

低価格高分解能 PET 製作を目的としたガンマ線イメージャ

青 垣 総一郎

京都産業大学大学院工学研究科情報通信工学専攻

竹 内 富士雄

京都産業大学コンピュータ理工学部

梗 概

PET (positron-emission tomography 陽電子放出断層撮影) 装置は医用機器として診断治療のために非常に有用であり、また、脳研究のためにも今や欠くことの出来ないデバイスとなっている。然しこの普及を妨げているのは、その数億円という価格である。PET を製作する際に細かいシンチレータ結晶を wave-length shifter を用いて読み出すことが出来れば、PET 装置が高価になっている原因の高価な光電子増倍管の数を画期的に減らしながら、しかも今よりも良い位置分解能を持つイメージャを製作することが出来る。然し今までこの方法の主な欠点は結晶中で生成された光子の集光能率が低いことであった。過去数年間に亘る努力の結果、我々はこの集光率を 1 桁向上させることが出来た。これによってこの読出し方法は今や実用の域に達したと考えられる。

プロトタイプは 16 × 16 本の LYSO (Ce) シンチレータ結晶をマトリックス状に組み立て、2 × 16 本の Kuraray Y-11 wave-length shifter と Hamamatsu H6568ModIII 光電子増倍管によって読出された。²²Na β⁺放射線源を用いてコインシデンス実験によってイメージャとしての性能を調べた。一個の結晶のサイズは 1 mm × 1 mm × 20 mm である。

本論文では、実験の詳しい内容、そこから得られた光子の集率、空間・時間分解能の他、検出効率などについて報告する。内径 20 cm の動物 PET をこの方法で製作するには実験に用いた様な百万本の結晶を読み出すのに光電子増倍管は 54 本ですみ、これは USD 100k 程しか掛からない。

1. 緒言

今まで PET の開発研究は主に新しいより高性能のシンチレータ結晶を作り出す事に努力の多くが払われてきた。理想的な結晶は大きな実効原子数を持つために γ 線の殆どが光電吸収されて、多くの光子が放出され、又、その透明性、一様性の故に γ 線測定における高いエネルギー分解能を保障する。この高いエネルギー分解能は対創成によって放出された γ 線が、検出器に

到達する前に体内でコンプトン散乱された事象の棄却を可能にするため、より高い位置分解能を与えることが分かっている [1]。

然し一方でこのような良好な光子の collection を可能にするためには、比較的大きめの結晶を光電子増倍管の様な低雑音、高感度光検出デバイスに直接結びつけることが必要で、それ故検出器の *granularity* を上げるためには多数の光検出デバイスが必要となり、これが PET の製作費用を押し上げる。また、比較的大きめのシンチレータ結晶内での光電吸収点の reconstruction には複雑な手続きが必要になる等の難しさがある [4-14]。

もし、このような光電吸収ピークからの体内でコンプトン散乱された事象の棄却をあきらめた場合、 γ 線の結晶中での検出は光電吸収に限られることは無くなり、結晶の選択肢はずっと増えることになる。この場合の光子の collection に科せられた条件は良好な検出効率と timing 分解能を保障する十分な光子、或は光検出デバイスにおける光電子数である。

結晶内で発生した光子を、直づけした光電子増倍管で検出するのではなく、何らかのライトガイドを用いて読み出す試みは今までも為されてきた。H. Du [15] らは wave-length shifter (WLS) を仲介にして結晶からの光子を読み出す試みを行った。我々も過去に LuYAP 結晶と Kuraray B-2 WLS を用いて同様の試みを行った [17]。この場合の長所は、一本の WLS によって多くの結晶を読み出すことが出来るため、光電子増倍管の数を増やさずに結晶の数を増やす事が出来る事であり、これにより高い *granularity* によって γ 線吸収位置の分解能を比較的容易に向上させる事が出来ることである。然しこの方法の難点は読み出された光子の数が極度に減ってしまうことであり、現に我々の過去の測定においても測定された光電子数は数個に限られてしまい、 γ 線検出効率の点でも非常に問題があった。またこの場合には、装置内での他の結晶でコンプトン散乱された γ 線の再吸収という問題が生ずる為、同時に一個の γ 線が複数箇所で見出されたような事象の棄却が必要となってくる。

WLS を用いたシンチレーション光の読み出しでの光子のロス、主に結晶と WLS の接合部で生ずる [17]。それは WLS の形状から来る問題と結晶の高い屈折率から来る光子の取り出し効率の低さが問題点となる。我々はこの点を改良するための努力を重ねてきた。その結果 LYSO (Ce) 結晶と WLS および光電子増倍管を用いて平均光電子数約 20 個と、少なくとも検出効率の点では問題ない程度まで光子の collection 能率を上げることに成功した。本論文では WLS を用いたシンチレーション結晶の読み出しの現状において、以上の改良によってどの程度の位置分解能及び時間分解能が得られるのか。及び得られた光電子数の測定方法と測定結果、検出効率、及び今後解決しなければならない問題点について報告したい。

本実験においては、 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ の LYSO (Ce) の全面鏡面研磨した結晶を matrix 状に組み立てて読み出している。結晶間には何も遮蔽材を挟まず、結晶間には余り圧力を掛けないようにして組み立てている。その理由は、一つの結晶内で一定の立体角内に放射された光子は全反射によって結晶端面まで運ばれて結晶外に出るが、それ以外の、結晶の軸に対して比

較的大きい角度で放出された光子は、隣の結晶に入射しても、そこでも光子は結晶端面に到達したとき全反射によって端面から出られないため、結局これらが結晶間のクロストークを引き起こすことはないかと仮定した。この仮定が正しいかどうかの検証は本文中で行う。

本論文第2章においては実験セットアップと実験方法に就いて述べる。第3章は得られた光量と検出器としての効率について述べる。第4章では時間分解能について考察する。第5章では位置分解能を議論する。第6章は結論と議論にあてられる。

2. 実験セットアップと実験方法

図 2.1 に実験に用いたセットアップの模式図を示す。検出器は 2 つあり、1 つは図の左側、もう一つは右側に描いてある。2 つの検出器の中央にガンマ線の放射線源がおかれている。1 対の 511 keV ガンマ線が線源から正反対方向に放出される。ガンマ線源として用いたのは ^{22}Na β^+ 線源である。これは直径 1 mm の球体に閉じ込められ、直径 250 mm 厚さ 3 mm のコイン状プラスチック片の中央に収まっている。

左側の検出器は長さ 20 mm、断面の一辺 1 mm の直方体シンチレータであり、光電子増倍管 (PM) の光電面に光学グリースを介して直接マウントされている。直方体の中心は 2 つの検出器を結ぶ直線上に位置し、PM にマウントされたのと反対の 1 mm \times 1 mm の面が放射線源の方向を向いており、そこから線源までの距離は 120 mm である。今後我々はこの検出器を針状検

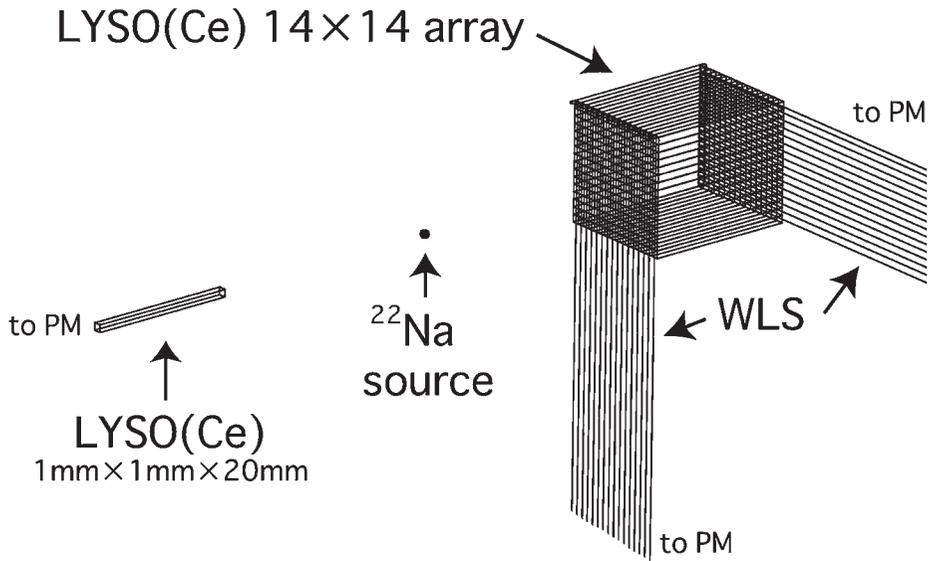


図 2.1 実験に用いたセットアップの概念図。真中に ^{22}Na β^+ 線源、右側にはマトリックス検出器、左側には針状検出器がおかれている。

出器と呼ぶことにする。シンチレータ結晶としては LYSO (Ce) を用いた。この結晶は大きい実効原子数を持ち、ガンマ線エネルギーあたりの光子の発生数が約 25000/MeV と非常に大きい。

