

## 肺がん原因探索研究のための BGO シンチを用いたスペクトロスコピー実験 I

伊藤博士

### 1. はじめに

我々は福島県沖漁業復興のための即時<sup>90</sup>Sr放射能測定器(リアルタイムストロンチウムカウンター)を開発した。これはチェレンコフ放射に基づいた閾値型検出器で自然界の<sup>40</sup>Kから放射される1.31 MeV以下の低エネルギーのベータ線、<sup>222</sup>Rnなどの $\alpha$ 線、コンプトン散乱電子の運動エネルギーが最大1.31 MeVとなるガンマ線などには感度を持たない。宇宙線ミュオンの事象は装置を覆うよう配置したシンチレーション検出器で除去している。線源を入れていない背景雑音は数百cphの頻度で観測されたが、電気的な雑音だけでは説明できない。リアルタイムストロンチウムカウンターの周りを鉛ブロックで遮蔽すると明らかに雑音頻度が下がった。装置内または外の空気に高エネルギーベータ線またはガンマ線を放出する核種が存在する可能性がある。

### 2. セットアップ

BGO シンチレータを PMT に接続した検出器で空気中のガンマ線エネルギーのスペクトラムを測定する。セットアップを図 1(a, b)に示す。BGO は SAINT-GOBAIN 社製、直径 5 cm、厚さ 5 cm の円柱である。PMT 接続部は間に光学グリスをセルフトリガーでデータ収集するため PMT 熱雑音、宇宙線由来雑音などがデータの質を悪化させる。そのため BGO 検出器の上部と側部 2 つにプラスチックシンチレータを用いた検出器を配置し宇宙線荷電粒子を捉え解析時に除去する。プラスチックシンチレータは 200 mm×100 mm×5 mm のサイズを持ち、BGO 検出器を覆う。床に直置きではなく、厚さ 25 mm の真鍮の上に BGO 検出器を設置した図 1(c)。ベト装置の周りを遮蔽した時のスペクトラムと比較することでシミュレーションとの比較で重要な手がかりになる図 1(d)。

BGO 検出器に使用された PMT は 1800V 供給され、信号はアッテネーションを経由して 2 つに分岐後、一方はディスクリミネータに接続され、他方はディレイを経由して ADC に入力された。ベト装置の PMT はそれぞれ増幅率がおよそ  $2 \times 10^7$  になる電圧が供給されている。これらの PMT の信号は 75-90 ns 遅延されて ADC に入力されている。BGO 検出器から出力されディスクリミネータを経由した論理信号はゲートジェネレータによって幅 1,000 ns の ADC ゲートを波形整形し、データ収集のトリガーを形成した。

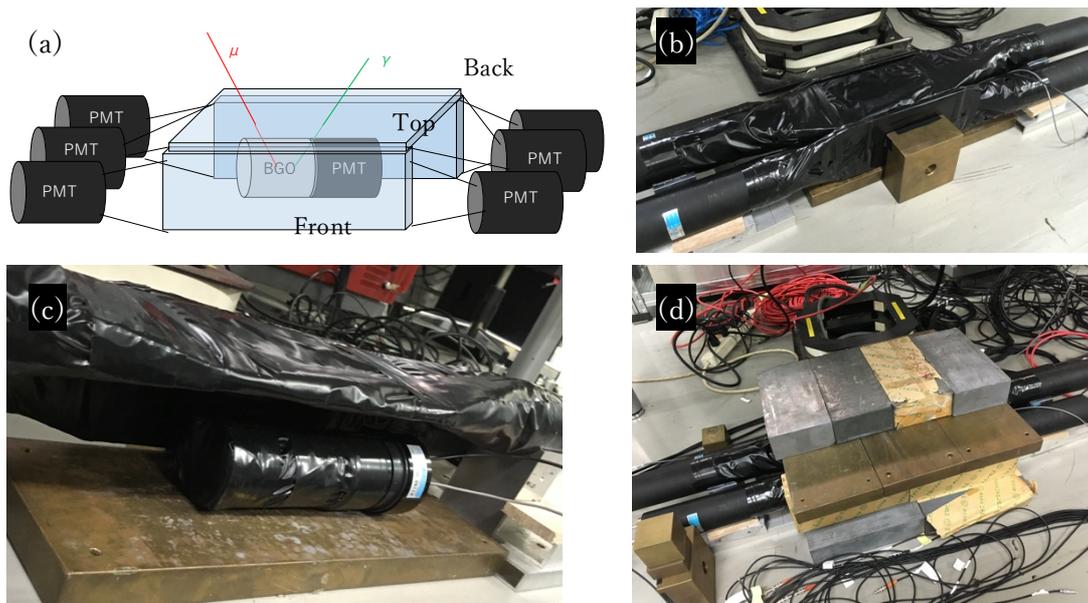


図 1: セットアップ

### 3. 解析と結果

#### 3.1. ベトー条件

ベトー装置に接続された PMT の光電子数分布を図 2 に示す。宇宙線ミュオンがプラスチックに入射した場合平均 50-150 p.e.の光電子数が観測された。ここで、Top, Front, Back の位置関係は図 1(a) に示している。空気中からのガンマ線観測のための宇宙線ミュオン事象除去のためにこれらの VETO の除去閾値は 0.5 p.e.に設定された。

