鉛ガラス検出器の絶対エネルギー較正

剣持 範
新潟大学自然科学研究科

１９９７年5月２７日

目 次

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。
E362 では、 600 本の鉛ガラス検出器を用いる予定である。この検出器の絶対較正は宇宙線を用いて行なう。宇宙線で得られた相対利得を絶対利得に変換するためには 600 本のうち 1 本については絶対較正を行なう必要がある。本実験では、１８本の鉛ガラス検出器について絶対エネルギー較正を行なって、相対利得を絶対利得に換算するための係数を決定することを目的とした。

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電子エネルギーは、 50MeV ~ 1000MeV で、精度は 2% 以下である。

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。

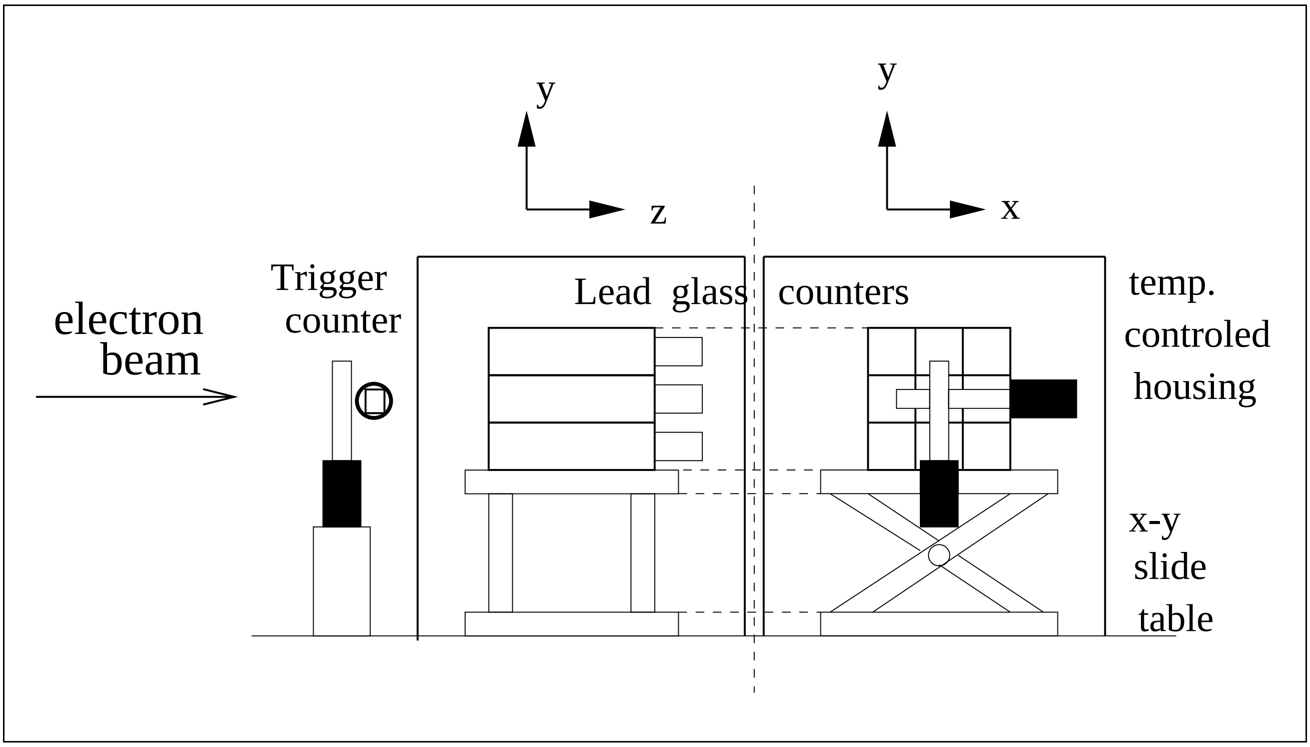

図 1: セットアップ

今回の測定において、トリガーカウンターと鉛ガラス検出器の距離は約１０ cm。鉛ガラス検出器及びトリガーカウンターは、温度制御されたビニルハウスのなかに set された。鉛ガラス検出器の相対利得の変化をモニターするために、温度制御されたキセノンランプからの光を光ファイバーで転送し鉛ガラスにいれたときの出力波高をモニターする。
データー収集システムには、 FAST BUS 及び VME を用いた。鉛ガラスからの信号は FASTBUS ADC により AD 変換される。

2.2 鉛ガラス検出器

今回は前回測定した９本（lg １ ~ lg ９）に、さらに９本の鉛ガラス検出器（lg あ、い、え、お、か、け、こ、し、そ）を加えた計１８本について測定を行なった。

3　測定

3.1　キセノンのみによる６００本の鉛ガラスのキャリブレーションの可能性

各鉛ガラスに同じファイバーからのキセノンランプの光を入射させ、その出力波高と、同じエネルギーのビームを入射させた時の出力波高の比が、各鉛ガラスすべて一定であれば、キセノンのみによる６００本の鉛ガラスのキャリブレーションが可能であるといえる。

図 2 は横軸に各鉛ガラス (1-9(lg １ ~ lg ９),10-18(lg あ ~ lg そ)) 縦軸はキセノンの pulse height(同一ファイバー) と鉛ガラスの pulse height(500MeV) の比をとったものである。

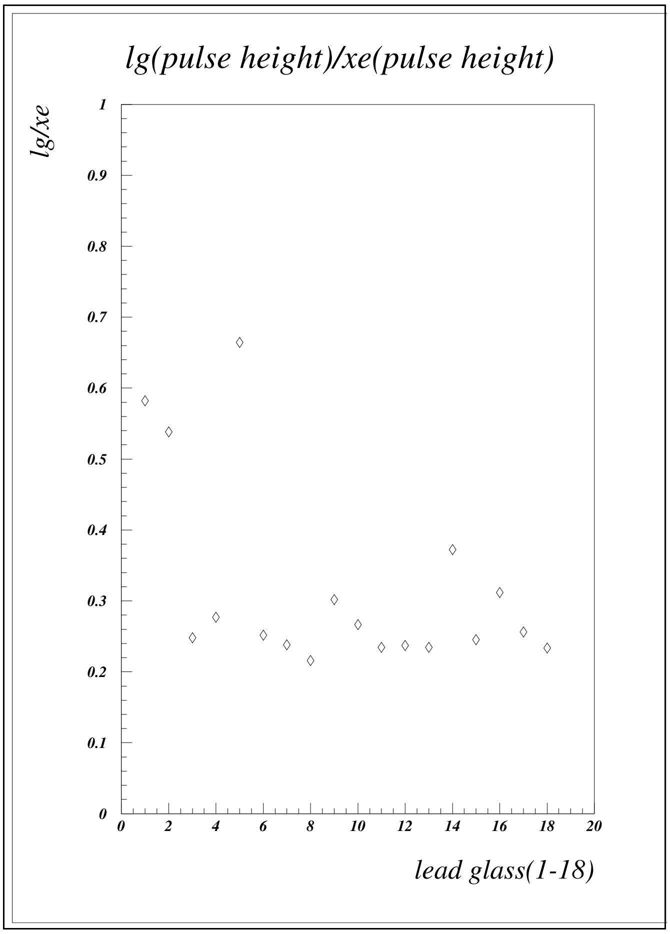

図 2: energy vs pulse height(lg 1 - lg 6)

比の値が一定ではないということがわかる。
以上の結果より、キセノンのみによる６００本の鉛ガラスのキャリブレーションは不可能であることがわかった。

3.2 low energy scan

前回 TKO ADC では、 low energy の部分では、 pedestal の山に埋もれて、 signal を見ることが出来なかった。（図参照)

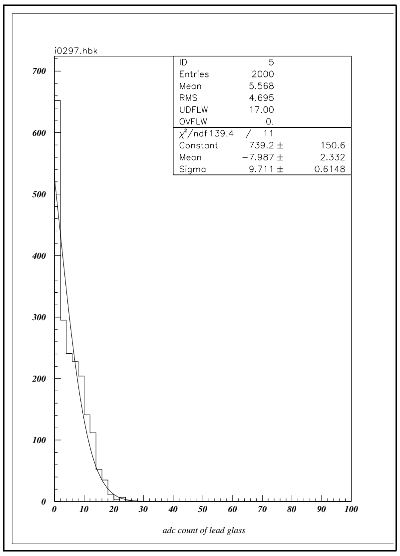

図 3: 前回 TKO ADC(lg5 50MeV)

今回 FAST BUS ADC を用いることにより、 low energy の部分についても、 signal を見ることができた。

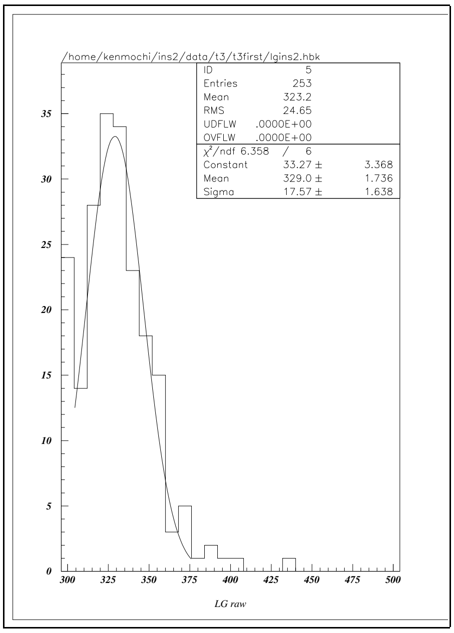

図 4: 今回 FAST BUS ADC (lg5 50MeV)