一方右側の検出器は同じく線源から 120 mm の位置に置かれているが、左側針状シンチレータと同じ LYSO (Ce) 結晶を 16×16 個マトリックス状に組んだ $16 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ の直方体をしている。256 本のシンチレータは中心軸に平行になっている。

すべてのシンチレータ結晶のすべての面は鏡面仕上げになっている。マトリックス検出器の線源側と反対側にはそれぞれ直径 1 mm の wave-length shifter (WLS) が平面状に平行に 16 本、透明な両面接着テープを介して貼付けられている。各々の WLS は 1 列 16 本の結晶を読み出すようになっており、線源側 (これを y 面と呼ぶ) と反対側の WLS の走る方向は直行している。各々の WLS の一端は PM の photocathode の 1 つのチャンネルに光学グリースを介してマウントされている。これによって 256 本のシンチレータ結晶は $2 \times 16 = 32$ チャンネルの PM によって読み出すことが出来る。WLS のもう一方の端面は開放端となっている。

PM としては 3 個の HAMAMATSU H6568 MOD III を、1 個は左に (1 チャンネルのみ使用)、2 個を右の検出器に用いた。この PM の特徴としては、1) 40% もの高い量子効率を持つ photocathode を有していること、2) ゲインが一様であるため、きれいなシングル光電子ピークの観測が可能であること、等が挙げられる。後者については後に 3 章で詳しく述べる。この PM は特製のプリーダーを備え、アノードの前の Last dynode 信号が読み出せるようになっている。この信号はすべての 16 チャンネルの和信号を与える。

WLS としてはクラレ Y-11 を用いた。採用した複クラッド版は単クラッド版に比べて高い光子の搬送能力をそなえている。しかし複クラッド版は円柱状のものしか市販されていないため、先に述べたように結晶の先端に 3M 高透明度 film #9483 (0.125 mm 厚) をはりつけこれの弾性を利用して WLS 表面の接触面積を広くするように工夫している。この物質の屈折率は 1 より大きく、結晶の端面が空中にある場合に比べてより多くの光子が端面から取り出すことが出来る。(端面が空気中にある場合は結晶の高屈折率 (1.86) のため、端面に到達した光子の 93% が結晶内部端面で反射されてしまう。) この物質の使用によって光子の搬送率は約 15% 向上した。LYSO (Ce) の発光波長は 440 nm であり、一方 WLS の吸収および放出波長はそれぞれ 430–460 nm と 470–500 nm である。PM の光電面の最大感度の波長は 410 nm である。これらのことから Y-11 はこの測定にマッチしていることがわかる。

図 2.2 に本実験で用いたエレクトロニクスの模式図を示す。トリガー信号は右側検出器の 2 つの last dynode 信号と、左針状検出器側の信号のコインシデンスによって生成した。左右の 3 個の PM のすべてのアノード信号、last dynode 信号の積分波高は Hoshin C-009H 14 ビット CAMAC ADC によってデジタル化され記録された。またすべての信号の時間情報は Philips 7187 CAMAC TDC によって記録された。データは Kinetics 3922 CAMAC crate controller と VME インターフェイスを介してコンピュータに取り込んだ。解析には CERN ROOT に基づいて開発

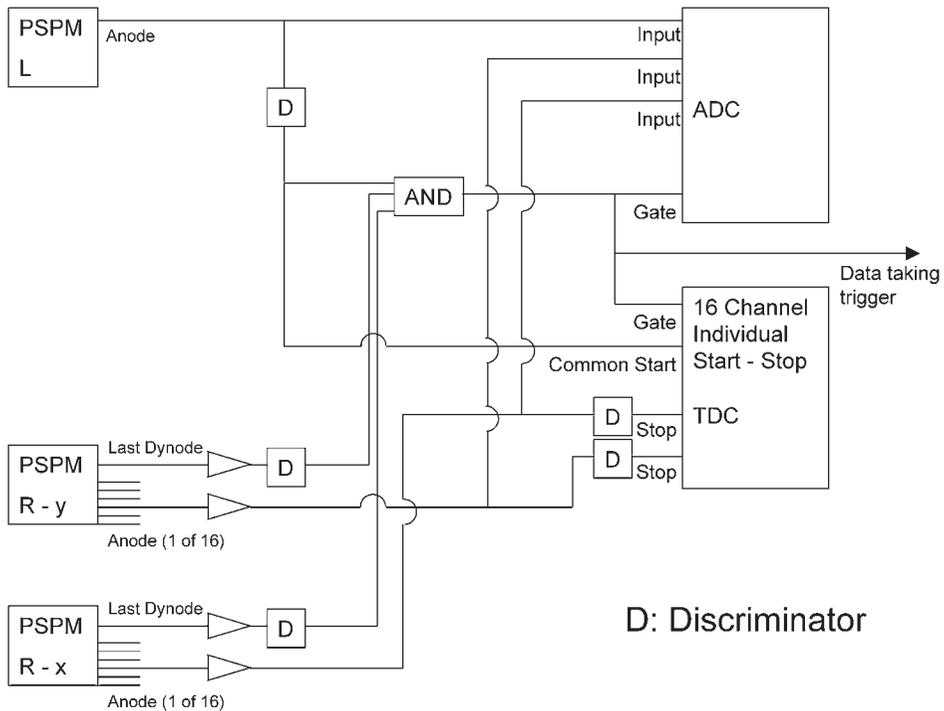


図 2.2 実験に用いたエレクトロニクスの模式図。DAQ トリガーは3つの光電子増倍管の Last dynode 信号のコインシデンスによって生成される。すべてのアノード信号は、片や荷電積分型の ADC により、片やディスクリを通してそのタイミングが TDC によって記録された。

された OMON プログラム [18] を用いた。

3. 光量及び検出効率

3.1 左側の針状結晶からの光量

コインシデントイベントについて、まず左側の針状結晶から PSPM によって読み出されたアノード信号の ADC に記録された波高分布を図 3.1 に示す。

この波高分布の特徴は、光電吸収ピークははっきり分離して見えるものの、コンプトンテイルも亦可成り大きく見えることである。これは下記の事情によると考えられる。コンプトン散乱の断面積は原子番号 Z にほぼ比例するのに対して光電吸収の断面積は Z^5 に比例するから、LYSO のように実効 Z の大きい結晶では、そのサイズが十分おおきければ光電吸収が支配的である。それはコンプトン散乱の寄与もかなりあるものの、一旦散乱を受けたガンマ線も究極的には光電吸収されるためであり、発光量の分布においては光電吸収ピークが支配的となることが EGS によるシミュレーションで裏付けられる。然しこの結晶（検出器）は非常に細いために、511

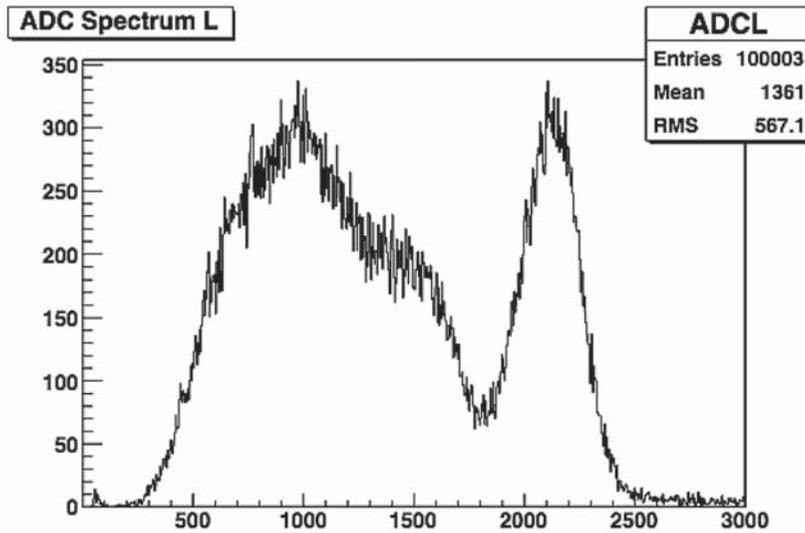


図 3.1 左側針状結晶からの信号の ADC による波高分布。横軸は ADC のチャンネル数。

keV のガンマ線の多くが結晶内でコンプトン散乱を起こした後、光電吸収されることなく結晶から逃げる。そのためこのような針状結晶ではコンプトンテイルが大きく出る事がこれも EGS によって確認される。以降では検出器の検出効率測定を計ったりする際は針状結晶に吸収されるガンマのうち、この光電ピークに含まれる事象のみを扱う事によってこの検出器の閾値などの影響を受けないようにするようにする。