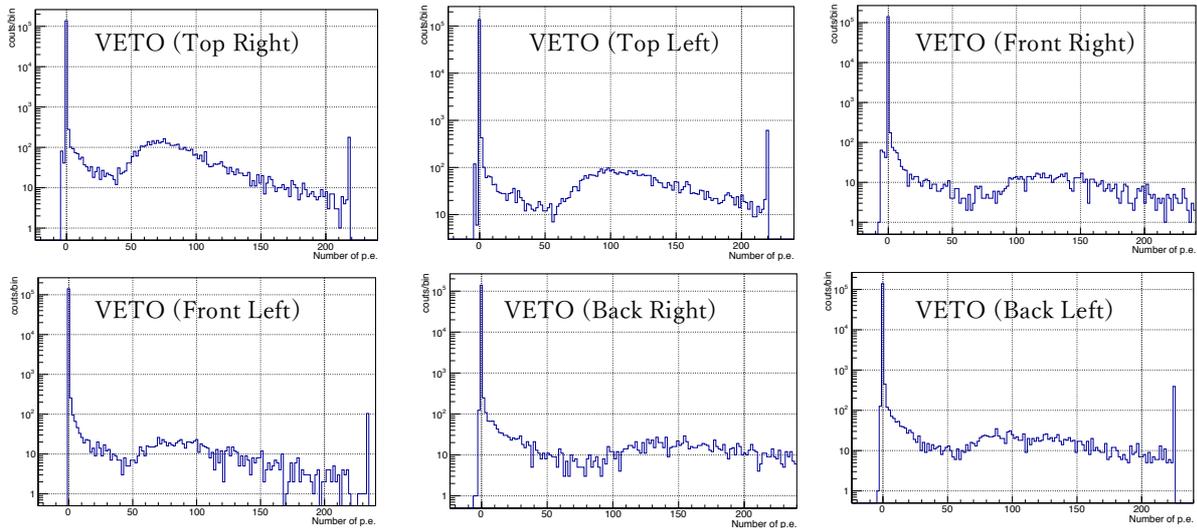


図 2. ベトー装置光電子数分布

#### 3.2. BGO エネルギースペクトラム

BGO 検出器で得られたエネルギー分布を図 3 に示す。図 3 左において、青線はトリガー事象、赤線は宇宙線飛来事象、緑線はトリガー事象から宇宙線飛来事象を引いた事象におけるエネルギー分布を示す。縦軸は Counts keV<sup>-1</sup> sec<sup>-1</sup> を示し、単位時間・単位エネルギーにおける BGO に入射するガンマ線の流入量 (Flux) を意味する。宇宙線が入射した場合、BGO で平均 1 MeV のエネルギーを落とす。この結果から BGO セルフトリガーにおいてはほとんどが熱雑音か環境放射能による影響であることを示唆する。

500-2000 keV にかけて信号が観測され、1000-1150, 1400-1600, 1650-1800 keV にそれぞれピーク構造が観測された。図 3 右では、このスペクトラムは四重ガウスフィットされ、ピーク頂点が決定された。それぞれピークの平均値は 1110-1130, 1450-1550, 1760-1790 keV と推定された。このエネルギーは空気中 <sup>214</sup>Bi の 1120 (15%), 1760 keV (15%) とコンクリート中 <sup>40</sup>K の 1461 keV (11%) と考えられる。1120 keV のピーク高はガウスフィットの結果  $2.43 \times 10^{-2}$  Counts keV<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> が得られ、1760 keV ピーク高は同様に  $5.28 \times 10^{-3}$  Counts keV<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> が得られた。

