角度 45°、 Energy=100,200,500,800,1000MeV

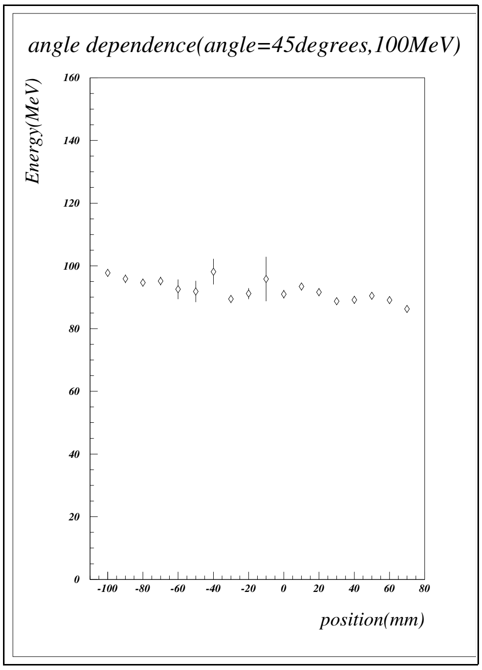

図 49: 入射角度 45°,100MeV

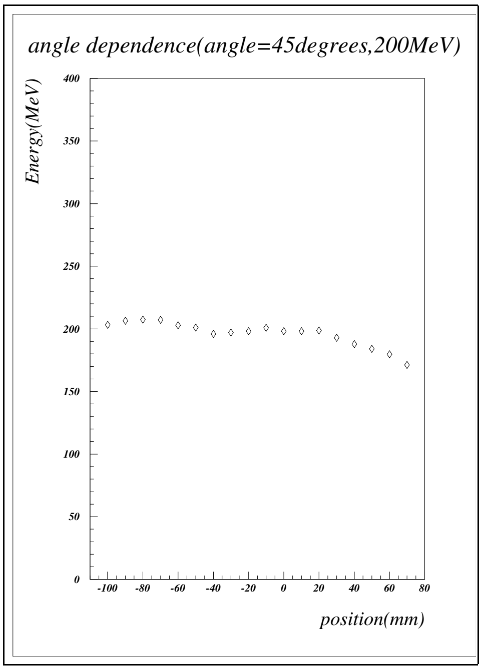

図 50: 入射角度 45°,200MeV

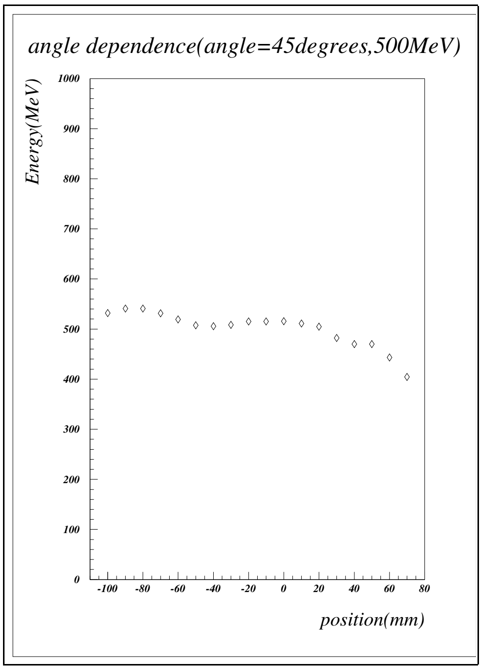

図 51: 入射角度 45°,500MeV

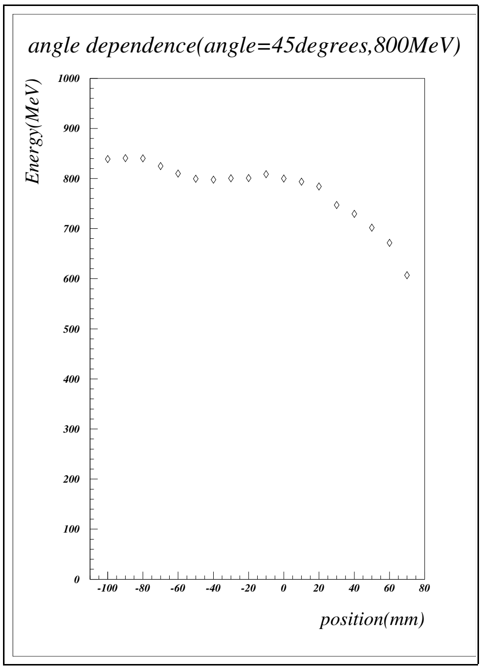

図 52: 入射角度 45°,800MeV

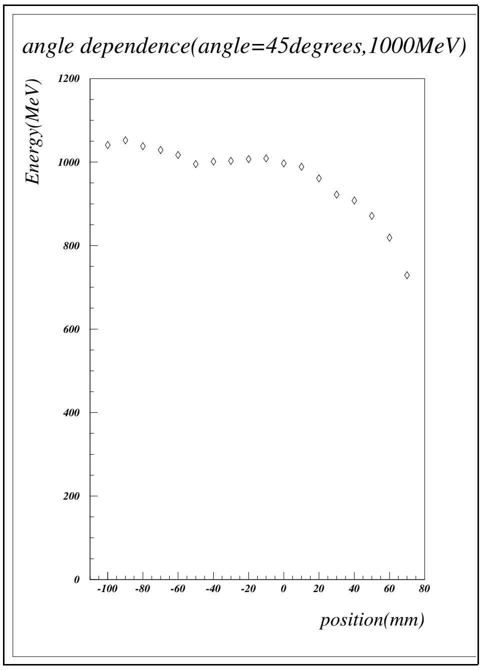

図 53: 入射角度 45°,1000MeV

9.4 角度依存性

以下の図 54 は入射エネルギー 800MeV の時の角度依存性について表したもの。横軸が角度、縦軸はエネルギーとしてある。 x=0 の場合と x=60(mm) の場合について、 plot してある。