3.2 Matrix 検出器からの光量

次に右側マトリックス検出器であるが、全イベントに関して典型的なアノード信号の ADC による波高分布は図 3.2 の様になる。この測定においてはノイズの影響を避けるため閾値を 15 mV に設定してあるが、図 3.2 に示されるように single photoelectron peak が見えている。図 3.3 は実際にシングルフォトエレクトロンピークを測定した場合である、ガウス分布でフィットするとピークの平均値は同じである。これが我々の用いた PSPM H6568MODIII の特色であり、プリーダーの設計に注意して信号の線形性に留意していれば、この peak の位置から実際に測定された波高が何 photoelectrons に相当するかを直接測る事が出来る。以下、ADC を用いて得られた光量は光電子数単位で記すが、それはすべてこの方法で計測されたものである。

図 3.4 と 3.5 にこのコインシデンス測定によって得られた matrix 検出器の WLS を通じて集められ、ADC に記録された光量の分布を記す。これは x、y、各々の面について 16 本の WLS のマウントされた PSPM のチャンネル信号からの ADC 出力の和を、光電子数でプロットしたものである。まず注目されることは、光量の減衰が大きいため、光電吸収ピークは独立しては見えない

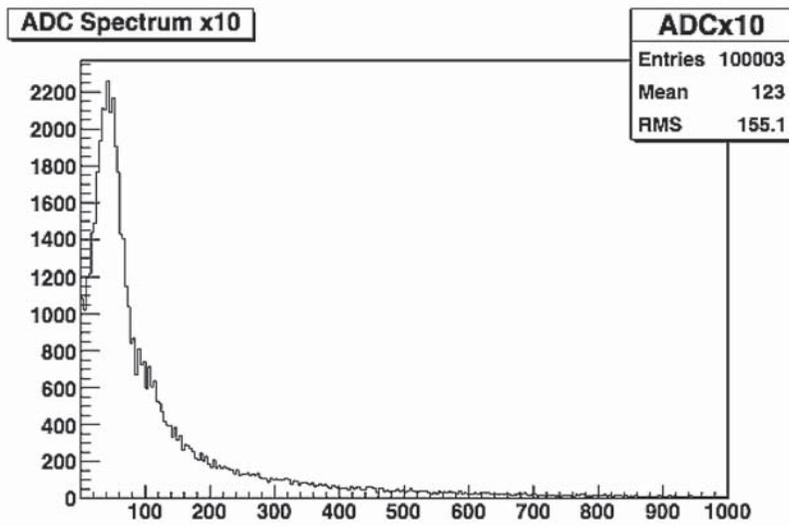


図 3.2 典型的な matrix 検出器の WLS からのアノード信号の ADC 分布。横軸は ADC チャンネルである。

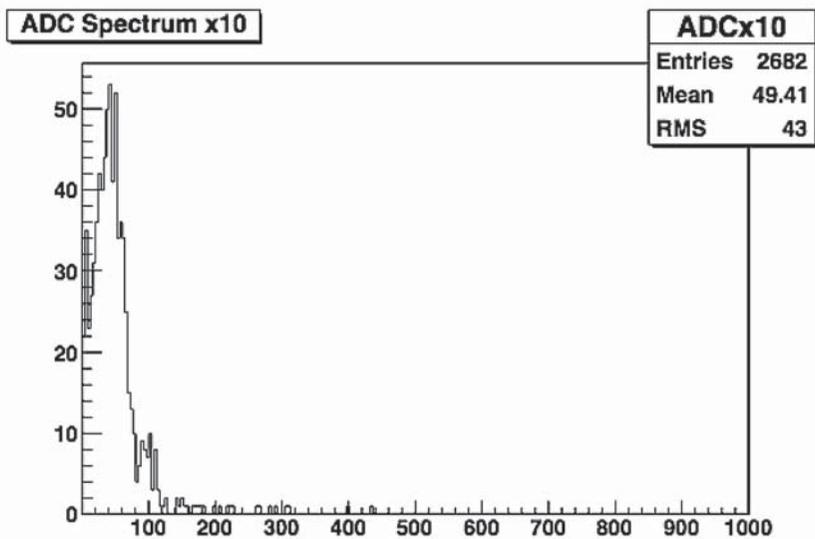


図 3.3 H6568MODIII single photoelectron ピーク (ADC 分布) . 図 3.2 と同一 WLS からの信号 .

いという形状上の特徴である。そして重要な絶対的な光量に着目してみると、y 面からの光量の方が平均して 21.7 と、x 面からの光量、平均 17.4 より大きいことが読み取れる。この点は次のようにして理解することが出来る。EGS によれば長さ 20 mm の LYSO (Ce) 結晶中での一方の端面から垂直に入射した 511 keV ガンマの吸収位置の分布は図 3.6 のようになり、入り口近くの方がずっと多い。一方我々の独立の測定の結果、この結晶中での (縦方向の) 放出光子の減衰

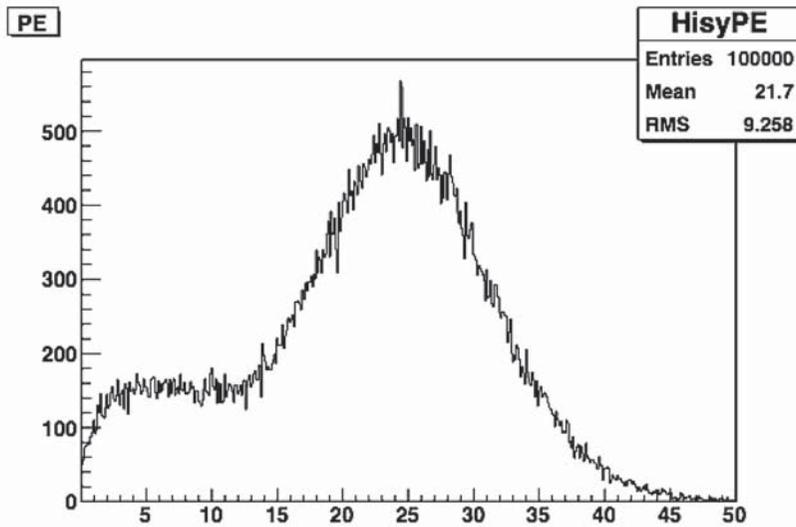


図 3.4 図 3.2 と同じ手法で y 面 WLS から読み出した波高分布。横軸は光電子数で目盛っている。

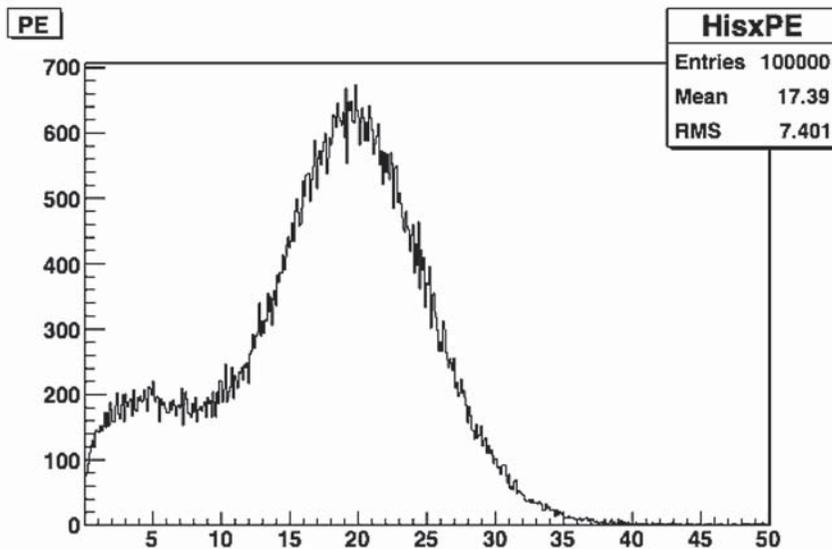


図 3.5 図 3.2 と同じ手法で x 面 WLS から読み出した波高分布。横軸は光電子数で目盛っている。

定数は減衰を $e^{-\mu x}$ として $\mu = 0.79/\text{cm}$ と大きいことが分かっているため、結果としてガンマ線の入り口側、即ち y 面側の方が発光量が平均して多いことになる。

3.3 ブロックを直接 PSPM ヘマウントした場合の光電子数

我々が今まで使っていた PSPM (H6568MODIII) に 16mm × 16mm × 20mm の結晶ブロッ

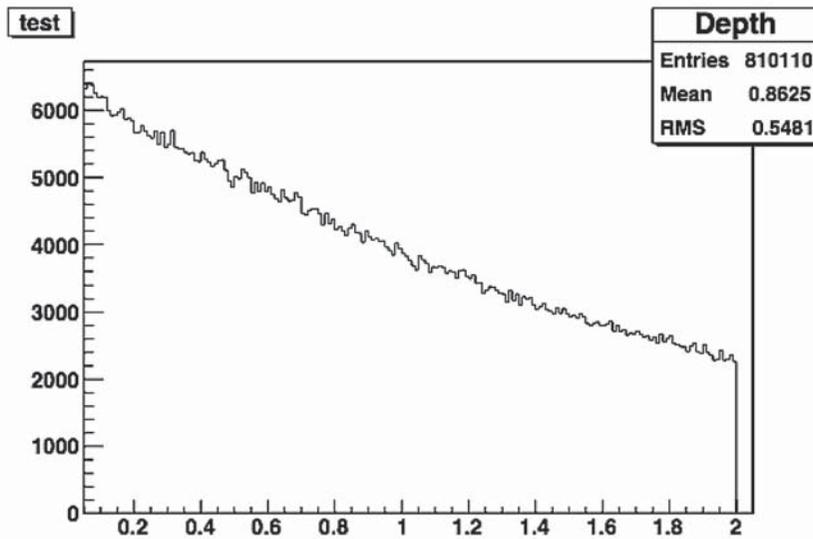


図 3.6 EGS による長さ 20 mm の結晶中での 511 keV ガンマ線の吸収位置分布 (単位は cm)