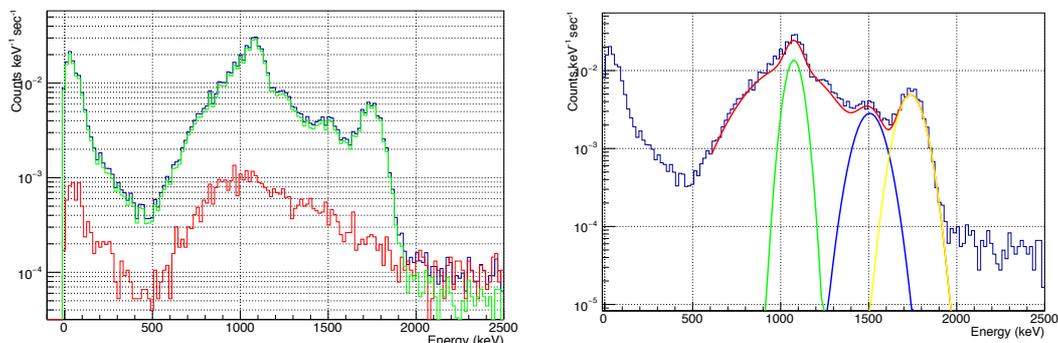


図 3. BGO 検出器におけるエネルギー分布

### 3.3. 鉛遮蔽による効果

図 2(d)のように真鍮と鉛板で BGO 検出器とベトー装置を覆った。この時のエネルギー分布を図 4 左に示す。1.12 MeV ピークは $5.46 \times 10^{-3}$  Counts  $\text{keV}^{-1} \text{s}^{-1}$ 、1.76 MeV ピークは $1.11 \times 10^{-3}$  Counts  $\text{keV}^{-1} \text{s}^{-1}$ に減衰し、約 75%の抑制を意味する。2016 年 12 月 28 日から継続的に遮蔽あり、なしの場合におけるそれぞれのピーク高の時間推移を図 4 右に示す。遮蔽した時間は黄色領域で示している。遮蔽以外においては誤差の範囲内で大きな変動は確認できなかった。

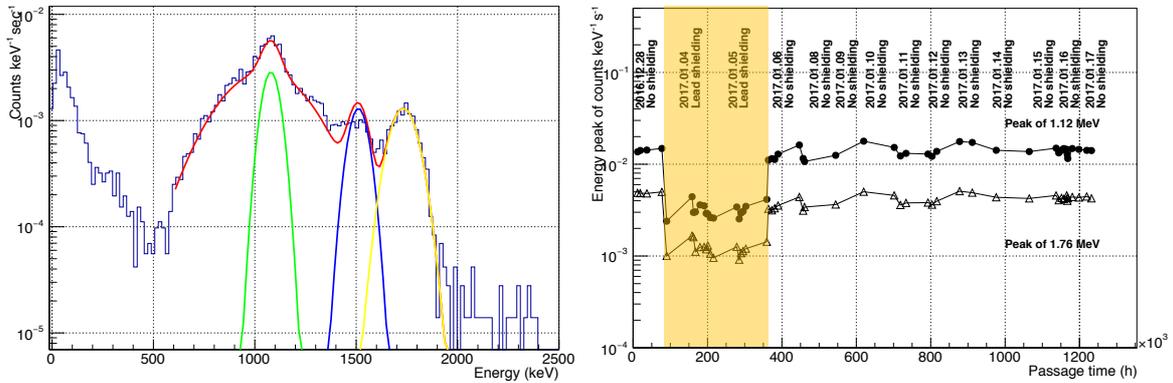


図 4. 遮蔽によるエネルギー分布と時間推移

### 3.4. GEANT4 モンテカルロシミュレーションを用いた放射能推定

<sup>214</sup>Biが放出するガンマ線またはベータ線が BGO に到達して落としたエネルギーを事象ごとに計算した。計算領域は一辺 2 m の立方体で、その底面中央に BGO シンチレータと PMT を配置した。その周りにプラスチックシンチレータのジオメトリを配置しベトーを模した。ベトーの PMT とアクリルライトガイドは簡潔化のため無視した。線源は計算領域に対して一様に乱数を決定した。ただし BGO シンチ内では  $\gamma$   $\beta$  のほとんどのエネルギーを落とし 2MeV あたりにピーク構造を作り現実と一致しなくなるため、線源は BGO の外だけに限られる。また鉛と真鍮を実験セットアップと同じジオメトリを形成して計算した。他に 40K からのガンマ線も同様に空気中一様乱数で発生させた。BGO 検出器のエネルギー分解能 5% ( $\sigma$ ) を考慮してガウス分布の乱数で畳み込みして得られるエネルギーを計算した。

図 5 に BGO シンチで落とすエネルギー分布を示す。赤が遮蔽なしの <sup>214</sup>Bi、マゼンタが遮蔽ありの <sup>214</sup>Bi、緑が遮蔽なしの 40K が一様に存在していることを示す。縦軸は単位エネルギー・単位放射能濃度における流量を示す。遮蔽による 1.12, 1.76 MeV のピーク高の抑制の割合(75%)は実験結果に一致する。

