

Development of a wavelength-shifting fiber gamma camera

A. J. Soares^{1,2}, I. Cullum³, D. J. Miller², G. J. Royle¹, R. D. Speller¹

¹Dept. Medical Physics and Bioengineering, University College London

²Dept. Physics and Astronomy, University College London

³Institute of Nuclear Medicine, Middlesex Hospital, University College London

Abstract: 波長変換ファイバー(WSF)ガンマカメラを建設しテストした。空間分解能 3.5 – 4 mm (FWHM)を達成した。ここで現代のアンガーカメラの分解能に匹敵する。2個の CsI(Na)結晶でテストし、どちらも予想よりも低い出力を示した。それ故に、不十分なエネルギー分解能 FWHM23%を得た。シミュレーション結果は空間分解能 3 mm よりも良いと予測する、もし WSF 信号が実験で得られたのより3倍高ければ。このゴールを達成する方法を議論する。

1. Introduction: アンガーカメラは40年にわたって、標準の核医学用p検査における単一光子、放射性同位体の画像化のための装置になった。140 keV ガンマ線(^{99m}Tcからの)のための最も適切な性能特徴の中では固有の空間分解能 3 – 3.5 mm FWHM とエネルギー分解能 10% FWHM である。それらのかさばってそして重たい設計のため、しばしばカメラを置くことが難しい、最も画像の射影が有利に得られるために。そのうえ、これらは端の約 5cm で不感ゾーンをもつ、これはいくつかの応用で位置補正を傷つける、特に、臓器が小さい時、例えば、シンチマンモグラフィで。

我々は小型ガンマカメラを開発した。シンチレーション結晶でガンマ線の相互作用した位置が結晶に組み合わせた波長変換ファイバー(WSF)の内部光子トラップのプロファイルの測定によって得られる^[1,2]。我々がしたことは小型ガンマカメラを建設したことで、アンガーカメラの性能に最小まで同じ性能をもっている。これは検出ヘッドのサイズに近い次元のアクティブ・エリアをもつ。このデザインもサイズの選択と特有のアプリケーションにふさわしいカメラの形状の適応性を提供する。先行研究[1]で我々はそれぞれのファイバーのトラップされた光量の評価し、そして結果は WSF ガンマカメラのコンセプトの実行可能性を確認した。140 keV ガンマ線の相互作用(10 – 15 photons)のそれぞれのファイバーでトラップされた小さい光量は無視する。この示した仕事で、我々は WSF ガンマカメラ試作機の構造と性能評価を記述したい。性能は空間分解能、エネルギー分解能、検出効率そして位置線形成で記述される。また、さらなる性能向上を予期するために、実験の結果で得られたものを基にモンテカルロシミュレーションの研究を提供する。

[1] A. J. Soares, I. Cullum, D. J. Miller, G. J. Royle, R. D. Speller "Development of a small gamma camera using wavelength-shifting fibres coupled to inorganic scintillation crystals for imaging 140 keV gamma rays," IEEE Trans. Nucl. Sei., NS-34(1), 1999 pp. 23-25 .

[2] W. Worstell, O. Johnson, H. Kudrolli and V. Zavarzin, "First Results with HighResolution PET Detector Modules using Wavelengthshifting Fibers", IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, November 915, Albuquerque, New Mexico, USA, 1997.

2. Test prototype: 2個の異なる 5 inch x 5 inch の CsI(Na)結晶を使用した^[3]。これらは厚さがそれぞれ 3 と 5 mm である、良い光の局在化を提供する、阻止能は NaI(Tl)で 140 keV ガンマ線の 8 mm と類似して 5 mm (アンガーカメラは普通 140 keV のために