クの 16mm × 16mm の面を直接マウントして γ 線ソースの右側に置き、左側には 1mm × 1mm × 20mm の結晶を用いて、コインシデンス実験を行った。右側検出器のフォトカソードに接する面の大きさは 16 mm × 16 mm であり、一方 PSPM のフォトカソード面の大きさは 18.1 mm × 18.1 mm であるから、結晶ブロックからの光はほぼ一様に全部読み出せることになる。結晶面とフォトカソードのカップリングには屈折率 1.45 の光学グリスを使用している。ソースと各検出器間の距離は今までと同じく 120mm である。この実験の目的は二つあり、一つはブロックを直接読み出したときの光電子数の測定およびそれと時間分解能との関係の理解のため、もう一つは matrix 検出器の検出効率測定のコントロールとして用いる為であり、これについては次節で詳しく述べる。まず、光電子数を数える。

図 3.7 から光電吸収のピークが支配的である事が分かる。図 3.7 は各アノードからの ADC の和で、横軸は光電子数に換算してある。フィットしたガウス分布から考えてフォトピークの平均が 1128 であることがわかる。幅は σ で 54.62、半値幅で約 125 となる。それぞれ単位は光電子の数である。全体では平均して 920 個の光電子が 1 イベントあたりに検出されている。PSPM の量子効率が 40% なので、PSPM まで到達した光子は 2.5 倍の 2300 個と推定される。この数が妥当であるかどうかを検証するため実験装置全体のシミュレーションを行った。シンチレータ結晶と γ 線との相互作用は EGS を用いてシミュレーションを行った。結晶が励起された後に放出する光子の数についてはカタログの値 25000 photons / MeV を使用している。光子の発生場所は EGS によって得られた γ 線とシンチレータ結晶との相互作用点を用いた。光子の進行方向は乱数によって 4π 方向に一様になるようにした。シンチレータ結晶の各面が理想的な面として、

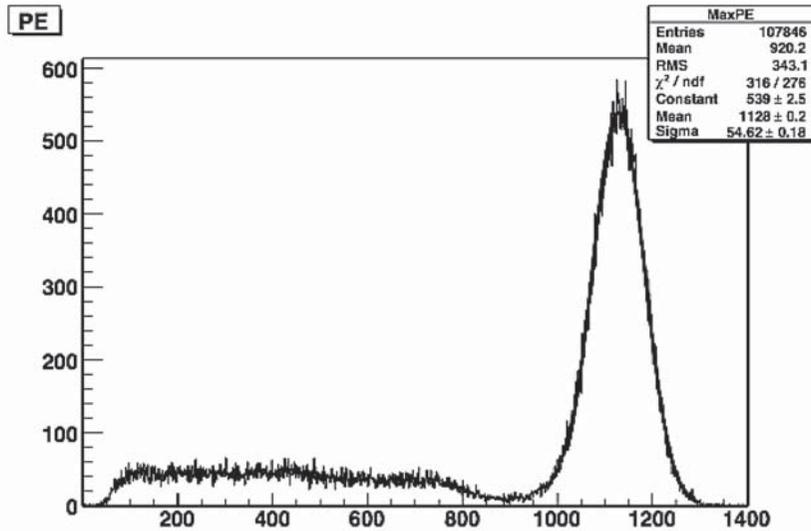


図 3.7 ブロック検出器からのアノード信号の ADC 出力の総和。横軸は光電子数フォトピークをガウス分布でフィット

結晶内での光の減衰を無視して光子の反射をシミュレートすると、約 24% のシンチレータ結晶内で発生した光子が PSPM のフォトカソードまで到達する。(PSPM とは逆のシンチレータの面は空気と接しているとして、そちらでの反射したものも考えに入れる)。内部で発生した光子は約 9600 個と推定される。また、前述の EGS によって 1 イベントあたりにシンチレータ結晶が励起される平均エネルギーを求めると 400keV となる。 $25000 \times 0.4 = 10000$ となり 9600 に非常に近い値となる。このことから EGS によるシミュレーションと我々が行っている光子の結晶内での移動のシミュレーションが妥当であると考えられる。

次に前節に述べたマトリックス検出器であるが、我々が使用している WLS は円柱形であるためシンチレータ結晶から外へ出る光子の数が光学グリッドを使った場合より悪くなる。我々はシンチレータ結晶から出た光子が WLS の内部を通過する過程もシミュレートした。光子が WLS 内のダイを通過する平均距離は 0.90mm あり最短でも 0.64mm ある。0.64mm の場合ですら 99.9% の変換が行われる事がカタログからわかるのでシンチレータ結晶から出た光は必ず WLS で変換されるとしてシミュレーションを行い、結果を block の場合と比較して表 4.1 中に纏めた。

この結果から我々の実験結果がよく説明されることが分かった。特に重要なのは matrix 検出器においてほぼ予想通りの光量が得られていることで、我々が予期していない光のロスは無いのと考えられる。光電子数のみならずスペクトルそのものについても、図 3.7 の分布についてポアソン分布に decompose した上で、各コンポーネントに $21.7/920$ (y) あるいは $17.4/920$ (x) を掛けたものを平均とするポアソン分布関数を合成すると各々図 3.4 と図 3.5 にほぼ近い分布となることが確かめられた。このことは直接読み出しに比べて WLS を使った読み出しの方が

	Block 検出器 (PM に直接マウント)	Matrix 検出器 (WLS を使い読み出し)
511keV の γ 線が 16mm \times 16mm \times 20mm の LYSO に入射したときの平均 energy deposit	400keV	400keV
平均発生光子数	10000	10000
シンチレータの一面から出る光子の個数 (結晶面が完璧な平面としたシミュレーション)	2400 (LYSO からグリスへ)	780 (LYSO から空気へ)
WLS の一端から出る光子の個数		47 (シンチレータから出た光子が全て WLS で変換されたと仮定)
PM で検出できる光電子の個数 (量子効率のカタログから 40% であるとして。)	960	19
実験で得られた光電子の個数	920	21.7 (y 面) 17.4 (x 面)

表 3.1 シンチレータ結晶から PM にいたるまでの各部分での光子の数の変化のシミュレーションと、実験結果 (最下行) との比較

光子数は遥かに小さいが、その減少の割合はイベントによらず常にほぼ一定であることをしめしている。

3.4 検出効率

EGS を用いて厚さ 20 mm の LYSO (Ce) 結晶の 511 keV γ 線の吸収率を見ると約 81 % であることがわかる。これに比較して我々の Matrix 検出器の検出効率が実際にどの程度低くなっているのかを測定する目的で、前節に述べたセットアップで、Matrix 検出器に変えて、Matrix と同サイズの単一シンチレータブロックを用意し、それを直接 PSPM にマウントして計数の比較を行った。

^{22}Na 放射線源、線源までの距離等すべてマトリックスを用いた計測と同じにした。この計測においてはイベントのトリガーは左側針状ディテクタからの信号のみを用い、右側ディテクタについては tag mode でデータ取得を行った。(matrix 検出器に就いてもこのモードで取り直した) データ解析において、前述の通り針状検出器の光電吸収ピークに含まれるイベントのみを用いた。ノイズの入っていないことを確かめる目的で取った針状検出器—Matrix 検出器間の TDC スペクトルは図 3.8 に示すようであり、ノイズを除く目的で 16.5 から 32ns までのイベントを採用した。

結果は表 3.2 に示す通りであった。

Block 検出器の場合 4155 イベントに対しマトリックス検出器では 4191 イベントと、比率は 100% を越えてしまう。しかしこの場合の ADC 分布は図 3.9 に見えるように非常にパルスハイトの小さい領域にノイズと考えられるイベントの過剰が観察される。マトリックス検出器がトリ

	block 検出器	matrix 検出器	比
イベント取り込み数	100000	100000	1.0
Coincident イベント数	4155	4191	1.009 ± 0.001
閾値5(block 検出器では) 118 の場合のイベント数	4074	3927	0.964 ± 0.001