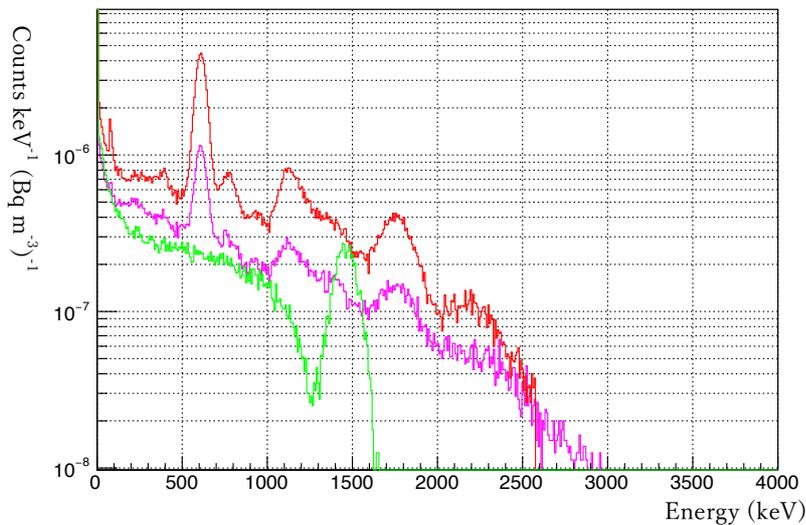


図 5. GEANT4 によるエネルギースペクトラム

シミュレーションで、遮蔽なしにおける 1.12 MeV ピーク高が  $9 \times 10^{-7}$  Counts keV<sup>-1</sup> (Bq m<sup>-3</sup>)<sup>-1</sup> は単位エネルギー・単位体積・単位放射能あたりの流量を示す。つまり実験結果で得られた単位エネルギー・単位時間における流量と比較することで、空气中放射能濃度を推定できることを意味する。実験結果と比較すると研究室内では  $2.7 \times 10^4$  Bq/m<sup>3</sup> 含まれると計算された。

#### 4. 実験結果の解釈と考察

この実験では BGO 検出器で得られたスペクトラムと GEANT4 による計算を比較して放射能濃度を推定した。しかし、遮蔽効果の割合は一致したが絶対値はラドン放射能濃度と一致せず、高い値を見積もった。しかし、現実には 2.7 万 Bq/m<sup>3</sup> のラドンが千葉大に存在していることは考え難い。どこか計算ミスがあるに違いない。まさか、従来のラドン検出器の性能がよくなかった可能性もあるが可能性は低いだろう。

空間放射能濃度を比較するならば、ピーク高ではなく、ガウス分布で得られた面積：つまり流量同士で比較すべき。さらに、遮蔽なし実験では遠方のガンマ線の効果は立体角の影響で半径の 2 乗に反比例するため 2 m あれば無視できると考えてきたが、そこに落とし穴があった可能性がある。空気中で 1-2 MeV のガンマ線を遮蔽するためには数十 m の距離が必要で、空気中に一様に存在している場合は積分されているので遠方も無視できない。本来は同じ空間における流量を比較すべきであった。例えば BGO 検出器を鉛ブロックで覆い、ある体積の空気の部屋を設計する。その状況で GEANT4 の計算結果と比較すべきである。コンクリートに <sup>40</sup>K が含まれているというが、<sup>214</sup>Bi も含まれている可能性がある。正確に言うとうランやラジウムがコンクリートの原料に混ざっているというのだ。そうすると、BGO 検出器の上部だけでなく下部にも遮蔽を実施する必要がある。

従来のラドン検出器は空気中の  $\alpha$  線を放射する放射性核種は <sup>222</sup>Rn だけで、他の各種は個体だから空気中には存在しないと考える設計されている可能性がある。もしそうなら、測定結果は <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Po からの  $\alpha$  線を過剰に計算していることになる。また、空気中で  $\alpha$  線の減衰を考慮に入れていない場合、空間放射能濃度を過少評価してしまう。

#### 5. まとめと今後の課題

本研究では肺がん原因探索を目的にして、BGO を用いたエネルギー spektroskopie で空気中のガンマ線を観測した。<sup>214</sup>Bi が <sup>222</sup>Rn と同等のレベルで空気中に漂っているなら、我々が考えてきた自然被曝線量は過少に見積もられていたことになる。今回実験とモンテカルロシミュレーションを合わせて結果を比較したところ、遮蔽による効果は一致したが絶対値が一致しなかった。

第 1 回の実験は失敗に終わったが、今後、BGO 検出器の周りの環境を改善することで、比較対象との一致の精度を向上することが期待できる。次回の実験は 2 月の中旬に予定される。この実験が成功し得られた結果は肺がんの原因を突き止めるだけでなく、従来のラドン濃度測定に疑惑と新たな計測方法を提示するだろう。