3.3 energy vs. pulse height

各鉛ガラスについて、 beam Energy 依存性は図 7 ~ 9 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、 $1.5\mu s$ である。
各図は

$$pulse\ height = (P1) + (P2) \times E_e$$

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。

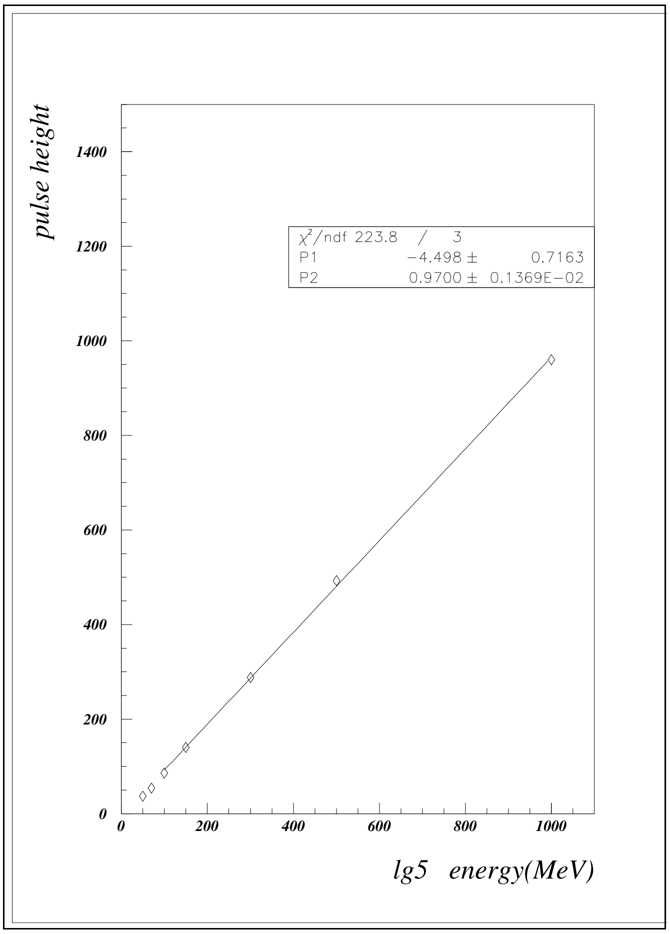

図 5: energy vs pulse height の例 (lg 5)

今回、 energy と pulse height の関係式を求める際、 low energy の部分については、 fitting から外した (図 5 参照) 。次ページにその理由を示す。

前ページのlg 5について、pulse heightとenergyの比をとることよりpulse heightの変化の割合を以下の図に示した。

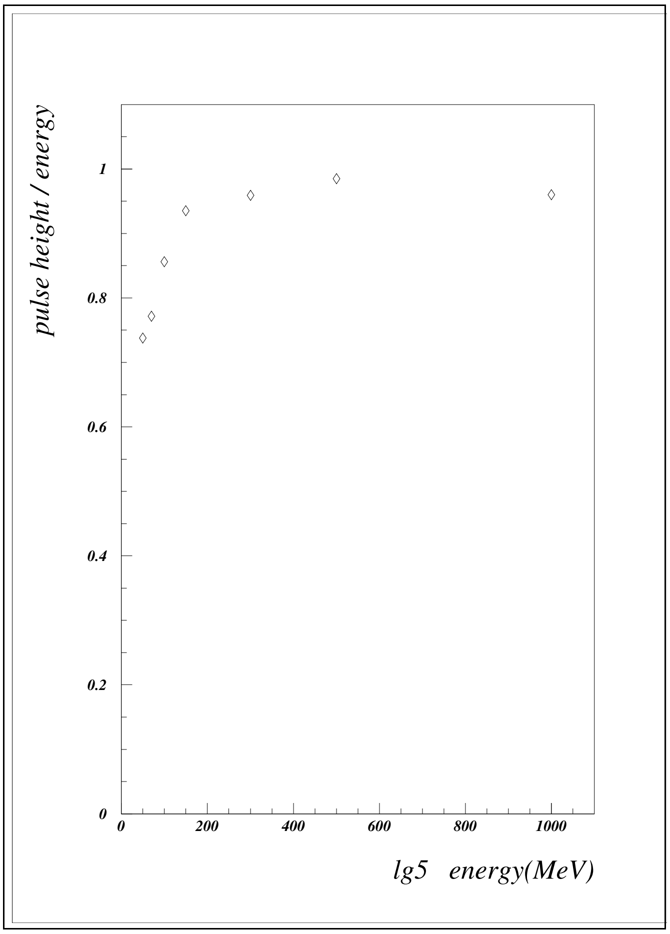

図 6: pulse heightの変化の割合

low energyの部分では、変化の割合が一定ではないことがわかる。よってlow energyの部分はfittingから外すことにした。

次ページより各lgのenergy vs. pulse heightの結果を示す。

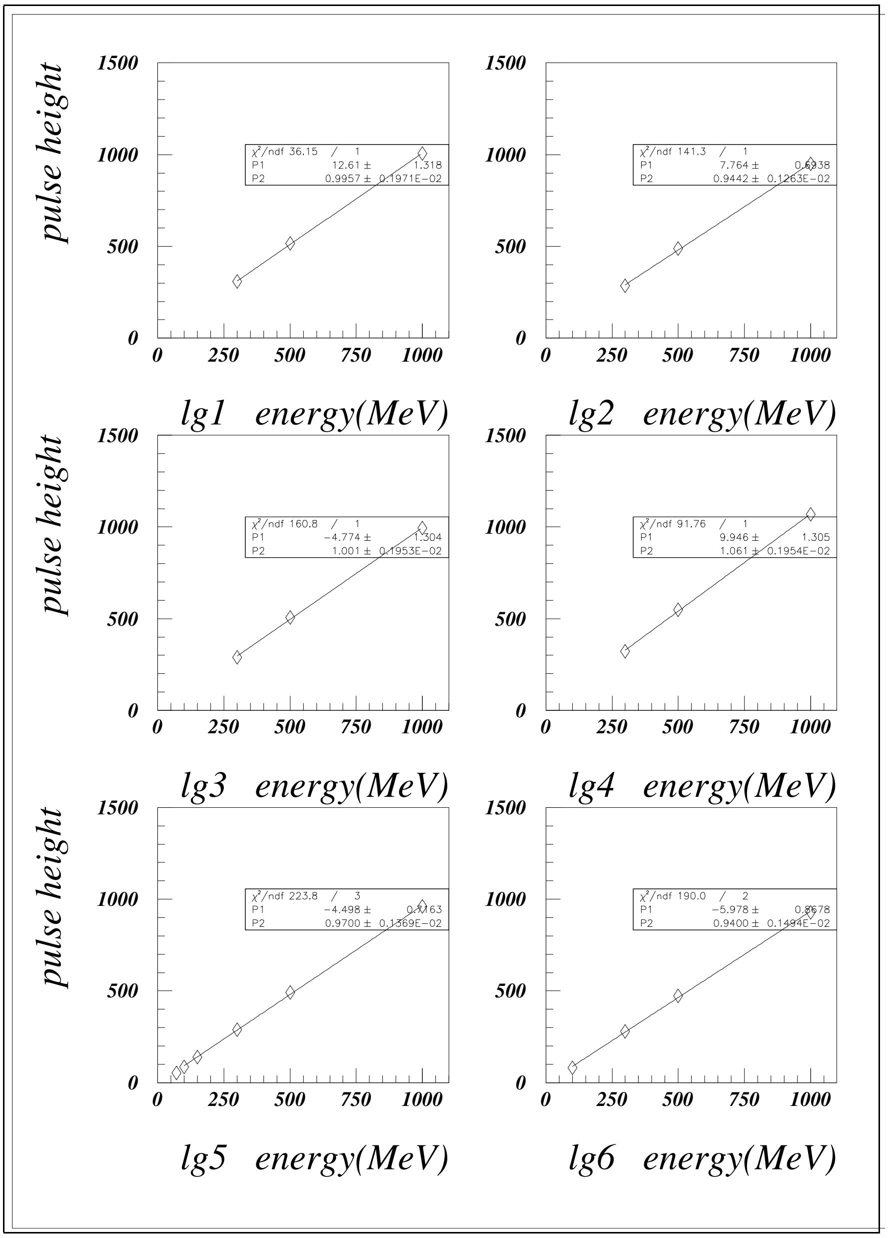

図 7: energy vs pulse height(lg 1 - lg 6)