表 3.2 Block 検出器と matrix 検出器の検出効率の比較

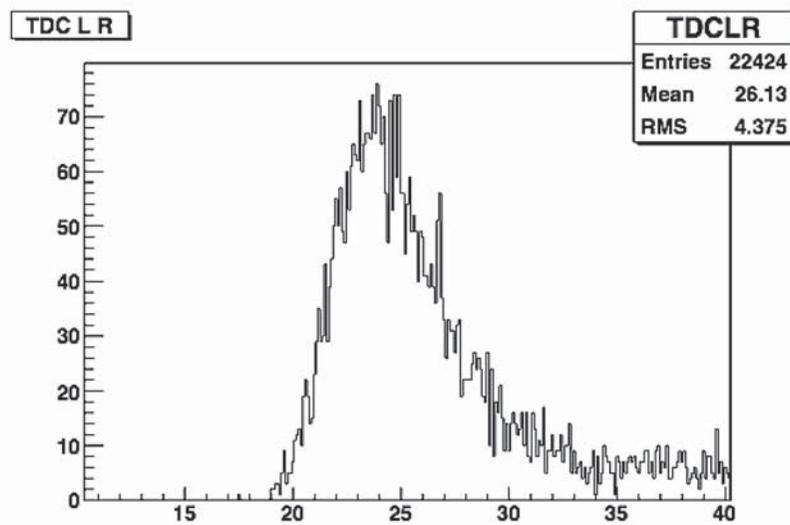


図 3.8 TDC スペクトラム。スタートは左側針状ディテクタ、ストップはマトリックス検出器。横軸の単位は ns。縦軸は頻度である。

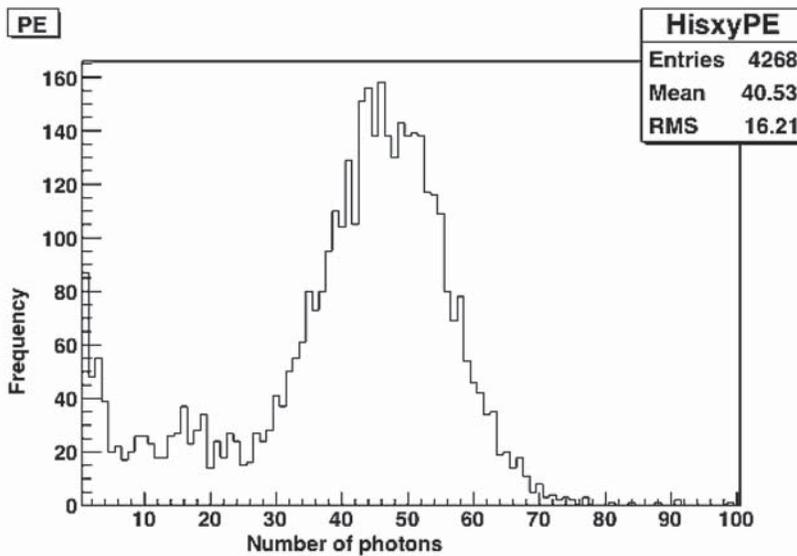


図 3.9 マトリックス検出器からの ADC スペクトラム。x、y 両面の和

ガーに使われているときは小さいパルスは閾値で切られて図 3.4、3.5 のようになるはずで、それにあわせてマトリックス検出器のイベントを閾値 5 光電子で切るとイベント数は 3927 となり、これは block 検出器については閾値約 118 に相当し、その場合のイベント数は 4074 となり、比率は $96.4 \pm 0.01\%$ となる。すなわちマトリックス検出器の検出効率 block 検出器に比べてほぼ遜色無く、絶対値にして 78% 程度となる。WLS を介して読み出す方法でも検出効率が悪くなる事は無いと考えてよい

4. 時間分解能

高い event rate を必要とする PET においては、一つのベータ崩壊からの 1 対のガンマの正しいペアの同定のために、良い時間分解能は非常に重要である。高い時間分解能は狭いタイムウィンドウを許し、よって高い event rate に於る測定が可能となる。

時間分解能はおもに統計的な揺らぎに由来するものであるから、測定時に得られる光電子数で決まってくる。我々の WLS を用いた結晶の読み出しにおいては、前述のように得られる光量、すなわち光電子数がかなり限られてしまう。そこで、この読み出し方法によって一体どれほどの時間分解能が期待できるかを知ることが重要になってくる。

時間分解能を知るために我々は針状の左側カウンターと右側カウンターのタイミングの差を測定した。右側のカウンターのタイミングとしては回路からみられるように x、y 面のタイミングの早いほう、それも各面の WLS のタイミングの一番早いものを取っている。各面で、一番早いタイミングを与える WLS は、当然のことながらたいていの場合、最大の光量を与えるファイバーである。

さらに x、y 両面のタイミングの時間差の分布を測定した。また、さらに我々の回路系や、PSPM の持つ時間的 uncertainty を推定する目的で、3 章で検出器の検出効率を実験的に測定する目的で行った右側の matrix 検出器の代りに $16 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ の鏡面に仕上げた LYSO ブロックの正方形の面を直接 PSPM 6568MODIII にマウントした検出器を用いた測定データからの左側、針状カウンターとの間の時間差のデータを解析にもちいた。

測定にはすべて Philips 7187 CAMAC TDC をもちいた。このユニットの時間分解能は 25 ps/channel、フルレンジは 100 ns で測定した。x、y 面それぞれ 16 本の WLS が PSPM の各 photocathode にマップされているが、時刻はこの 16 個のアノード信号のタイミングを整列させて得ている。実際はこの PSPM が小さいこともあって、ほとんど有意な整列のための時間のシフトは必要でなかった。

図 4.1 は右がわに LYSO ブロックをおいた場合の左右の時間差の分布であり、横軸には ns 単位の時間である。TDC のスタートは左側針状カウンター、ストップは右側カウンターである。分布の半値幅は 1.28 ns と小さいが、これは推定される光電子数、左側針状検出器で平均 700/

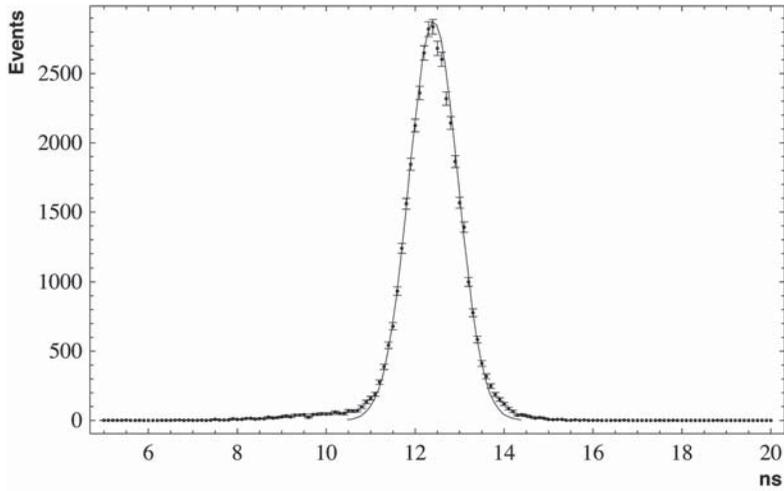


図 4.1 Start: 左側針状カウンター, stop: 16 mm × 16 mm × 20 mm の鏡面に仕上げた LYSO ブロックの正方形の面を直接 PSPM 6568MODIII にマウントした検出器からのタイミング信号としたときの時間差のプロット。曲線については本文参照。

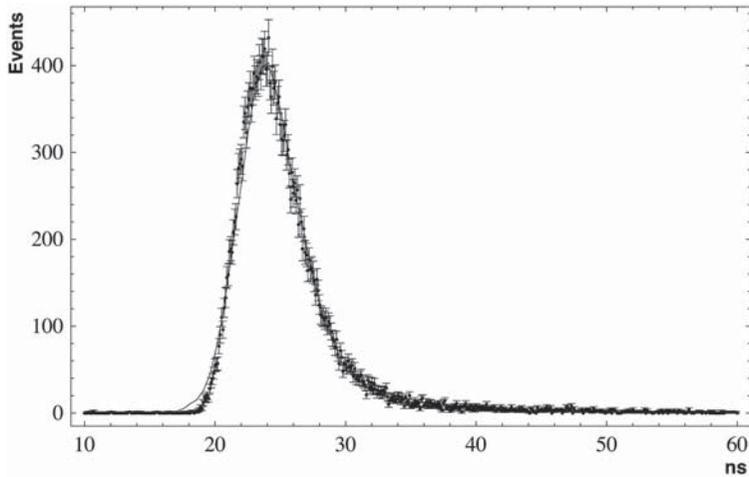


図 4.2 針状の左側カウンター (start) と右側 pad カウンター (stop) のタイミングの差の分布をプロットしたもの。半値幅は 5.4 ns、ピークの右側は pad のカウンターからの光電子数が少ないことによって長いテイルを曳いている。曲線については本文参照。

event、右側ブロック検出器で 960/event と大きいためである。この光電子数の推定方法については 3 章で述べた。

図 4.2 は針状の左側カウンターと右側カウンターのタイミングの差の分布をプロットしたものである。半値幅は 5.4 ns、ピークの右側は pad のカウンターからの光電子数が少ないことによって長いテイルを曳いている。