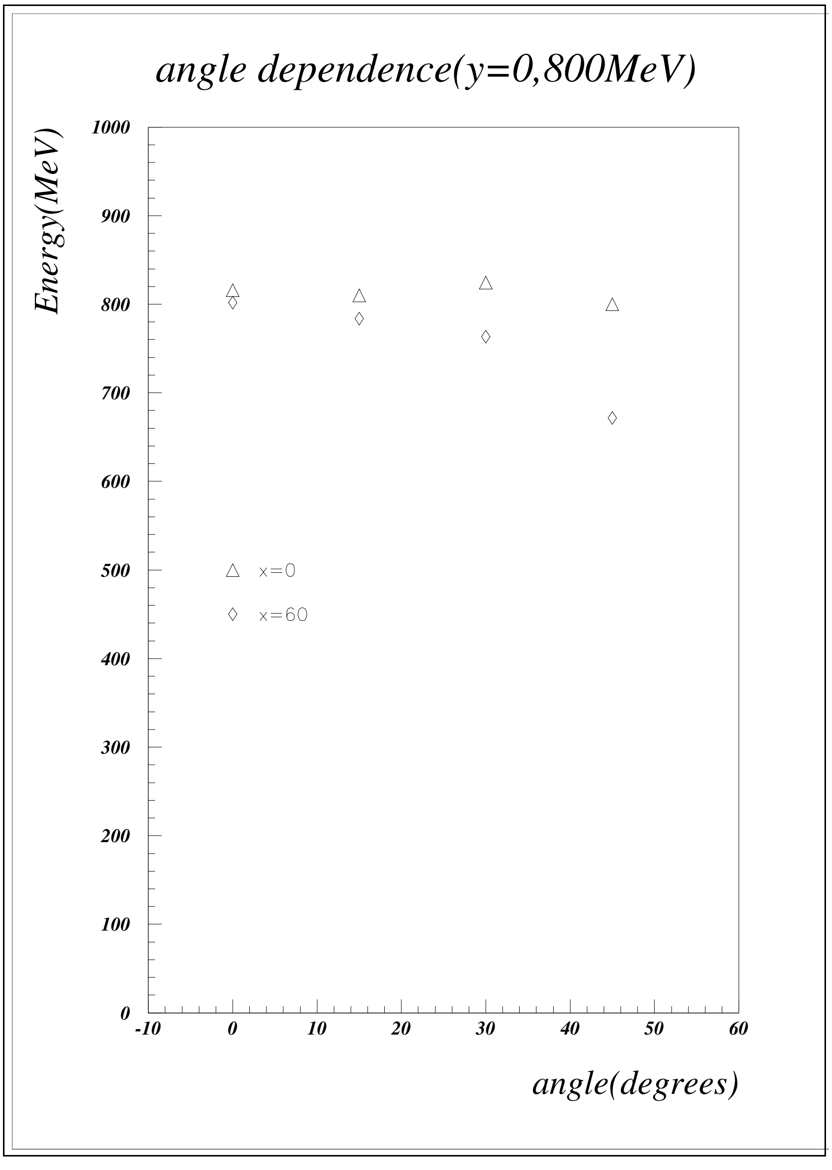

図 54: 入射角度 45°,1000MeV

x=0(mm) 場合、角度依存性はあまり見られないが、 x=60(mm) の場合角度依存性が非常に大きいということが分かる。

10 考察

角度依存性の解析を行なっているうちに、いくつか double peak(図５５) が見られるということが分かった。それは、以下の場合である。

- angle 15°, 100MeV x=-60 ~ 20
- angle 30°, 100MeV x=-40 ~ 30
- angle 45°, 100MeV x=-60 ~ 0

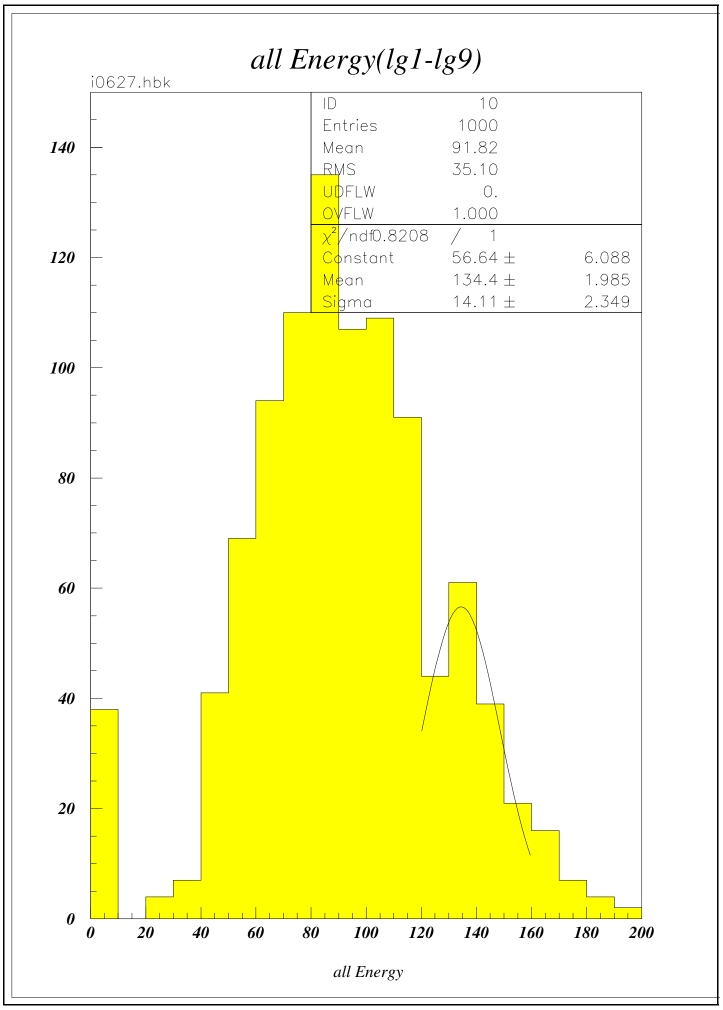

図 55: two peak

double peak が見られたのはいずれも beam Energy が 100MeV の場合であることより、以下のことが考えられる。

- ADC count から Energy への変換を行なう場合、 low Energy と High Energy とでは別々に行なう必要があるかもしれない。 low Energy についてもう少し議論が必要である。
- つき抜けた粒子と散乱した粒子の違い

11 今後の予定

- 誤差の議論を行なう。
- 各 LEAD GLASS について HV 依存性を調べ、以下の (既に行なわれた) 測定が適当な HV で測定されていたことを確認しておく。