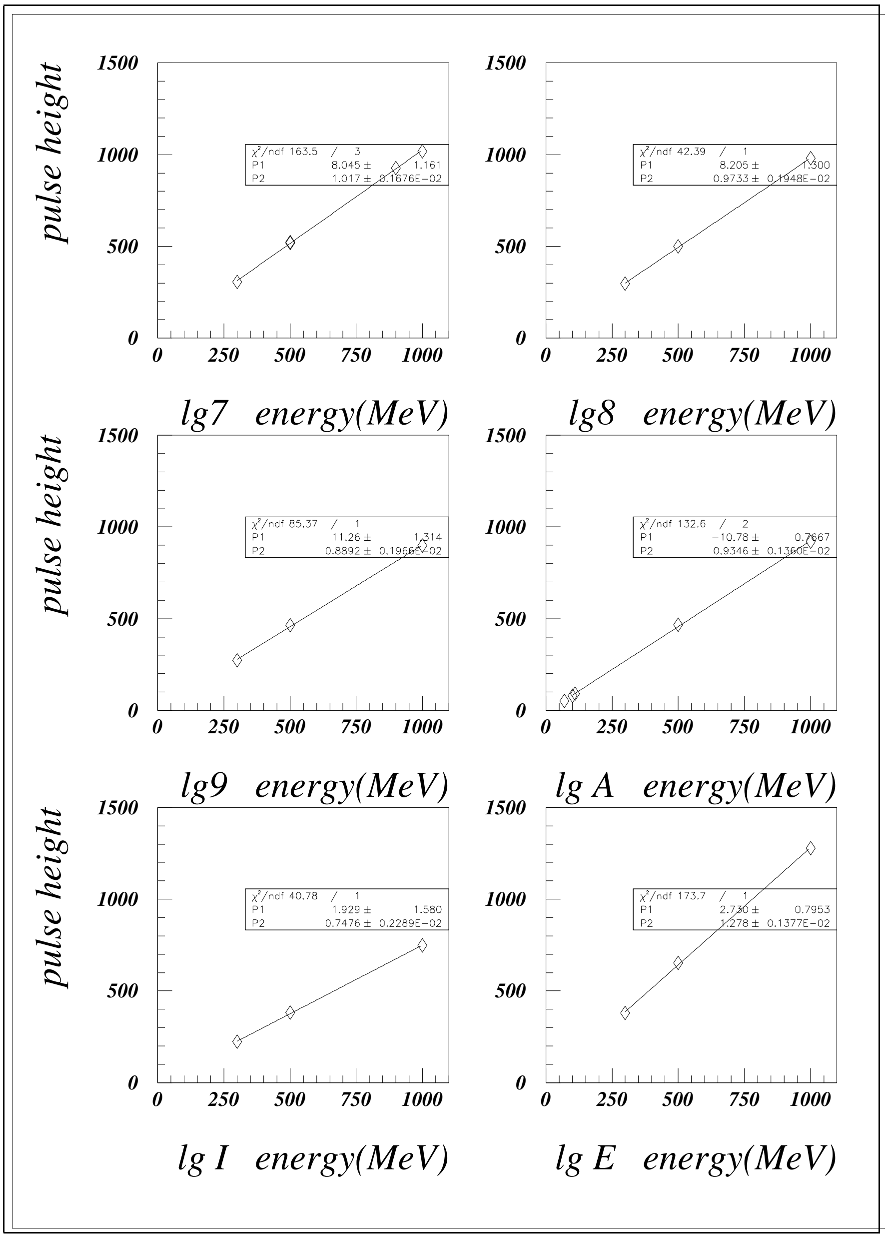

図 8: energy vs pulse height(lg 7 - lg e)

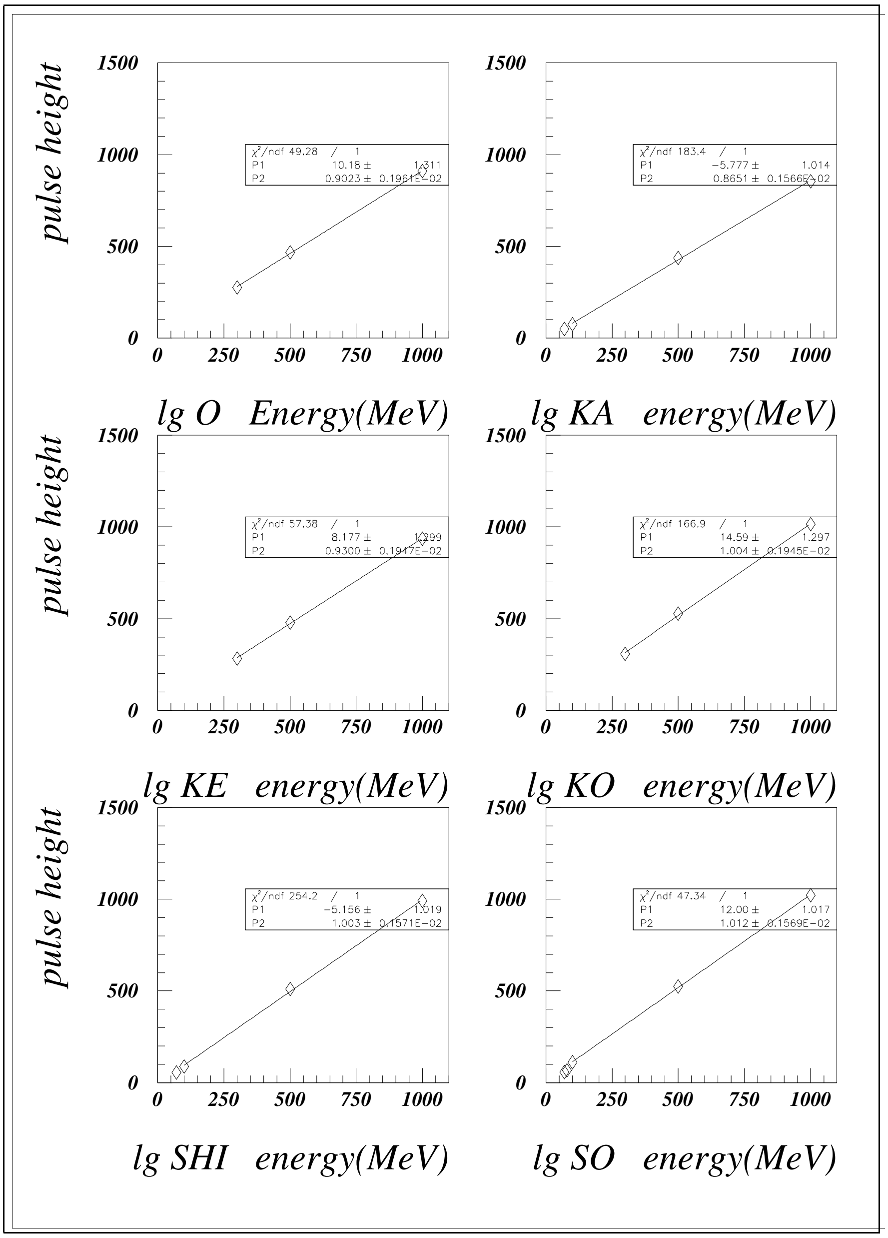

図 9: energy vs pulse height(lg o - lg so)

$$pulse\ height = (P1) + (P2) \times E_e$$

のパラメーターは、以下の表 1 に示した。
但し誤差は fitting の誤差である。

表 1: energy vs. pulse height の fitting parameter(1.5 μ s)

gate width： 1.5μs	P1	P2
LG 1	12.61 ± 1.32	0.996 ± 0.002
LG 2	7.76 ± 0.69	0.944 ± 0.001
LG 3	-4.77 ± 1.30	1.001 ± 0.002
LG 4	9.95 ± 1.31	1.061 ± 0.002
LG 5	-4.50 ± 0.72	0.970 ± 0.001
LG 6	-5.98 ± 0.87	0.940 ± 0.001
LG 7	8.05 ± 1.16	1.017 ± 0.002
LG 8	8.21 ± 1.30	0.973 ± 0.002
LG 9	11.26 ± 1.31	0.889 ± 0.002
LG あ	-10.78 ± 0.77	0.935 ± 0.001
LG い	1.93 ± 1.58	0.748 ± 0.002
LG え	2.73 ± 0.80	1.278 ± 0.001
LG お	10.18 ± 1.31	0.902 ± 0.002
LG か	-5.78 ± 1.01	0.865 ± 0.002
LG け	8.18 ± 1.30	0.930 ± 0.002
LG こ	14.59 ± 1.30	1.004 ± 0.002
LG し	-5.16 ± 1.02	1.003 ± 0.002
LG そ	12.00 ± 1.02	1.012 ± 0.002

3.4 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。
次ページの図は各 lg について beam Energy と resolution の関係（ゲート幅 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。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、図はそれぞれ上式によって fitting を行なった。

図１０～１２まではすべての結果について、 plot してある。これにより、 low energy の部分や明らかに外れた点が数点見えた。それを削除して fittng し直したものが図１３～１４である。

