

# Pr: LuAG vs. WLSF(B-3)

伊藤博士  
千葉大学大学院理学研究科  
2015.12.25

## 概要

波長変換ファイバー(WLSF)を用いたガンマ線検出器システムはシンチレータ結晶の発光波長領域とWLSFの吸収波長領域が一致し、十分な発光量を得られる条件を満たせば組み合わせは自由である。本報告書は古河機械金属株式会社から購入したPr: LuAG結晶はこのシステムを応用して高位置分解能測定が可能かを検証した。

## 1. はじめに

波長変換ファイバーを用いたシステムはガンマ線の検出において、従来のシンチレータ結晶の細分化システムに対して低コストかつ分解能向上の限界へ挑戦できる。波長変換ファイバーは光ファイバーのコアに波長変換材(WLS: Wavelength Shifter)が練りこまれた素材で、ファイバー側面からある波長の光を吸収し、波長を伸ばして再発光する。その後全反射条件を満たす光が両末端へ少ない損失で伝搬される。つまり、波長変換ファイバーは幅の狭い1次元状の光検出器の役割を持つ。

核医学用PET装置の製造費の主は結晶加工費であることから、結晶加工を比較的抑えた設計を提案する。薄い結晶板の両平面に波長変換ファイバーシートを互いに直交する様に貼り付ける。このファイバーがつまり結晶板のどこで相互作用したか読みだす役割を課されているのである。

## 2. セットアップ

中心に $^{22}\text{Na}$ 線源を設置し、リファレンス検出器とターゲット検出器を線源を通る直線状に設置する。 $^{22}\text{Na}$ は陽電子を放出しその後2本のガンマ線を放出する性質をもつ。2つの検出器で同時検出したときのデータを取得する。

Pr: LuAGはサイズ $20 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ である。発光波長領域は $310 \text{ nm}$ であることから、B-3の波長変換ファイバーが適切であると考えた。この結晶からのシンチレーション光は光電子増倍管(PMT): H11934-20で直接読み出す。

直径 $0.2 \text{ mm}$ のWLSF(B-3)を幅 $20 \text{ mm}$ のシート状に製作し、LuAGに貼りつけた。片側読み出し方式で、その末端にはPMT:R9880U-210を取り付けた。このPMTはウルトラバイアルカリの光電面をもち、度波長領域は $350\text{-}500 \text{ nm}$ で、最大40%の量子効率を誇る。小型で有感面積は $6 \text{ mm}$ である。ファイバーシートは1層から4層まで作成し層ごとの収集効率を測定する。

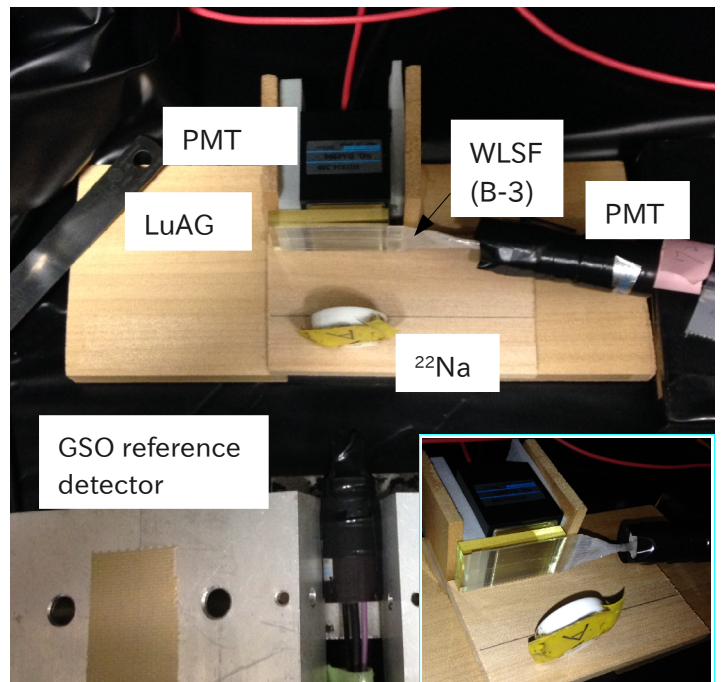


図1. セットアップ

### 3. 結果

リファレンス検出器の ADC 分布を図 2(a)に示す。 $^{22}\text{Na}$  線源のガンマ線スペクトラムの 511keV ピークと 1.27MeV ピークが観測できた。Pr: LuAG を用いたターゲット検出器の ADC 分布を図 2(b)に示す。約 249 p.e.の平均光電子数が得られた。 $^{22}\text{Na}$  の陽電子放出後、対消滅して生成された 2 本ガンマ線のエネルギーは 511 keV であることから、同時に 511 keV 吸収した事象を選択する。シアン色に塗られたヒストグラムはリファレンス検出器で 511 keV $\pm\sigma$  領域を選択したときのヒストグラムである。緑線はペDESTAL位置である。