3 章で実験的に得られた pad の光電子数の分布を用いてタイミングの揺らぎをシミュレート

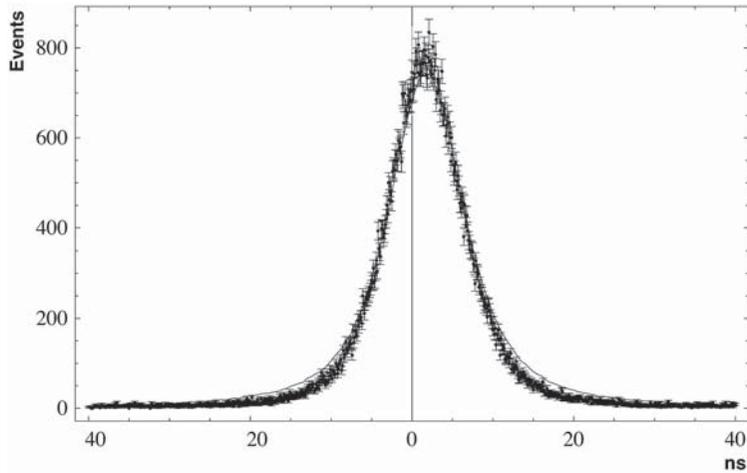


図 4.3 x, y 面のタイミング差をプロットしたものである。スタートは y 面、ストップは x 面の信号となっている。両面とも光電子数が少ないため分布はテイルを引いており、半値幅は 11 ns である。曲線については本文参照。

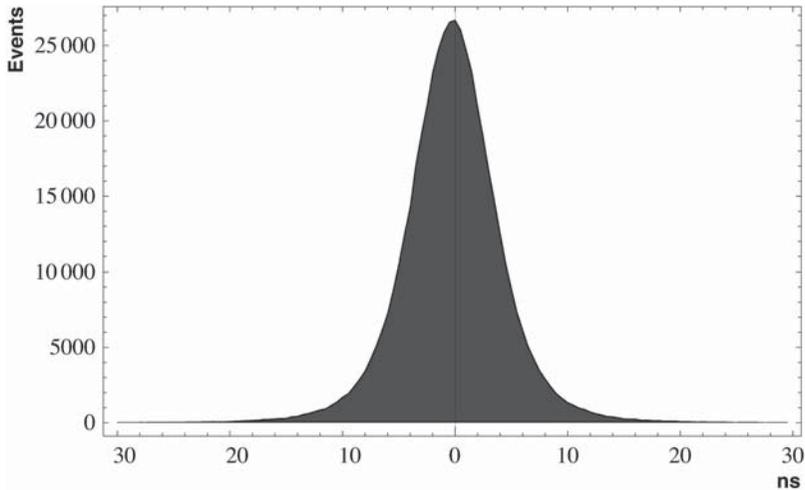


図 4.4 以上の測定とシミュレーションの結果を用いて予測された同一の matrix 検出器を用いて PET を作ったときに予想される 2 つの検出器間のタイミング差の揺らぎ。

した。このシミュレーションには回路系および PMPM に由来する時間揺らぎの情報が必要であり、この揺らぎは正規分布に従うものと仮定して、図 4.1 の分布と図 4.2 の分布を同時に再現できるような正規分布の標準偏差を決めた結果、標準偏差を $0.194 + 5.5/\sqrt{N}$ ns と選んだときに最も再現性が良いことがわかった。ここに N は光電子数である。図 4.1、図 4.2 中にはこのシミュレーションの結果が曲線で記してある。

図 4.3 は上に述べた x, y 面のタイミング差をプロットしたものである。スタートは y 面、ストップは x 面の信号となっている。両面とも光電子数が少ないため分布はテイルを引いており、

半値幅は 11 ns である。すでに上の 2 つの図に用いられたシミュレーションに基づいてこの分布をシミュレートした分布が曲線で記されている。これを見ると simulation はほぼ実験結果を再現しており、この、実測された光電子数の分布を用いたモデルは妥当なものと思われる。

以上の simulation に基づいて、我々に取って一番重要な、このような検出器を 2 つ反対側においたときにその時間差にどれだけの揺らぎが生ずるかを推定する。

これまでに用いたモデルを用いてこの 1 対の検出器の時間差の揺らぎを推定したのが図 4.4 である。これによればタイミングウィンドウを 10 ns まで狭めても検出効率率は 96.5 % まで保証されるものと考えられる。

5. 位置分解能

^{22}Na 放射線源からは正反対方向に 1 対のガンマ線が放出される。マトリックス検出器の検出位置分解能を測定する目的で前述のように左側針状検出器との間のコインシデンス測定を行った。仮に放射線源に広がりがあったとし、又左側針状検出器が十分に細かったすると、左側検出器で検出されたガンマ線と対のガンマ線は右側検出器のただ 1 本の結晶（ここではこれを $x = y = 7$ とする。）に入射する。すると信号はこの結晶だけから得られ、見かけの位置分解能は単に $1/\sqrt{12} \text{ mm} = 0.29 \text{ mm RMS}$ になる筈である。然し既に見たように、中心の結晶に入射した γ 線はしばしばコンプトン散乱を受け、その周りの結晶に光電吸収されるため、発光は広がりを見せる。（ここで隣接しない結晶で光電吸収されたガンマ線を含むイベントは、データ解析の段階で棄却する。）また、もし結晶間に光子のクロストークがあれば、この広がりには更に大きくなる可能性がある。又結晶と WLS の間には両面接着テープがあり、ここでも光子のクロストークが存在する。我々は最大光量を記録した両面の WLS で決定される 1 本の結晶を入射結晶としているが、この入射結晶の多くの事象での分布は当然 0.29 mm よりも大きくなる。我々はこの分布から決定される位置分解能を検出器自体の位置分解能とする。

図 5.1 はコインシデンス測定に於る結晶マトリックス状の 2 次元ヒストグラムを示す。縦軸横軸にはそれぞれ結晶の x 座標、 y 座標がプロットしてある。ヒストグラム中の正方形は、その面積が相当するイベント数を表している。図 5.2 はこの 2 次元ヒストグラムの $y = 7$ におけるスライスとしてのヒストグラムを示している。この分布をガウシアンでフィットすると幅 1.03mm RMS または 2.25mm FWHM が得られた。我々は左側針状検出器、放射線源と右側マトリックス検出器の相互位置を変えながら同様の測定を行い、いずれの位置でもほぼ同様な幅が得られることを確かめた。このことは検出器の位置分解能の一様性のチェックになっている。

然しこのようにして得られた「幅」は検出器自体の位置分解能ではない。その理由は、放射線源が大きさをもち、又左側針状検出器も亦有限の大きさを持つためである。その上 ^{22}Na が崩壊する時放出される β^+ 粒子は可成りの大きさの運動エネルギーを持つ ($E_{\text{max}} = 540 \text{ keV}$) ため、

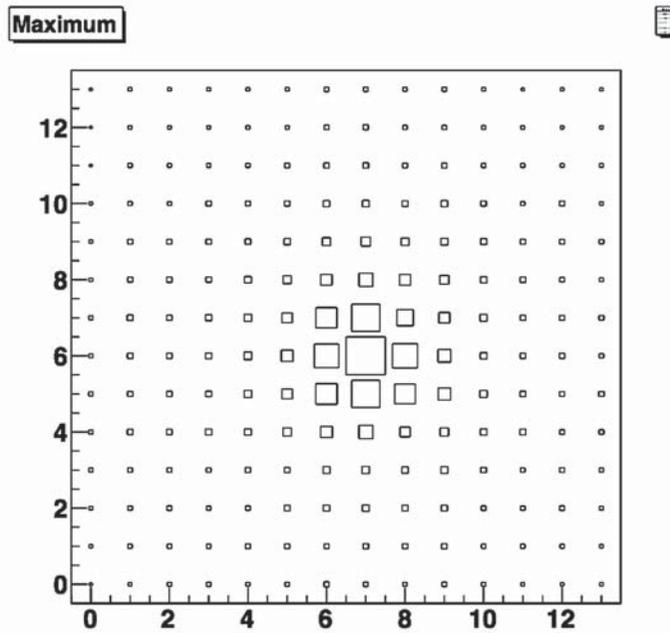


図 5.1 コインシデンス測定に於る結晶マトリックス状の2次元ヒストグラムを示す。縦軸横軸にはそれぞれ結晶の x 座標、y 座標（単位 mm）。ヒストグラム中の正方形は、その面積が相当するイベント数を表している。