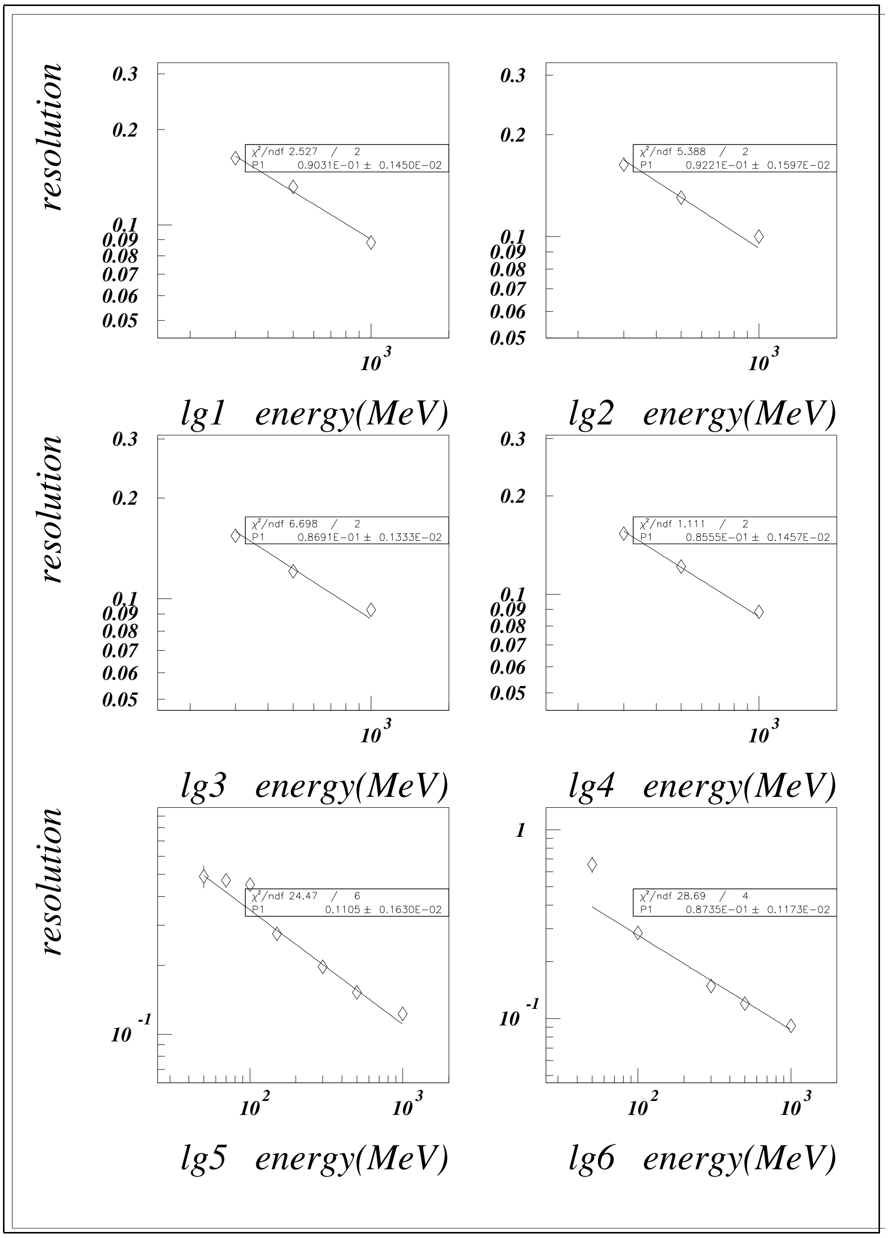

図 10: resolution(lg 1 - lg 6)

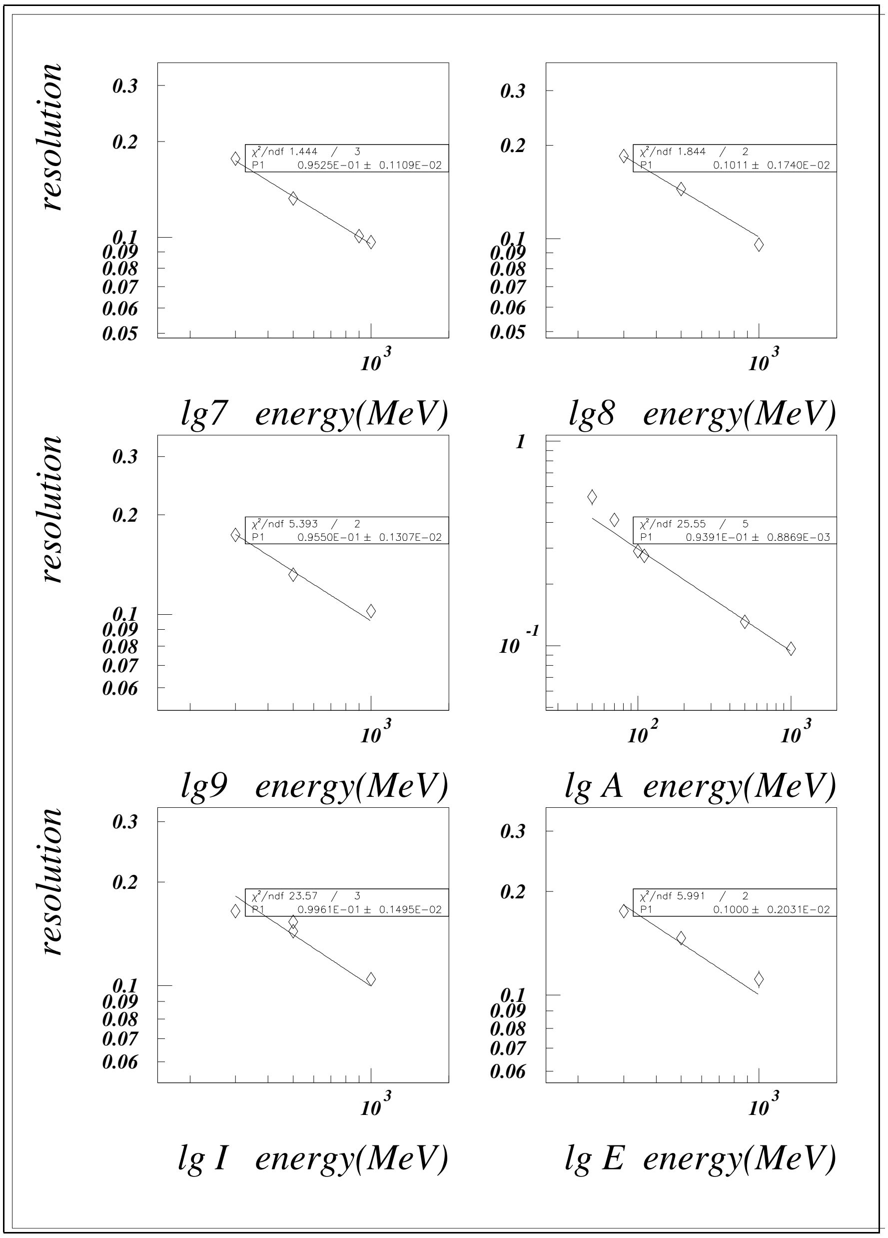

図 11: resolution(lg7 - lg e)

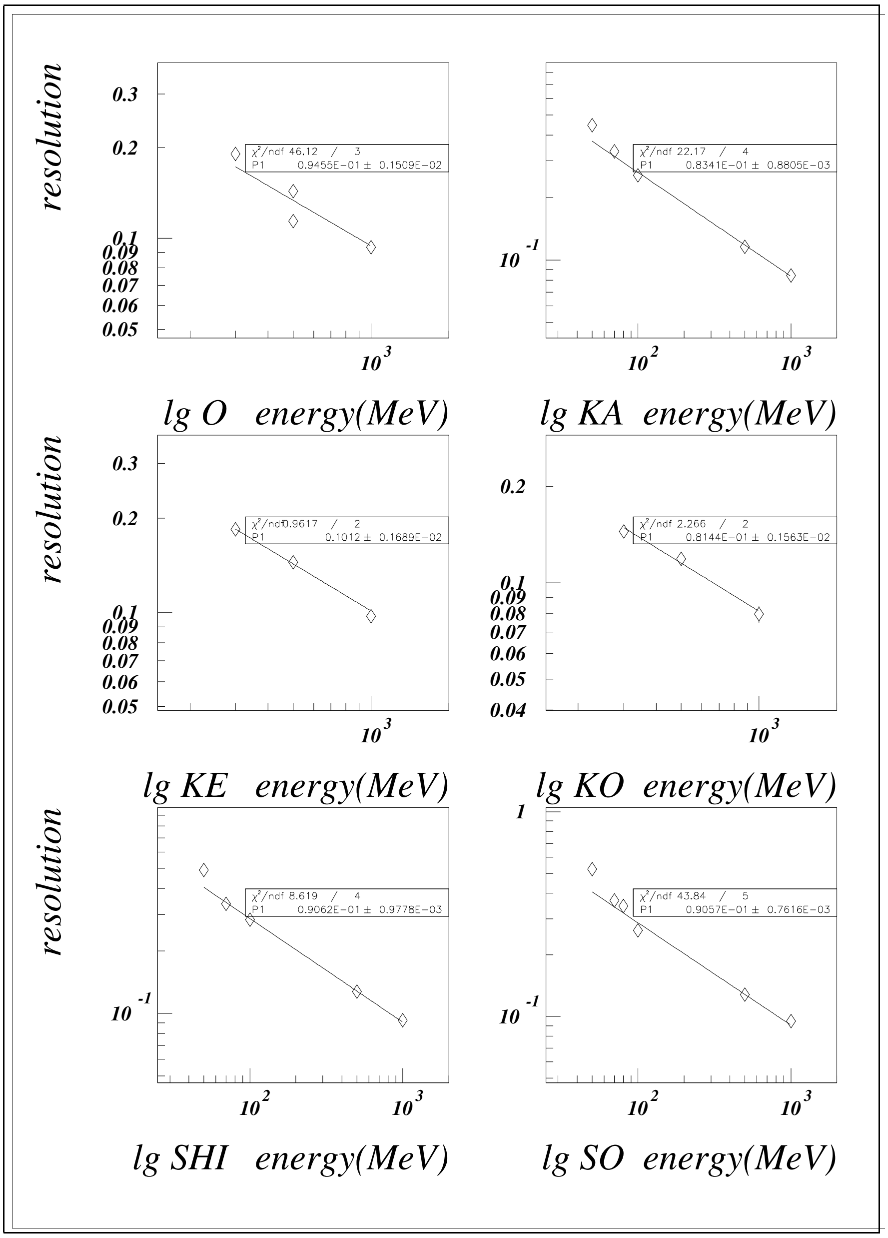

図 12: resolution(lg o - lg so)