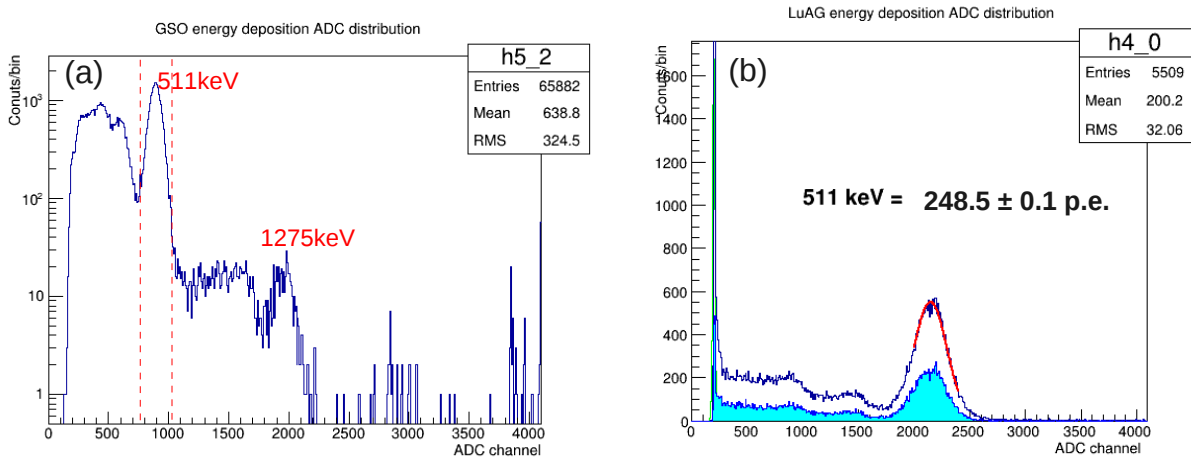


図 2. (a)リファレンス検出器(GSO)の ADC 分布。(b)LuAG 結晶の ADC 分布。

リファレンス検出器とターゲット検出器が同時に 511 keV のガンマ線のエネルギー吸収を観測した事象について、WLSF(B-3)に接続している PMT の ADC 分布を図 3(a)に示す。ペDESTALは130 ch.に存在し、ポアソン分布でフィットした結果、平均光電子数 4.3 p.e.が得られた。ファイバーシートの層について調べると、指数関数的に飽和している様子が確認できた。 $f(x)=p0*(1-\exp(-x/p1))$ でフィットし、 $p0$  が飽和光電子数と定義できる。したがって、**飽和光電子数は  $4.9 \pm 0.1$  p.e.**と評価できた。

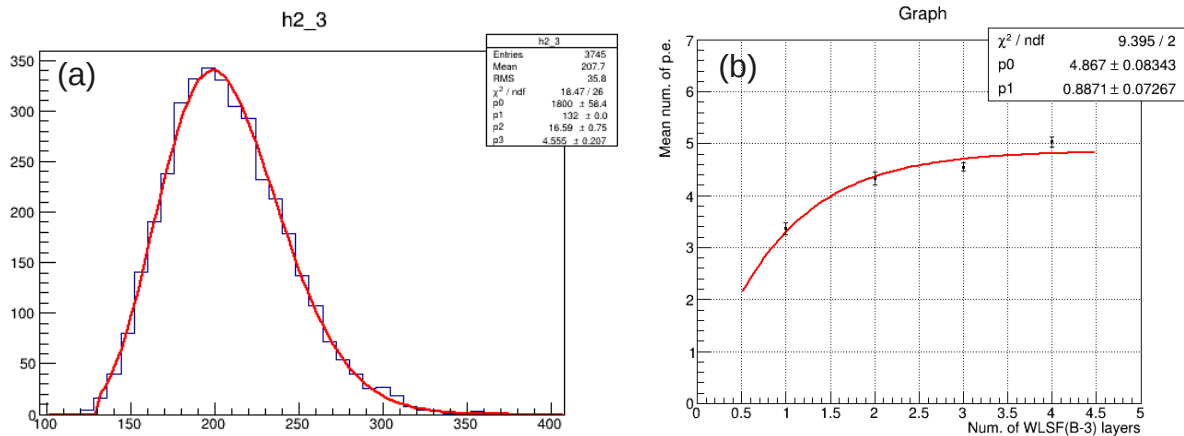


図3. (a)事象選択後の WLSF(B-3)の ADC 分布。(b)ファイバー層における光電子数の関係

#### 4. 考察

この結果から、ファイバーの収集効率を推定する。結晶から放射されたシンチレーション光は片側へは PMT に直接、そして反対側は波長変換ファイバーを経由して PMT で読みだした。直接結晶からのシンチレーション光を PMT で読みだした場合、観測される光電子数  $N_{p.e.}$  は以下で与えられる。

$$N_{p.e.} = \int \frac{N_{ph}(\lambda)}{MeV} \Omega(\lambda) \epsilon_{PMT}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