NaI(Tl)結晶を9 mm 持つ)。

図1にプロトタイプ of 図式的なダイアグラムを示す。青からミドリに WSF の2つのリボンシリコン光学合成(樹脂)で CsI(Na)板の反対側に組み合わせられる。ファイバーリボンは直交に設置する、それぞれ他が2つの次元を位置情報を提供するために。全測定のために、WSF 層の組み合わせたガンマ線の入り口表面(トップ表面)を組織化する、x 座標は(WSF-X)と下の層に y 座標(WSF-Y)。次に結晶内でガンマ線の相互作用、光は等方的に放射する。その CsI(Na)結晶の発光ピークは 420 nm である。この光のゆらぎはファイバーによって吸収(420 nm - 青にでの吸収ピーク)され、そしてより長い波長で(500 nm - 緑で発光ピーク)等方的に放射することによって従われる。緑光子はファイバー内部にトラップされることができ、ファイバー軸と再発光の方向の間の角度に依存して。このファイバー(Bicron BCF-91A^[4])はダブルクラッドで直径 1mm の円型断面で 5.6%のトラッピング効率である。結晶表面全体を覆うために、128本のファイバーをそれぞれの結晶側面に組み合わせた。WSF 信号はマルチアノード PMT(サブセクション A を見よ)によって読み出される。そして、ガンマ線の相互作用した位置は重心計算によって評価される。エネルギー信号は 2 x 2 アレイのびったりとした四角形の PMT (Philips X3392)によって得られる、図に示すが、WSF の層の下は 5 mm 厚のパーペックス(透明アクリル樹脂)板と4つのエネルギー PMT(E-PMT)を組み合わせ、そして反対側に組み合わせる。どちらの組み合わせもシリコン光学化合物で組み合わせている。E-PMT は-1000 V で 2.5×10^5 の増幅率に相当するために制御した、製造業者のデータシートから典型的な増幅率曲線によって^[7]。

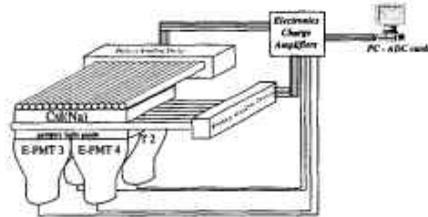


図1. 製造とテストした WSF ガンマカメラ試作機の図式

[3] The CsI(Na) crystals were manufactured by Hilger Crystals, Westwood, Margate, Kent CT9 4JL, United Kingdom.

[4] The wavelengthshifting fibres were manufactured by Bicron, 12345 Kinsman Rd., Newbury, Ohio 440659577, USA.

[7] The X3392 photomultipliers (E-PMTs) used were manufactured by Photonis imaging sensors, France.

A.WSF readout sensors: 我々は 2 個の浜松^[5] R5900-M16 マルチアノード PMT(MA-PMT)のピクセル間の応答一様性を低光量レベルで評価した。R5900-M16 は外形 $28 \times 28 \text{ mm}^2$ と有効入射窓 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ を持つ。アノードは 4×4 ピクセルの四角配列に組み立てられていて、それぞれ $4.5 \times 4.5 \text{ mm}^2$ の面積と 0.5 mm の内部ピクセルの間隔を開けている。ダイノードの構造は12段階メタルチャンネルシステムで、これは高ゲインと低クロストークを与える。プロトタイプで使用している2つの PMT は-1000V のとても安定状態において制御されて、ゲインは約 10^7 をもたらし、これはペダスタルと信号の光電ピークをととも良く区別する結果をもたらす。評価結果は別件^[6]で提供している、そしてこれらの MA-PMT はこのアプリケーションで WLS の読出しが実現可能であることを示す、バイアルカリのカソードは 500nm では 12%と低量子効率にもかかわらず。これらはどちらも良い信号電子分解能

と1%未満の内部ピクセルのクロストークを持つ。応答一様性として、我々は特にダイノードに収集された平均光電子数に注目した(興味を持つ)それぞれのピクセルでこれらはピクセルの中心に置かれた $3 \times 3 \text{ mm}^2$ の領域で、ここで応答の変化はどちらも10%未満であることがわかった。異なったピクセル間で、我々は1個のPMT(x軸で使用する)の5%と他のPMT(y)で30%の変化がわかった。ゲインの非一様性はゲイン増幅の変化で補正される。2個のR5900-M16を使って、16本のファイバーをそれぞれの方向をそれぞれのPMTへ接続することができる。または32本、もしピクセル当たり2本のファイバーの組み合わせたなら、これはそれぞれのピクセルの大面积のために簡単に可能である。この理由のため、結晶の入射エリアを覆う全256本のファイバーの、64本のファイバーのサブセットは特に30cmの長さをひとつにカットされ、両端は以下と同様な製作で研磨された。それぞれのファイバーの端で読み出しているから、他の端はアルミ蒸着(aluminised)してMA-PMTで収集光量を向上している。図2はプロトタイプのエ-PMTとシンチ結晶、そしてファイバーの位置の関係を示す。