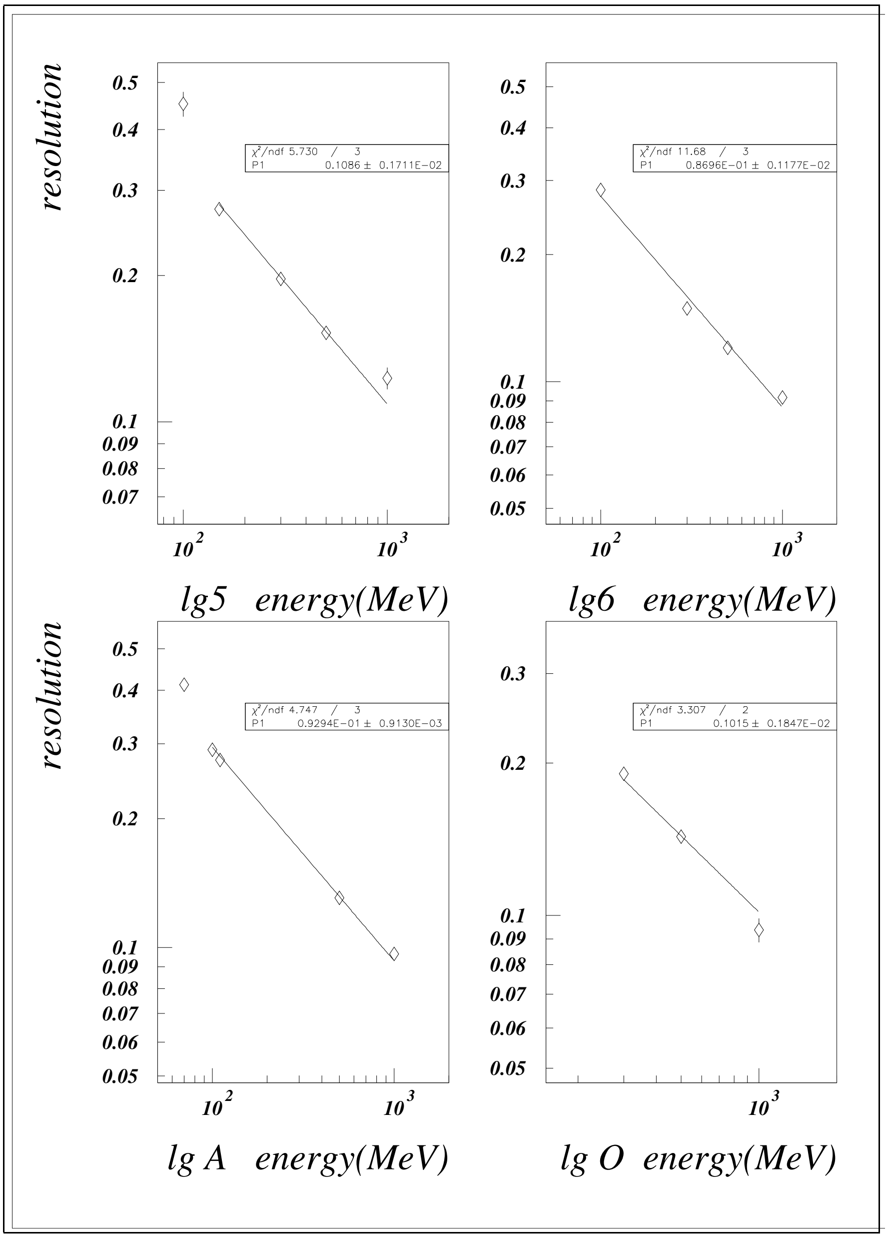

図 13: resolution(fitting やり直し)

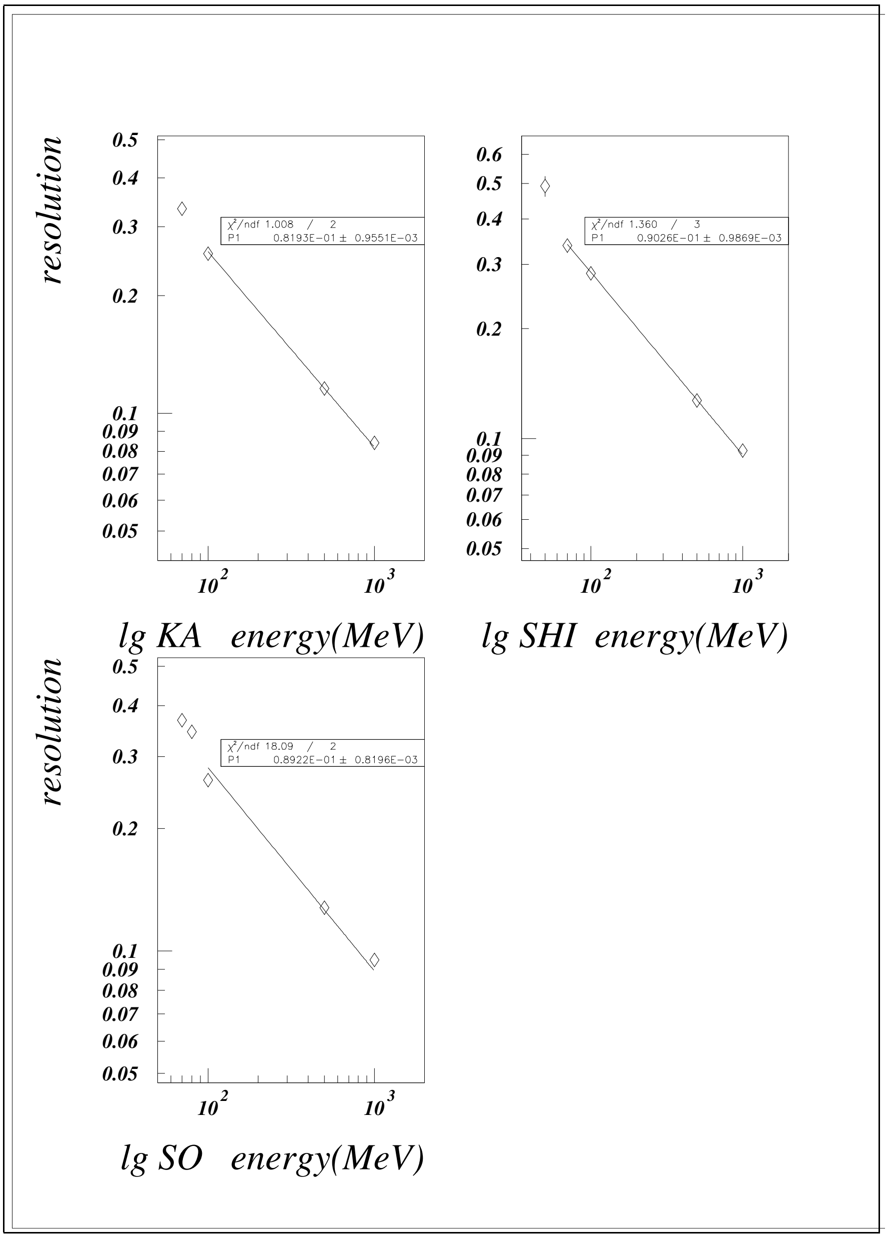

図 14: resolution(fitting やり直し)

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

におけるパラメーター k は、 fitting によって表 2 のように求められた。
また lg1 ~ lg9 について、比較のため前回の TKO-ADC による測定結果 (ゲート幅:1.5 μs) も示しておいた。

表 2: beam Energy vs resolution のパラメーター

	k(今回 ,gate:1.5 μs)	k(前回 ,gate:1.5 μs)
LG 1	0.0903 ± 0.0015	0.0968 ± 0.0008
LG 2	0.0922 ± 0.0016	0.0986 ± 0.0013
LG 3	0.0869 ± 0.0013	0.0984 ± 0.0011
LG 4	0.0856 ± 0.0015	0.0932 ± 0.0009
LG 5	0.1086 ± 0.0017	0.1171 ± 0.0009
LG 6	0.0870 ± 0.0012	0.0918 ± 0.0010
LG 7	0.0953 ± 0.0011	0.1162 ± 0.0002
LG 8	0.1011 ± 0.0017	0.1101 ± 0.0009
LG 9	0.0955 ± 0.0013	0.1067 ± 0.0012
LG あ	0.0929 ± 0.0009	——–
LG い	0.0996 ± 0.0015	——–
LG え	0.1000 ± 0.0020	——–
LG お	0.1015 ± 0.0018	——–
LG か	0.0819 ± 0.0010	——–
LG け	0.1012 ± 0.0017	——–
LG こ	0.0814 ± 0.0016	——–
LG し	0.0903 ± 0.0010	——–
LG そ	0.0892 ± 0.0008	——–