ここで、 $N_{ph}$  は  $\gamma$  線の相互作用によって発光する単位 MeV 当たりのシンチレーション光光子数、 $\Omega$  は結晶からファイバーへ入射される光子の割合である。LuAG 結晶の屈折率は 1.9 とすると、全反射条件を満たさず側面から漏れる光の割合  $\Omega$  は約 7.49% である。511 keV 当たり 249 p.e. で PMT:H11934-200 の量子効率は波長 300 nm 付近で 40% とする。ここから逆算すると、 $N_{ph}$  は  $2.17 \times 10^4 \text{ MeV}^{-1}$  が得られ、カタログデータに一致する。

波長変換ファイバーを経由した時の光電子数  $N_{p.e.}$  は以下の式で与え得られる。

$$N_{p.e.} = \int \frac{N_{ph}(\lambda)}{MeV} \Omega(\lambda) \epsilon_{core}(\lambda) \epsilon_{trap}(\lambda) \epsilon_{PMT}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

ここで、 $\epsilon_{core}$  は波長変換ファイバーの波長変換効率、 $\epsilon_{trap}$  はファイバーのトラッピング効率でダブルクラッド構造の場合片側で 5.4%、 $\epsilon_{PMT}$  は光電子増倍管の量子効率である。波長が B-3 発光波長領域なので、量子効率が約 35% とする。結果よりファイバー読出しの飽和光電子数は 4.9 p.e. なので、B-3 の LuAG における波長変換効率  $\epsilon_{core}$  は約 31% と導かれた。単純に収集効率でいうと、 $\epsilon_{core} \epsilon_{trap} = 1.67\%$  である(片側読出し)。

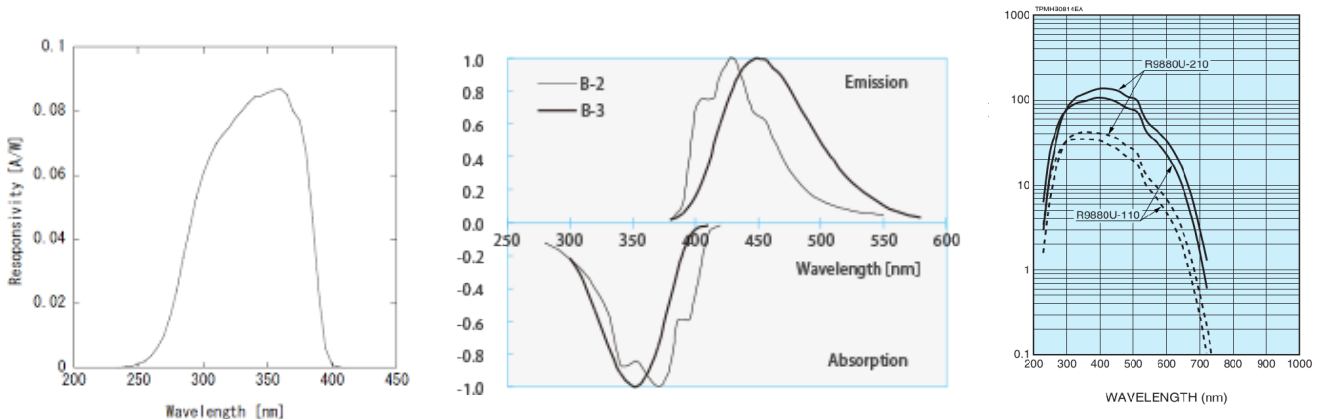


図 4. Pr:LuAG 発光スペクトラム(左)と B-3 吸収・発光スペクトラム(中)、そして PMT 量子効率の波長分布

#### 4. まとめ

波長変換ファイバーによるシステムは LuAG と WLSF(B-3) では十分条件を満たす。光電子数 4.9 p.e. という事は検出効率は約 99.3% である。位置読出しには十分な光量を獲得している。GAGG 結晶と比べ発光量が半分というカタログデータと直接もしくはファイバーを経由したときの光電子数の結果は一致している。

今後の展開は MPPC で読出した場合の応答についてだ。今回の測定と同様な実験をして光電子数はいくつかわかつか? また、MPPC 直接読出しでエネルギーと時間を測定するシステムを構築することが今後の課題だろう。