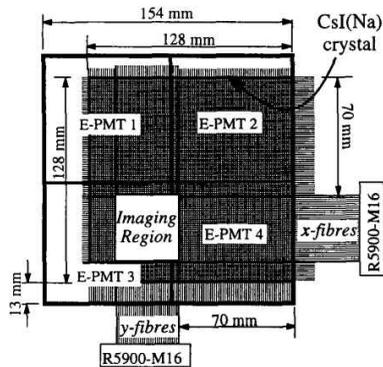


図2: セットアップの上面の図形。これはEPMTとシンチ結晶とファイバーの位置の関係を示す。

[5] The R5900-M16 were manufactured by Hamamatsu Photonics K.K., Electron Tube Center, 314-5, Shimokanzo, Toyooka-village, Iwata-gun, Shizuokaken, 438-01, Japan.

[6] A. J. Soares, I. Cullum, D. J. Miller, G. J. Royle, R. D. Speller "Photon counting with the Hamamatsu H6568 multi-anode photomultiplier," presented at the Position Sensitive Detectors conference, London, September 1999.

B. Data acquisition system: 完全なデータ収集システムは故意に設計された、そしてこの仕事のために建設した。MA-PMTアノードからの信号は個別に 5.6μ シェイピング時間で電荷増幅され、可変増幅直線アンプリファイアによって従う。27個のアンプリファイアのチャンネル(13はWSF-Xファイバーのため、14はWSF-Yファイバーのため)がある。E-PMTからの信号は同様に4つのチャンネルで増幅される。全ての増幅された信号は2つの16チャンネルADCでデジタル化される。ADCはボードはPCIバスを経由してPCに接続される。4つの増幅エネルギー信号は加算され、標準の全エネルギー信号を得るために演算増幅(ハードウェアエネルギー和)を基に加算回路で、これも最後のADCチャンネルでデジタル化される。さらに、加算された信号はADCのトリガー生成のためにディスクリミネータに接続される。KmaxNT^[8]データ収集ソフトウェアはADCの読み第sに使用された、そして画像表示とデータ記録のために。

[8] KmaxNT is supplied by Sparrow Cooperation, USA.

3. Methods: 特に言及しない限り、検出器の性能の評価は ^{57}Co のガンマ線(主に 122 keV)のコリメートされたビームを使用して実行された。ガンマ線のコリメートのために、鉛ブロック(13 mm 厚と直径 1 mm の穴)を使用した。システムの2つのタイプをテストして比較した。1つめは、単一の WSF にそれぞれ MA-PMT ピクセルを組み合わせた。見ている画像領域は $13 \times 14 \text{ mm}^2$ である。2つめは2つの WSF はそれぞれの MA-PMT ピクセルに組み合わせられた。画像領域は $26 \times 28 \text{ mm}^2$ である。このレイアウトは読出しチャンネルの数をカットして減らすことが、むしろ好まれるだろう。また、これ(上記)を言及すると、2つの結晶は厚さが異なる(3 mm と 5 mm)ものを使ってテストし比較した。

A. Number of photo-electrons per WSF: ガンマ線線源の位置が与えられたときの WLSF の信号を測定するために、MA-PMT で生成された光電子数を計算した。ガンマ線が相互作用した位置の近くのファイバーのパルスハイトスペクトラムを観測して、光量がとても低いと結論づけた。したがって、光電子数の生成はポアソン状態であると仮定して、平均光電子数 μ はペDESTAL をゼロ N_{zero} としてカウントすることによって計算することができる。 $\mu = -\ln(N_{\text{zero}} \div N_{\text{total}})$ から平均を得た。ここで N_{total} はエネルギーピーク周りの中心を占めた窓で与えられた全トリガー数である。

図3は WSF-X ファイバー(8番目)と WSF-Y ファイバー(9番目)のパルスハイトスペクトラムを示す、これらの近くでガンマ線が相互作用している(1 mm 以内)。この場合、単一のファイバーは MA-PMT のそれぞれのピクセルに組み合わせられている。ペDESTAL と単一光電子ピークは良い区別で観測されることができる。MA-PMT は x ファイバー層が y ファイバーのその読出しよりも良い単一電子分解能をもって読み出す。