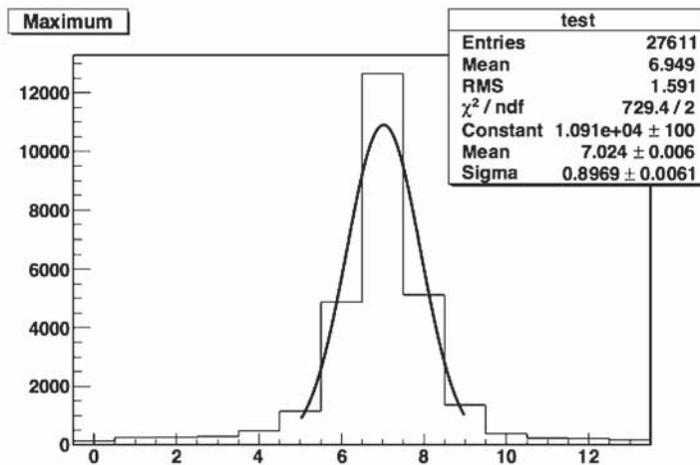


図 5.2 図5.1の y=6 におけるスライス。単一ガウシアンでフィットの結果、幅 1.03mm RMS または 2.25mm FWHM が得られた

対消滅が起こるのが必ずしも直径 1 mm の球体内であるとは限らない為である。そこで、我々の有限の大きさの線源と、左側針状検出器で決められるいわば「ガンマ線束」の広がりを実験的に確かめるための測定を行った。図 5.3 はこの測定のセットアップを示している。今までの

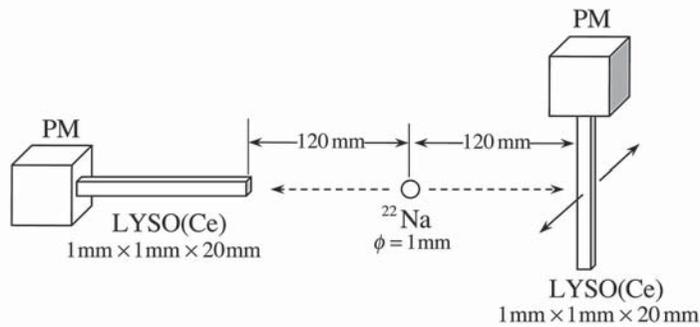


図 5.3 「ガンマ線束」の広がりを知る実験のセットアップ

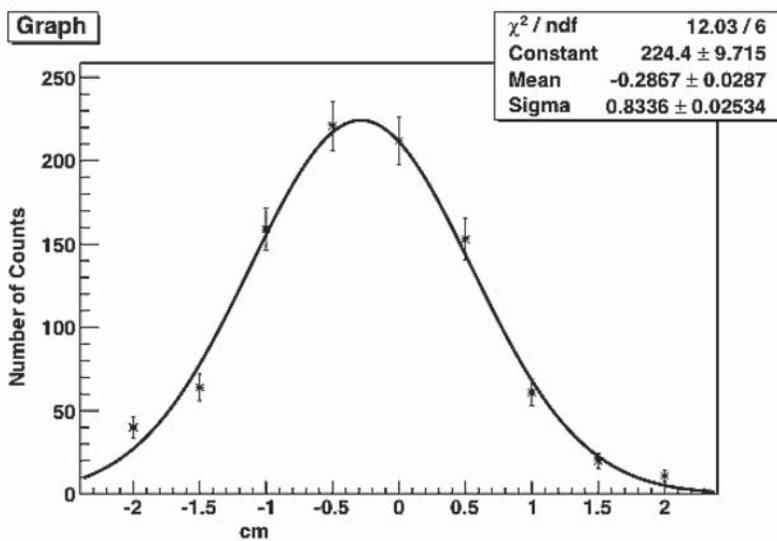


図 5.4 「ガンマ線束」の広がりを知った。半値幅 2.5 mm であった。

コインシデンス測定と位置関係はおなじであるが、右側マトリックス検出器の代わりに水平で、上下可動のこれも $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ の LYSO (Ce) 結晶を PSPM にマウントしたものを置き、左の検出器信号をトリガーにして右側検出器からの信号 (TDC 及び ADC 情報から異常なヒットは棄却した) の計測を行った。結果が図 5.4 に示されるとおりで、「ガンマ線束」の半値幅は 2.5 mm であることが分かった。そこで、この幅を再現するシミュレーションプログラムを作り、検出器自体の位置分解能を畳み込んだ結果が実験的に求められた幅になるようにすることにより、検出器自体の位置分解能は、ほぼ場所によらずに 0.64 mm RMS であることが判明した。

6. 結論と議論

WLSを用いて matrix detector から 511 keV ガンマを読み出す場合どれほどの性能が得られるかを調べた。結果を表にまとめると次の通りである。

光量	光電子数平均 21.8 (y 面) 17.5 (x 面)
検出効率	厚さ 20 mm の単体ブロックを直接 PM にマウントしてものとはほぼ同等
位置分解能	0.64 mm RMS (1.5 mm FWHM) で検出器中の位置によらない。
時間分解能	針状結晶との間の時間差分布 半値幅で 5.4 ns

光量については従来の結果より著しく向上した。これは直接読み出しに較べて約 1/47 に相当する。位置分解能は ガンマ線束の幅を deconvolve したもので、検出器中の位置によらないことが確かめられた。時間分解能については、シミュレーションによるこの検出器を複数並べた PET を使った時のタイミングウィンドウ幅は 10 ns ではほぼ 96.5 % 検出可能。という結果がえられた。

今回のセットアップの特徴は WLS を用いたことと細分化した結晶を用いたことである。今回断面丸型複クラッドの WLS を用いたが、キーポイントになるのは結晶と WLS の接合である。今回は両面接着テープを用いたが、これによって可成り理想に近い photon collection を行うことが出来た。今回の実験結果の特徴は、減衰がイベントや光路に殆ど依存しないと考えられる事で、3 章で述べたようにブロックで得られた光電子数分布にそのまま一定の減衰率 (1/47) を掛けることによって matrix 検出器の光電子数分布が得られる。これが良い検出効率につながる事はもちろんであるが、シミュレーションも容易になる。今回の実験では γ 線の入射による光子の発生に EGS を用いたが、それ以外に結晶面での全反射を仮定した光子の結晶端面までのトランスポートのシミュレーション、WLS 中の二次光子のトランスポートのシミュレーションと、一番やっかいな、結晶端面から出た光子が WLS に吸収される部分のシミュレーションを行ったが、この最後の部分については単に 1 定のロスがあるというロス率だけで結果が再現できることが分かった。

次に細分化した結晶を用いること、即ち断面 1 mm \times 1 mm の結晶を matrix にして読み出すこと、言い換えれば 16 mm \times 16 mm の結晶を細分して読み出すことであるが、この場合の利点と欠点がある。主な欠点は製造上の困難、ひいては結晶が高価になることであるが、利点は高い granularity の為に比較的容易に intrinsic な位置分解能 (1mm \times 1mm) に近い位置分解能が得られる点である。然し。間に空気層が入ることによって全反射が保障されるのでなければその特徴は生かない。今回製作過程で強く圧迫することによって光学的な密着は生じても、普通に積み上げれば全反射が保障されることが分かった事は非常に良かった。これによって、細かい結晶では特に重要な間にものを挟む事による検出効率のロスは避けられることができる。また、積み上げ作業も容易である。更に予想通り結晶の軸に対して大きい角度で放出された光子

は隣の結晶に逃げるが、結局 WLS に到達することは無く、クロストークを起こさない事がいろいろな実験事実をシミュレーションと比較することで分かった。例えば5章で一本の結晶の中心にガンマ線が入射したときその周りの結晶も光る現象は、中心の結晶でコンプトン散乱を起こしたガンマ線が隣の結晶で光電吸収を起こした物として説明できることがEGSを用いて判った。これは放射光子によるクロストークの少ないことを示している。

今回用いたガンマ線束は、ビームの太さは半値幅約 1.8 mm (RMS 0.78mm) で、勿論 yield は一定であり、種々の測定に大変便利である。そのため他の測定にも使用して効果を確かめている。既に GSO 結晶を用いた読み出しの測定に用いた他、今後 DOI の測定などに使えると思われる [21]。

今回用いた PSPM Hamamatsu 6568MODIII は光電面の量子効率が非常に高い上に single 光電子ピークが綺麗に観測できる feature を持っている。そのため高電圧、プリーダーなどに気をつけて linearity に注意を払えば、今回のように光電子数の小さい実験を行って光電子数を測定するには大変適している。

本研究に於ける集光能率の向上により、WLS を読み出しに用いたシンチレータ結晶の読み出しについては実用の段階に入ったと考えられる。図 6.1 に実際にこれを動物 PET に用いたときの考えられるその模式図を掲げる