表２をグラフにしたもの

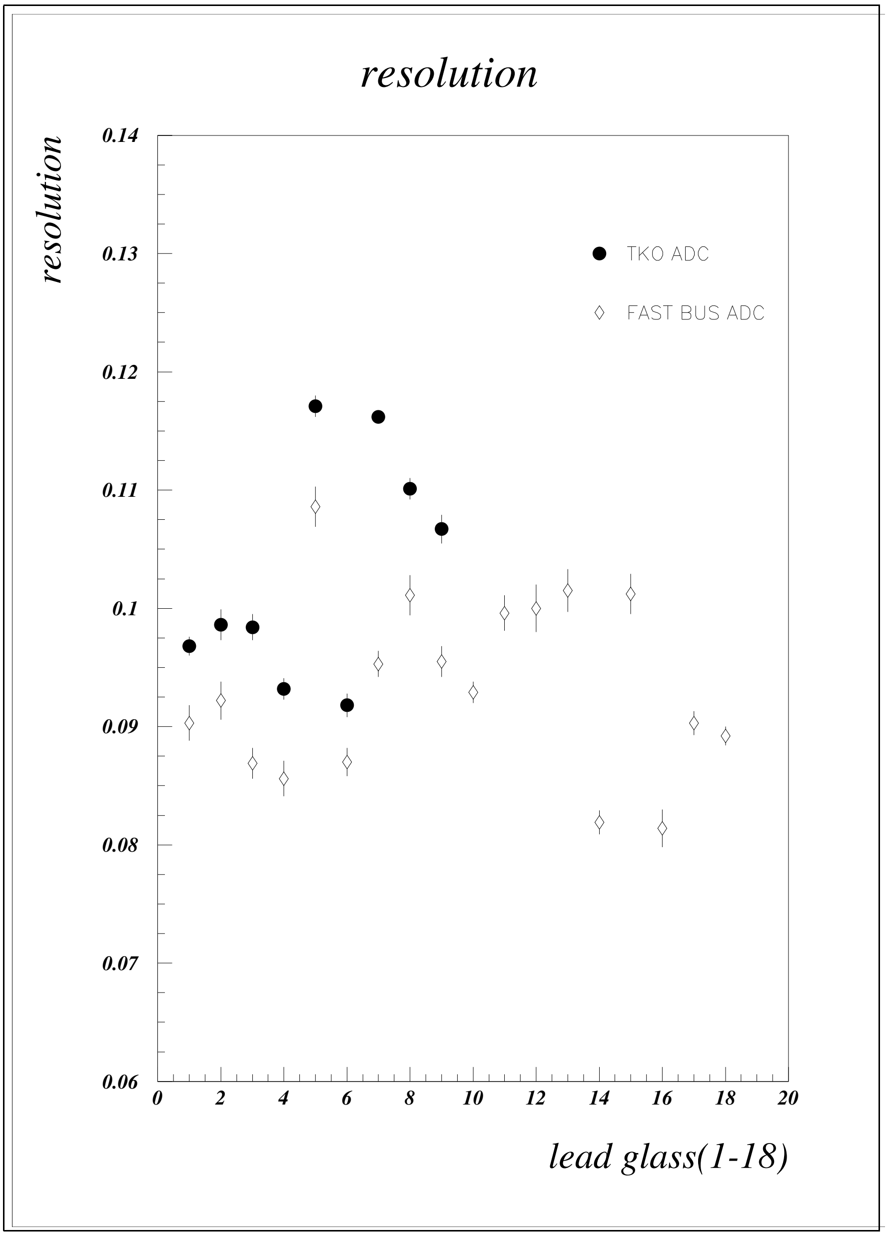

図 15: resolution

上のグラフで lg あ～そは、 lg １０～１８に対応する。
以上より、 resolution は８～１０ $\%/\sqrt{E}$ である、といえる。
また、前回の TKO-ADC よりも分解能がよくなっていることがわかる。

3.5 low energy におけるずれ

3.5.1 non-linearity

ここまでの、解析において、最も注目すべきところは、 low energy における、energy scan 及び resolution のずれである。特に、 energy scan の方については、その効果が大きい。なぜなら、 ADC count からエネルギーに変換するときに low energy の値は正しい値が求められなくなってしまうからである。そこで、本当に low energy では linearity がないのか、どのくらいずれているのかについて再度議論しておく必要がある。

まず、図 6 に示した pulse height の変化の割合の図についてであるが、以前これより、変化の割合が一定ではないと結論づけたが、これにはかなり問題があることがわかった。というのは、これは $pulse\ height = P1 + P2 \times energy$ 定数項の部分であるＰ１を全く無視して、変化の割合をもとめようとしているが、 energy の小さい部分においてはこの影響を大きくうけるのは当然である。よって、図 6 から low energy の部分には linearity がないということは、出来ないことになる。

low energy scan を行なったのは、 lg5,lg6,lg あ,lg か,lg し,lg そ, の 6 本である。これについて、調べてみる。

各 lg についての energy vs. pulse height のパラメーターは既に求められている。但しこの時のパラメーターは low energy の点を除いている。そこで、 50MeV の点と 100MeV の点から傾きを求め、その傾きと既に求められた傾きの値が、どのくらい違うを調べてみた。

以下にその結果を示す。

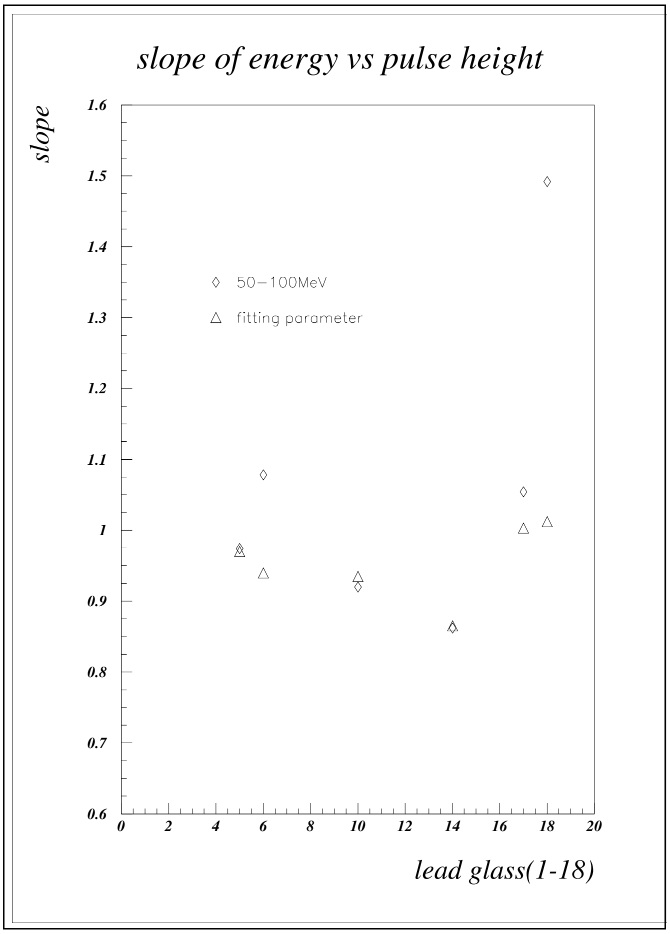

図 16: slope of energy vs pulse height

表 3: beam vs. pulse height の傾き

	50MeV ~ 100MeV の傾き	fitting から求めた傾き	ずれ
LG 5	0.974	0.970	0.4%
LG 6	1.078	0.940	14%
LG あ	0.920	0.935	1.6%
LG か	0.862	0.865	0.3%
LG し	1.054	1.003	5.0%
LG そ	1.492	1.012	47%

lg そと lg 6 は大きくはずれているが、その他の傾きはほとんど一致している。以上より、全ての LG において、 low energy の点がずれているわけではない、ということがわかる。

そこで、low energy scan を行なったものについては low energy の点を加えた fitting も行なうことにより、その χ^2/ndf を比較することにより、よりよい fitting parameter を決めることにした。

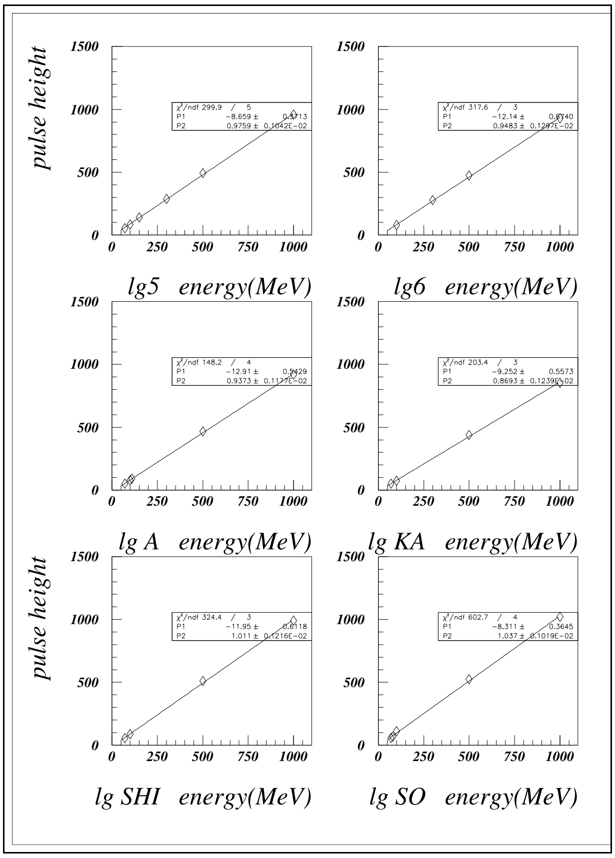

図 17: low energy の点を加えた fitting

図7 ~ 9の各 χ^2/ndf と比較を行なうことにより、明らかに χ^2/ndf の悪い lg そを除いて、low energy の点も加えることにした。

新しく求められたパラメーターは以下に示した。

表 4: 新しく求められたパラメーター

	P1	P2
LG 5	-8.66 ± 0.37	0.976 ± 0.001
LG 6	-12.14 ± 0.67	0.948 ± 0.001
LG あ	-12.91 ± 0.54	0.937 ± 0.001
LG か	-9.25 ± 0.56	0.869 ± 0.002
LG し	-11.95 ± 0.61	1.011 ± 0.001
LG そ	12.00 ± 1.02	1.012 ± 0.002