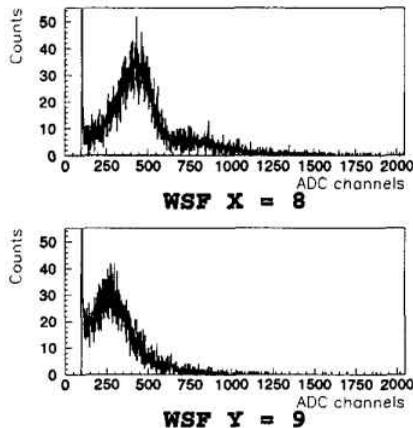


図3. WSF-X ファイバーと WSF-Y ファイバーのパルスハイト。平均光電子数は WSF-X は 0.5 と WSF-Y は 0.4 である。

B. Energy response: エネルギー信号の取得の2つの異なった方法を比較する。まず、4個の E-PMT からデジタル化された信号は加算され、そしてパルスハイト分布に一致しているものを記録する。ファードウェアエネルギー和のパルスハイト分布と比較し、とてもよく似た情報がわかった(同じ FWHM 122 keV のピーク)。エネルギーの窓は 122 keV 周りを選択した、欲しくないトリガーイベントを処分するために、**図 4** はコリメートされたガンマ線ビームのエネルギーパルスハイト分布を示す。貧困なエネルギー分解能 23%FWHM が得られた、というもセクション 4A で詳しく説明する。

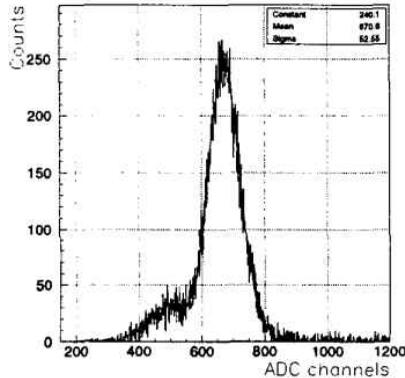


図4. ^{57}Co のガンマ線のエネルギースペクトラム。コリメートされたガンマ線は**図 2**で示す領域の中心の上に置かれた。

C. Images: ある(選択されたエネルギー窓内の)イベントの x と y 座標は両方向の WSF 信号の重心の計算よりわかる、式(1)で示すようにして、ここで X_i と Y_i は i 番目のファイバーのそれぞれの方向の信号である。

$$x = \frac{\sum_{i=1}^m i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^m X_i}; y = \frac{\sum_{i=1}^m i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^m Y_i} \quad (1)$$

それぞれの MA-PMT ピクセルに組み合わせられた単一 WSF の場合、インデックス i は 1 から 14 の連続した値をとり、 y は 1 から 13 である。2つのファイバーの場合 x については i は 1 から 25 の偶数だけと、 y については 1-27 の偶数、それぞれの画像ピクセルは今 2 mm 幅であるから。

4. Result:A. The energy signal:

1) Energy resolution: WSF をもつ試作機の組立の前に、どちらの CsI(Na) 結晶のエネルギー応答はパースペックス(アクリル)板とシリコン光学合成材で組み合わせられて直接測定された、4 個の E-PMT は**図1**の板の反対側に組み合わせられている。結晶の他の面のすべては覆っていない。コリメートされたガンマ線ビームが E-PMT 2 と EPMT4 の領域の中心の上に置かれた時 (**図 2** を見よ)、最も高い信号が観測され、両方の結晶の対応するエネルギー分解能 19% FWHM である。この値は NaI(Tl) 結晶(10%)で得られるエネルギー分解能と比較してとても高い。シンチレータの発光量の表^[9]によると、CsI(Na)と NaI(Tl)は同じような発光量とほぼ特有の発光スペクトラムをもつべきだが、使用した CsI(Na)結晶は貧困な光量を持っていることを示す。ファイバーの導入の後、エネルギー信号は上記の結果の約 60%こ

ばし、そのあとエネルギー分解能 FWHM 23%に悪くなる。WSFを導入した時のこの相対的に小さいエネルギー信号の減少は結果を奨励する。明るい結晶で、アンガーカメラは 10%のエネルギー分解能を達成している、したがって、13 - 14%の総合的な値が WLS を導入した後に達成できることが期待できる。

[9] G. F. Knoll, "Radiation detection and measurement", 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1988.