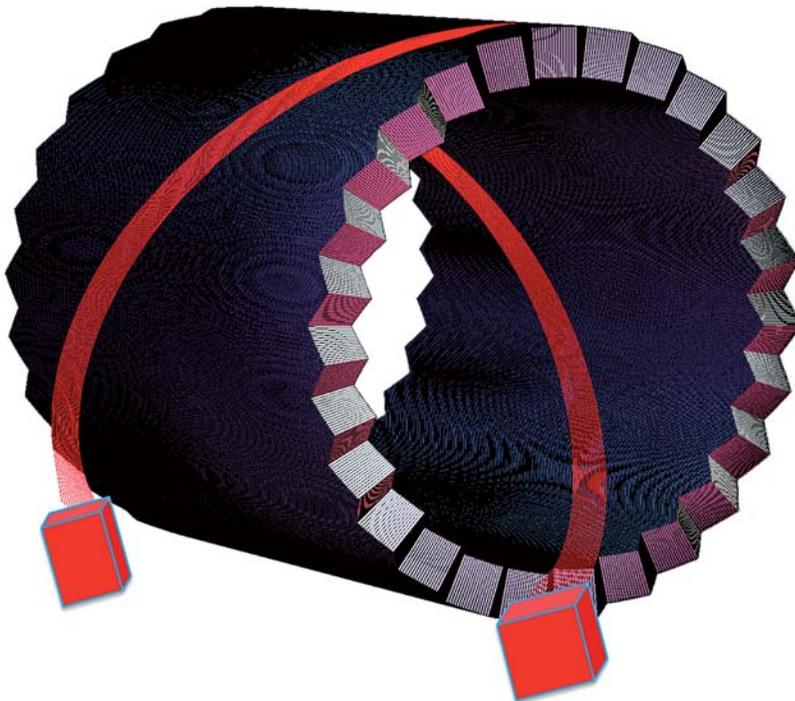


図 6.1 本研究に基づいて製作可能となる動物 PET の例。

このPETは内径約20 cm、軸方向の長さは23 cmある。用いた1 mm × 1 mm × 20 mmのシンチレータ結晶の数は135,680本であるが、これを864本のWLSで読み出している。これに必要な、この実験でも用いたPSPM、6568MODIIIの数は54本にすぎない。図には864本のWLSの内、内側、外側各々16本ずつのものを赤線で記入してある。16本のWLSの先には1個のPSPMがつけられている。直径1 mmのWLSは可塑性があるので、これにPSPMをつけるには何ら問題はない。我々の用いたWLS、Kuraray Y-11は減衰長は3.5 m以上であるため、400 mm程度のWLSの長さからくる影響は殆ど問題にならない。本モデルにおいては読み出しは費用の節約の為に54本のPSPMで行っているが、仮にWLSの両端にPSPMをつけて読み出すことにすれば、集光能率は2倍近くに向上させることが出来る。

シンチレータ結晶として、本研究でも用いたLYSO(Ce)を用いるとすると、検出効率の点から結晶の長さは20 mm程度が必要になり、視野領域の端における位置分解能の劣化の問題が生じてくる。しかし、我々は1個の結晶について両端での光(電)子数をはかっており、この比からDOI (Depth of Interaction) を求めることが出来る。我々はDOIの測定はまだ直接行っていないが、Du et al.の研究 [15]によれば、WLSを用いた1 mm × 1 mm × 20 mm LYSO結晶の読み出しに於いて約6.7 mmと報告されており、我々の場合にもほぼ同等の分解能が得られるものと考えられる。

謝 辞

本研究の遂行に関し、絶え間無い援助と激励を戴いた外山政文教授に篤く感謝致します。本研究は主に日本私立学校振興・共済事業団学術研究計画及び京都産業大学先端科学技術研究所の研究資金によって行われました。

参考文献

- [1] R. Laforest, D. Longford, S. Siegel, D. F. Newport, J. Yap, "Performance Evaluation of the microPET FOCUS-F120," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 54, pp. 42-49, Feb. 2007.
- [2] A. Nassalski, M. Kapusta, T. Batsch, D. Wolski, D. Möckel, W. Enghaedt and M. Moszyński, "Comparative Study of Scintillators for PET/CT Detectors," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 54, pp. 3-10, Feb. 2007.
- [3] C. M. Pepin, P. Bérard, A. L. Perrot, C. Pépin, D. Houde, R. Lecomte, C. L. Melcher, and H. Dautet, "Properties of LYSO and Recent LSO Scintillators for Phoswich PET Detectors," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 51, pp. 789-795, Jun. 2004.
- [4] P. Bruyndonckx, S. Léonard, C. Lemaitre, S. Tavernier, Y. Wu, and Crystal Clear Collaboration, "Performance Study of a PET Detector Module Based on a Continuous Scintillator," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, pp. 2356-2542, Oct. 2006.
- [5] A. Saoudi, C. M. Pepin, F. Dion, M. Bentourkia, R. Lecomte, M. Andreaco, M. Casey, R. Nutt, H. Dautet,

- "Investigation of Depth-of-interaction by Pulse Shape Discrimination in Multicrystal Detectors Read Out by Avalanche Photodiodes," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 46, pp. 462-467, Jun. 1997.
- [6] L. Eriksson, C. L. Melcher, M. Eriksson, R. Grazioso, M. Aykac, "Design Considerations of Phoswich Detectors for High Resolution Positron Emission Tomography," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, pp. 182-188, Feb. 2009.
- [7] S. Salvador, D. Huss, D. Brasse, "Design of a High Performances Small Animal PET System With Axial Oriented Crystals and DOI Capability," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, pp. 17-23, Feb. 2009.
- [8] T. Tsuda, H. Murayama, K. Kitamura, N. Inadama, T. Yamaya, E. Yoshida, F. Nishikido, M. Hamamoto, H. Kawai, Y. Ono, "Performance Evaluation of a Four-Layer LSO Detector for a Small Animal DOI PET Scanner: jPET-RD," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 53, pp. 35-39, Feb. 2006.
- [9] J. Seidel, J. J. Vaquero, S. Siegel, W.R. Gandler, M. V. Green, "Depth Identification Accuracy of a Three Layer Phoswich PET Detector Module," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 46, pp. 485-490, Jun. 1999.
- [10] W. W. Moses, S. E. Derenzo, C. L. Melcher, R. A. Manente, "A Room Temperature LSO/PIN Photodiode PET Detector Module That Measures Depth of Interaction," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 42, pp. 1085-1089, Aug. 1995.
- [11] K. C. Burr, A. Ivan, D. E. Castleberry, J. W. LeBlanc, K. S. Shah, R. Farrell, "Evaluation of a Prototype Small-Animal PET Detector With Depth-of-Interaction Encoding," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 51, pp. 1791-1798, Aug. 2004.
- [12] A. Simon, L. Balkay, G. Kalinka, A. Kerek, D. Novák, A. Sipos, J. Végh, L. Trón, and J. Molnár, "High spatial resolution measurement of depth-of-interaction of a PET LSO crystal," *Nucl. Instr. and Meth. A* 546, pp. 33-36, 2005.
- [13] P. A. Dokhale, R. W. Silverman, K. S. Shah, R. Grazioso, R. Farrell, J. Glodo, M. A. McClish, G. Entine, V. H. Tran, and S. R. Cherry, "Performance measurements of a depth-encoding PET detector module based on position-sensitive avalanche photodiode read-out," *Phys. Med. Biol.*, 49, pp. 4293-4304, 2004.
- [14] Y. Yang, P. A. Dokhale, R. W. Silverman, K. S. Shah, M. A. McClish, R. Farrell, G. Entine, and S. R. Cherry, "Depth of interaction resolution measurements for a high resolution PET detector using position sensitive avalanche photodiodes," *Phys. Med. Biol.*, 51, pp. 2131-2142, 2006.
- [15] H. Du, Y. Yang and S. Cherry "Comparison of four depth-encoding PET detector modules with wavelength shifting (WLS) and optical fiber read-out" *Phys. Med. Biol.*, 53, pp. 1829-1842, 2008.
- [16] 取り寄せ中 .
- [17] F. Takeutchi, S. Aogaki, "Read-out of scintillator crystal matrix using wavelength shifter," in *Proc. 8th Intern. Conference on Inorganic Scintillators and Their Applications, SCINT2005*, 2006, pp. 298-302.
- [18] R. Burn, Available: <http://root.cern.ch/>
- [19] A. Gorin, S. Horikawa, K. Kuroda, I. Manuilov, K. Okada, A. Ryazantsev, A. Siderov and F. Takeutchi "High resolution scintillating-fibre hodoscope and its readout using peak-sensing algorithm," *Nucl. Instr. Meth., A* 566, pp. 500-515, 2006
- [20] C. S. Levin, and E. J. Hoffman, "Calculation of positron range and its effect on the fundamental limit of positron emission tomography system spatial resolution," *Phys. Med. Biol.*, 44, pp. 781-799, 1999.
- [21] S. Aogaki, M. Kobayashi, S. Sugimoto, F. Takeutchi and Y. Tamagawa "Measurement of 0.511 MeV γ - rays with a long thin strip of Gd₂SiO₅:Ce³⁺ scintillator," to be submitted to *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*.