但し、lg そ は、今までと同じ。

次に、このパラメーターを用いて、計算で求めた50MeV,500MeV,1000MeVの値と、実際の測定の結果の比較を行なった。

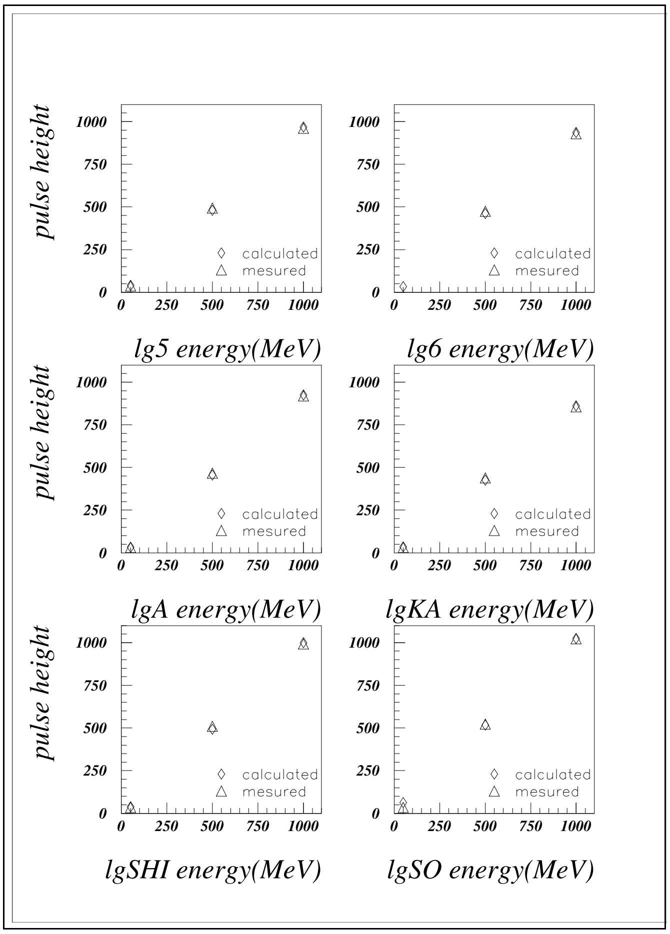

図 18: 計算値と測定値の比較

これより、測定値に対する計算値のずれは以下の様になった。

表 5: 測定値に対する計算値のずれ

	50MeV(%)	500Mev(%)	1GeV(%)
LG 5	8.7	2.7	0.8
LG 6	21.9	2.5	0.8
LG あ	5.6	2.5	0.5
LG か	8.6	2.8	0.7
LG し	9.7	3.1	0.7
LG そ	76.3	1.1	0.2

これについては、測定値に対してとみると、値の小さい low energy のほうがずれが大きくなるのは仕方のないことであると思われる。

そこで、 | 測定値 - 計算値 | という差の絶対値 (adc count) を比べてみた。

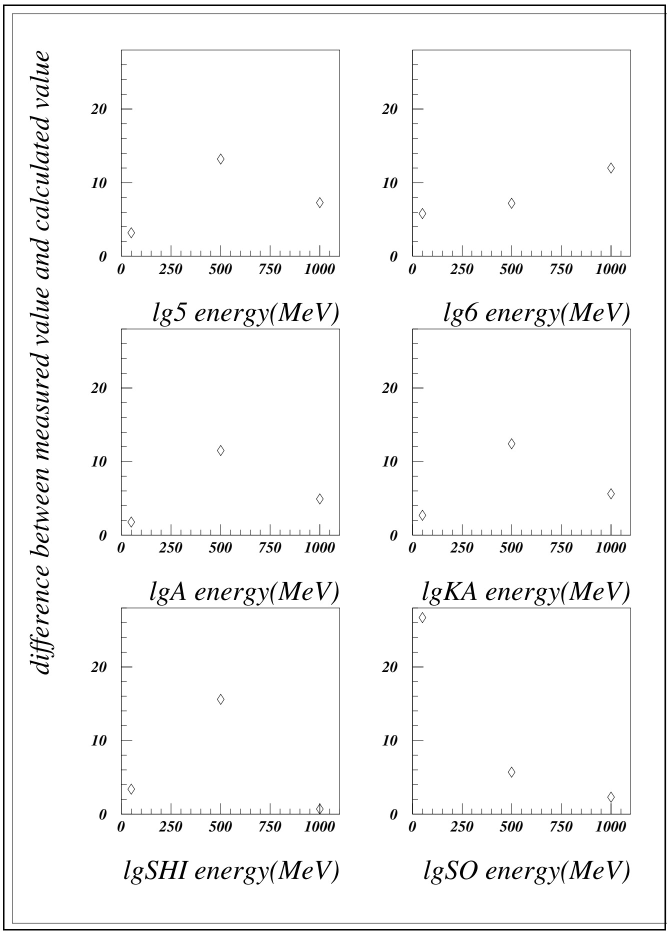

図 19: 計算値と測定値の差の絶対値

この結果より、 lg そは 50MeV で明らかに大きなずれがみられるが、他の lg については、 50MeV のずれ他の energy と比べてもそれほど大きくないように思われる。
結論として、 low energy でも linearity をみることができた。 (lg そを除く)

3.5.2 resolution

今までの解析において、もう一つ問題になったのが low energy における resolution の悪さである。

ところで、今までは resolution を

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

としていた。しかし、これは正確に書くと resolution は３つの項からなっていて、

$$resolution = \frac{P1}{\sqrt{E_e}} + \frac{P2}{E_e} + P3$$

の様に表すことができる。今までは、第２項と第３項を省略していた。しかし、第２項は energy の小さいところでは、その影響が大きくなると思われる。
そこで、 low energy scan を行なったものについては上の式を用いて、 resolution を求めてみることにした。

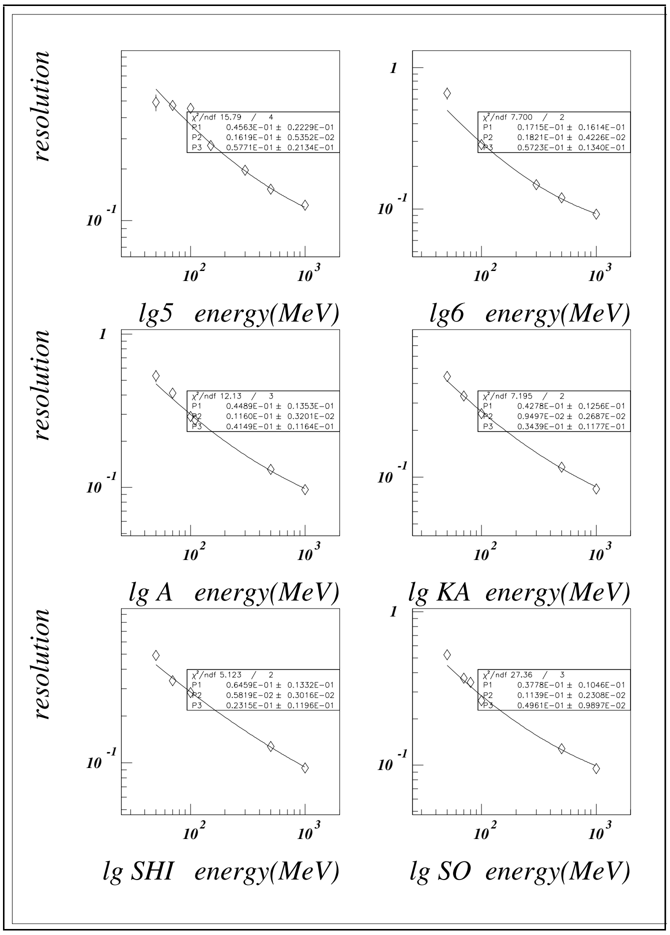

図 20: resolution(low energy scan)

low energy の点も大きく外れていないことがわかる。但し lg 5 は１部外れている。

これにより、 1GeV における resolution は以下のように求められた。

表 6: 3 つの項による resolution のパラメーター

	resolution(3 つの項による fitting)	resolution(1 つの項による fitting)
LG 5	0.120	0.109
LG 6	0.093	0.087
LG あ	0.098	0.093
LG か	0.087	0.082
LG し	0.094	0.090
LG そ	0.099	0.089