2) Energy uniformity: エネルギー信号の一様性も評価し、図 5 に結果を示す。3 mm 厚の結晶で。このポイントは最も高い信号に対応したところを示し、E-PMT の中央領域で最も低く観測された、E-PMT の端または結晶の端で。ポイントのピーク位置は最も高い差が示すのは 30%である。

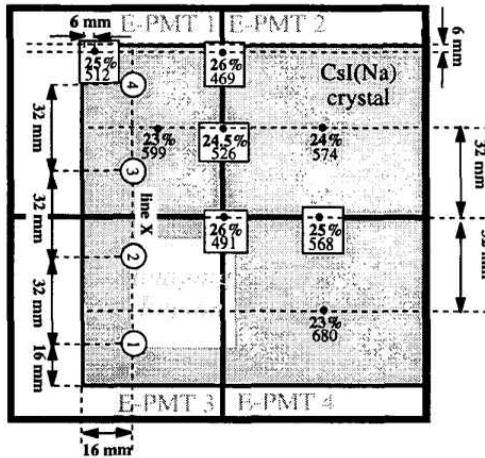


図5. そのカメラの数を交差におけるエネルギー一様性マップ。太い値はエネルギー分解能に対応し、これらの下の値は任意単位でのピーク位置に対応している。

B. Imaging performance: 試作機の画像化の振る舞いを4つの設定のために評価して、それは、結晶の厚さに依存して(3 mmと 5 mm)、そしてサンプリングピッチ(1 mm または 2 mm)、例えば、1 または 2 本のファイバーがそれぞれの MA-PMT ピクセルに組み合わせられるかどうか。以下の結果は 3 mm 厚の CsI(Na)結晶と 1 mm サンプリングピッチを示す。ファイバーは x 方向のために WSF-X1 から WSF-X13 までラベルされて、そして y 方向のために WSF-Y1 から WSF-Y14 とラベルされた。他の場合の結果は比較のために表 1 に示す。

1) Spatial resolution: 図 6 は ^{57}Co からのコリメートされたガンマ線で得られた画像を示す。これはエネルギー窓内の 35,000 イベントである。

最も高い強度のピクセル(図 7)で交わったプロファイルの解析は x と y 方向の両方に FWHM 4 mm の空間分解能を示す。プロファイルの平均値は x と y それぞれ、8.3 と 8.7 である。ファイバーが直接コリメータの穴の下に置かれるために、平均光電子数は 0.5 - 0.6 を観測した。13 個の WSF-X ファイバーの全光電子数は 2.2 で 14 個の WSF-Y ファイバーの

全光電子数は 2.8 であった。重心計算のためにとても低い統計に一致する。したがって空間分解能は WSF 平面以上の光の広がりによってほぼ決定される。これはほかに結晶の厚さで。

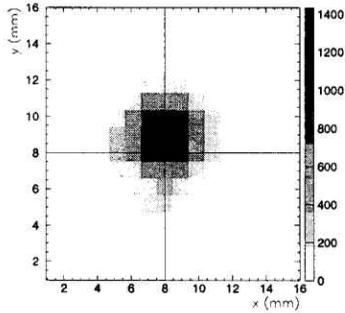


図6. ^{57}Co からのコリメートされたガンマ線ビームの画像。コリメータの穴は WSF-X8 と WSF-Y9 の上に近似的に置いた。

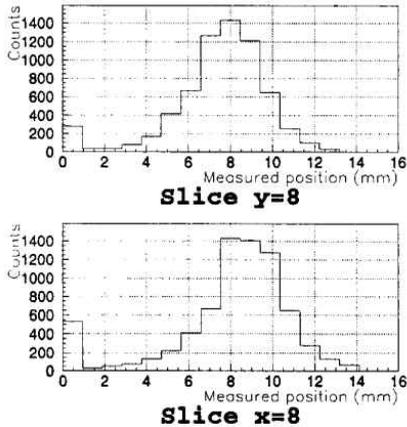


図7. 図6での1次元へのそれぞれの射影。空間分解能 4 mm FWHM が x と y 方向でどちらも得られた。

2) Position linearity: 両方の方向におけるデバイスの位置線形成を研究するために、鉛コリメータは2つのラインに並行に(x と y のどちらか)連続した位置に位置づけられた。その位置は 1 mm ごとに区別されて、そしてコリメータの穴の位置出し精度は ± 0.5 mm のオーダーで見積もられる。プロファイル分布の平均値は図8に真のコリメータ位置に対してプロットされる。位置再構成の線形性をそれぞれの場合示している。

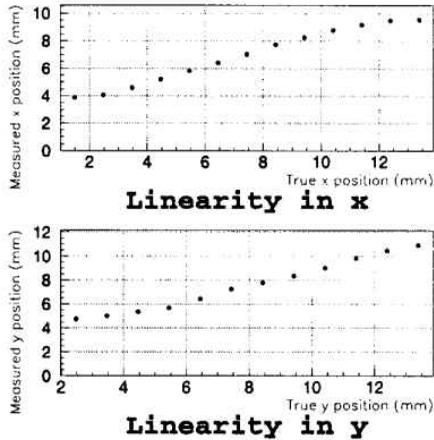


図8. 2つのラインの線形性プロット:xとyに平行な。

C. Imaging efficiency: WSF でのとても低い光レベルのために、いくつかの場合がある、それはエネルギー窓内で落としたトリガーイベントのために、WSF-X、WSF-Y もしくはどちらもゼロ p.e.がある。これらの場合、妥当な画像化した位置を生成せず、したがって装置の全カウンティング効率を減少する。図8に示す位置を取ると、妥当でないイベントの平均の割合は $7 \pm 1.3\%$ であるとわかった。これは重大な効率の損失を示さない。さらにこの結晶の光量出力は期待より低い、セクション A で説明したとして、そしてより明るい結晶を使うことで画像化に非適切なイベントの確率は相対的に少なくなるだろう。我々はこの効率のパラメータを装置の画像化効率と呼んでいる。

D. Comparison between the 4 configurations: 同様の評価を行った、他の3つの設定について、セクション B で説明した、そして結果を表1にまとめた。空間分解能のための値の範囲は鉛コリメータの設置の差で得られた結果を言及する。ファイバーの違いから光量出力の変化は空間分解能のゆらぎのようなものが原因となる。

5. Monte Carlo Simulation: モンテカルロシミュレーションコードは事前に開発した [1]、PMT が光子カウンティング領域での出力モデルのために、平均光電子数を与えるためにポアソン分布から光電子数をランダムにサンプルする。その後の電荷積分過程はガウス分布によって説明される、この RMS は PMT の単一電子分解能である。それぞれの PMT の平均光電子数を計算することができ、そして使用した MA-PMT の単一光電子の分解能を知っているので、画像化性能と実験への比較をシミュレートすることができる。その比較は図 6 に示すデータを作る。それぞれの PMT の平均光電子数は計算され、シミュレーション・プログラムの入力として使用された。実験データでとても良い画像が得られた (図 6)。そして、前の光電子数は2倍から3倍に増幅され、我々のシミュレーションの入力として使用された。空間分解能は 3.2 mm と 2.8 mm にそれぞれ向上する。光電子数の増加は現実的に CsI(Na)や CsI(Tl)の明るいサンプルを使用する、またはシリコンベースの MA-PMT (APD:ア

バラシエ・フォト・ダイオードや VLPC:ビジブル・ライト・フォトン・カウンター、これは任意の PMT 光電面と比較して、量子効率 2 か 4 倍高く、550 nm の波長で)を設置しなおしたりすると達成することが出来る。我々はしたがって楽観で、アンガーカメラよりも良い空間分解能が現在の得られる技術で達成することが出来る。

6. Summary and Conclusions: WSF ガンマカメラの試作機を建設し、テストした。その画像化容量は ^{57}Co からのガンマ線で証明された。使用したシンチレーション結晶の出力光量が低いにもかかわらず、空間分解能 3.5 - 4 mm FWHM が達成された、これはアンガーカメラの個別分解能 3.5 mm に比べて。エネルギー分解能は 22 - 23% FWHM が得られた。この貧困な分解能の結果は CsI(Na)サンプルで得られた低い光量出力が原因である。WSF 試作機のエネルギー信号は PMT と結晶を直接組み合わせの得られた信号と比べて 60%であった。このもとで、NaI(Tl)や明るいシンチレーション結晶を使用すれば、エネルギー分解能 14%未満へと向上すると予期する。画像化効率はエネルギー窓内での全カウント数と画像化に使えるカウントとの比として定義され、90%以上良いとわかった。

モンテカルロシミュレーションは WSF 信号が 2 - 3 倍試作機の方がより高ければ、FWHM 3.2 mm と 2.8 mm の空間分解能へ向上すると予期する。これは明るいシンチレーションのサンプル (NaI(Tl)とか)を使用する、もしくはシリコンベースの APD や VLPC のようなデバイスを使用することによって達成することが出来る。