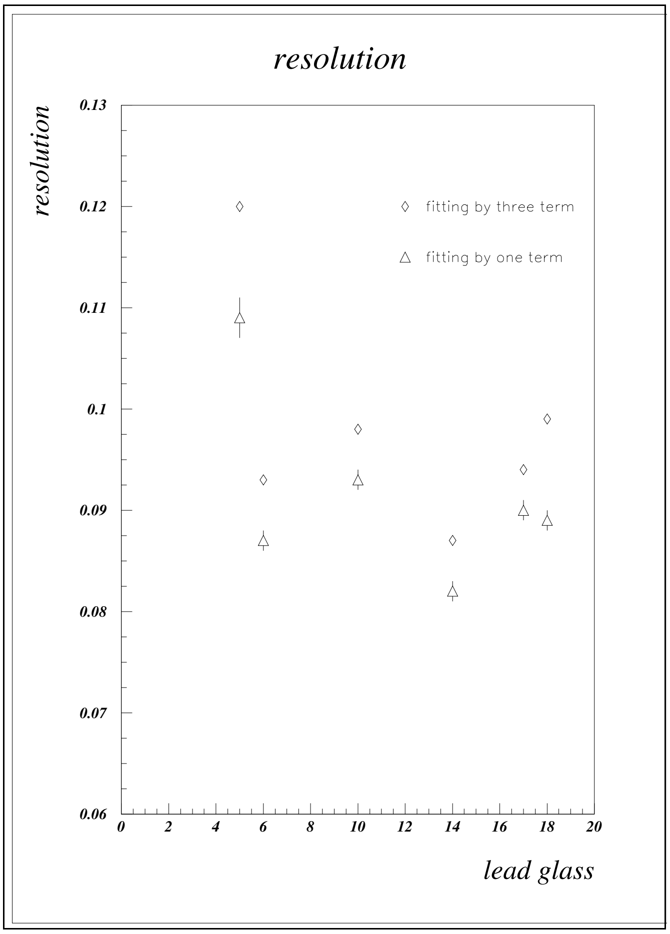

図 21: result of resolution

3.6 ゲート幅依存性

ゲート幅依存性の check は lg 7 で行なわれた。入射エネルギーは 500MeV 及び 900MeV であった。結果を以下に示す。

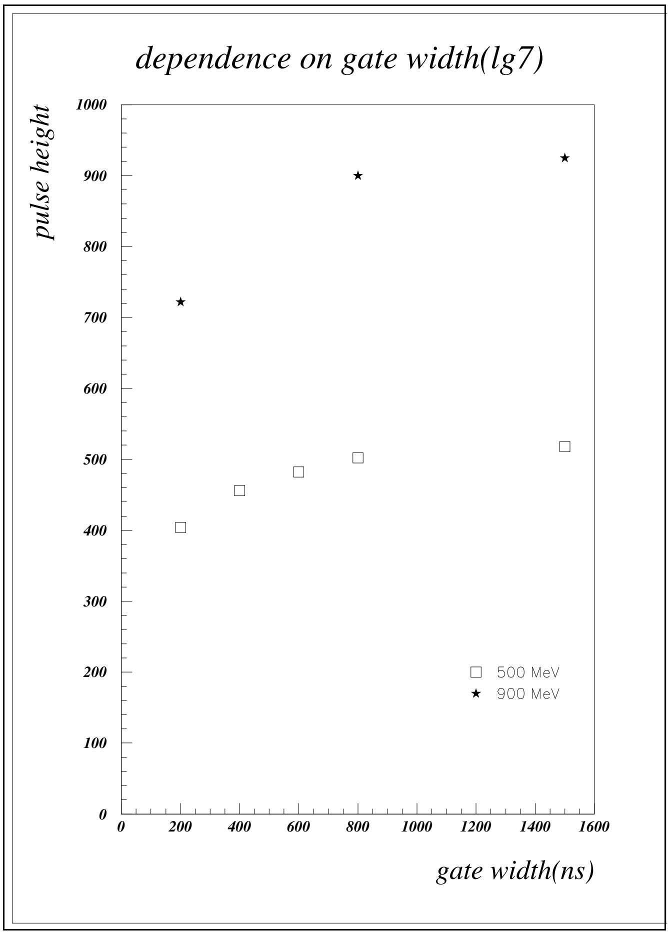

図 22: ゲート幅依存性

測定において、適切なゲート幅を使用していたかどうかについては S/N 比を調べればよい。ここで S は Signal のことで、 N は Noise のことで、ここでは、 pedestal の幅とする。この S/N 比が一番高いところがゲート幅として適当である、とみることができる。

以下のグラフは横軸にゲート幅、縦軸を S/N 比としたものである。(500MeV)

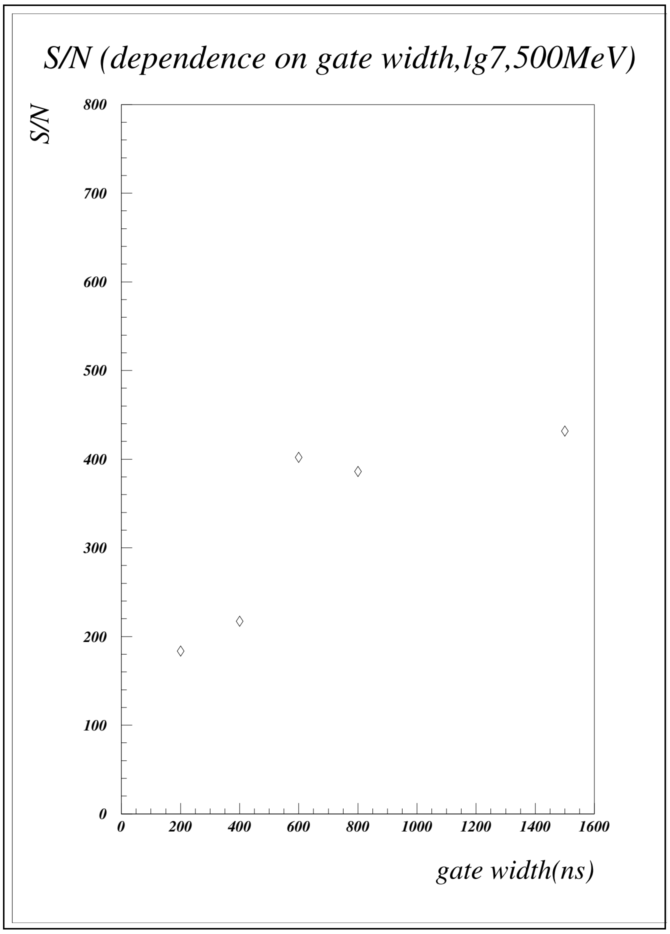

図 23: S/N 比 (500MeV)

ゲート幅 $1.5\mu\mathrm{sec}$ の時の S/N 比が最も高く、これがゲート幅に適しているといえる。

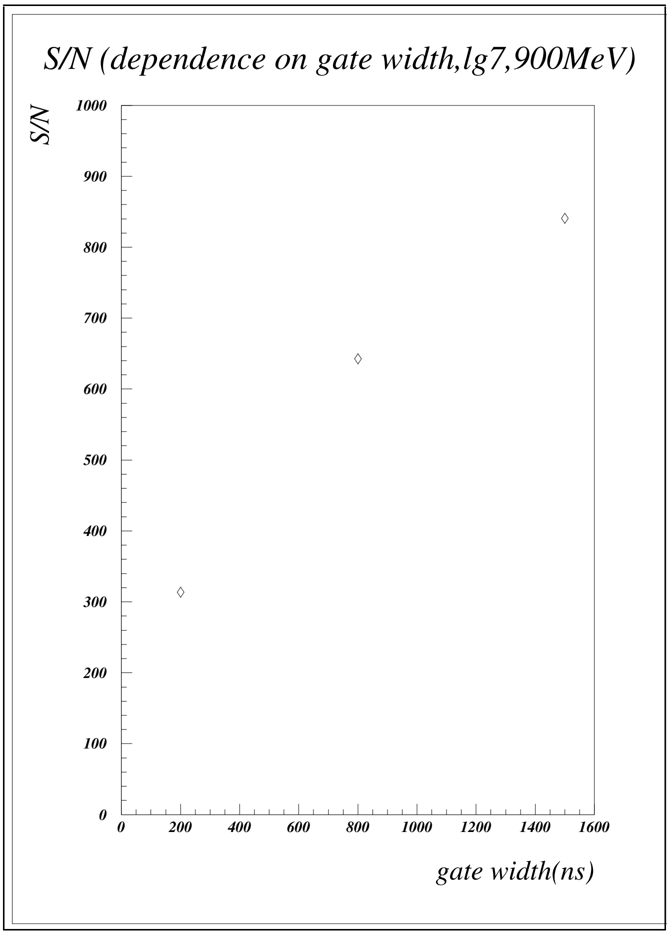

図 24: S/N 比 (900MeV)

入射エネルギー 900MeV の場合についても同様のことがいえ、本実験に用いられた、ゲート幅 1.5μsec は適当であったといえる。

4 ここまでのまとめ

- キセノンのみによる、６００本の鉛ガラス検出器のキャリブレーションは不可能であることがわかった。
- FAST BUS ADC により、low energy の signal をみることができた。
- １８本すべての鉛ガラス検出器について、energy vs. pulse height で、linearity がみられ、パラメーターを得ることができた。
- resolution= ８～１０ $\%/\sqrt{E}$ と求められた。
- low energy でも linearity はみられる。(1 部の lg を除く)
- $resolution = \frac{P1}{\sqrt{E_e}} + \frac{P2}{E_e} + P3$ と fitting することにより、low energy の resolution も適当であることがわかった。
- 本実験に用いられたゲート幅 1.5μsec は適当であったといえる。