

(LNS Experiment : #2605)

J-PARC 実験のための各種検出器のテスト

谷田聖¹, 林勇治¹, 平岩聡彦¹, 細見健二², 小池武志², Yue Ma², 三森雅弘²,
三輪浩司², 森津学¹, 岡村敦史¹, 大谷友和², 佐藤美沙子², 白鳥昂太郎², 田村裕和²,
山本剛史²

¹ 京都大学大学院理学研究科 (606-8502 京都市左京区北白川追分町)

² 東北大学大学院理学研究科 (980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉)

Test of Detectors to be Used in J-PARC

K. Tanida¹, Y. Hayashi¹, T. Hiraiwa¹, K. Hosomi², T. Koike², Y. Ma²,
M. Mimori², K. Miwa², M. Moritsu¹, A. Okamura¹, T. Otani², M. Sato²,
K. Shirotori², H. Tamura², and T. Yamamoto²

¹Department of Physics, Kyoto University, Kyoto, 606-8502

²Department of Physics, Tohoku University, Sendai, 980-8578

We performed a test experiment in order to see the performance of detectors to be used in J-PARC E03 and E13 experiments. We have tested the following: a) Timing resolution of scintillation counters for time-of-flight (TOF) measurement, b) Photoelectron yield for plastic scintillation counters with wavelength shifting fiber readout, c) Readout system of scintillating fiber using multi-pixel photon counter (MPPC), d) Angle and position dependence of photoelectron yield of an aerogel Cherenkov counter, e) Capability of in-beam γ -ray energy calibration system using triggerable source. The results show the performances are satisfactory for the J-PARC experiments.

§ 1. はじめに

我々は、J-PARC K1.8 ビームラインにおいて、高強度 K^- ビームを用いた Ξ^- 原子の X 線分光実験 (E03 [1]) およびハイパー核 γ 線分光実験 (E13 [2]) を行う予定である。本実験では J-PARC での実験で用いられるカウンターのテストを陽電子ビームを用いて行った。テストした項目としては、

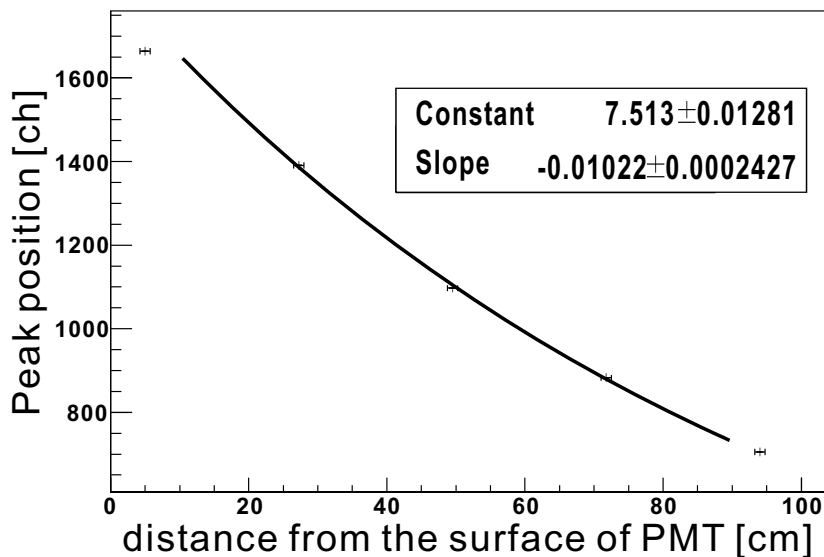
1. 散乱粒子の飛行時間測定のための TOF カウンターの時間分解能。
2. 波長変換ファイバーを用いてプラスチックシンチレーターを読み出したときの光量および粒子の入射位置の分解能。
3. Multi-pixel photon counter (MPPC) を用いたシンチレーションファイバー読み出しシステム
4. 高密度エアロジェルを用いたプロトタイプチェレンコフカウンターの性能の粒子入射位置・角度依存性
5. トリガー可能な線源を用いたインビーム $X(\gamma)$ 線エネルギー較正システムの性能

の 5 つである。これらそれぞれについて以下にテストの内容とその結果について詳細を述べる。

§ 2. 粒子識別用 TOF カウンターに用いるプラスチックシンチレータの時間分解能測定

J-PARC E13 実験では入射ビームである運動量 $1.5 \text{ GeV}/c$ の K^- と散乱粒子である運動量 $1.4 \text{ GeV}/c$ の π^- を識別するために、エアロジェルカウンターと併せてオフライン解析で TOF 情報を用いる。シミュレーションの結果から TOF 分解能が σ で 150 psec とすると、 K^- と π^- は 3σ 程度で分離することができる。そこで下流側に用いる予定であるプラスチックシンチレータ ($1000 \times 30 \times 70 \text{ mm}^3$) の時間分解能テストを行った。

測定は、テストするシンチレータを 2 枚の別の高時間分解能カウンターで挟んで行った。これによって、3 枚のカウンター個々の時間分解能を計算することが可能である。セットアップを動かすことで、陽電子ビームをシンチレーションカウンターの中心および中心から左右に 20 cm , 45 cm 離れた点に当てた場合の 5 回の測定を行い、時間分解能の位置依存性及び減衰長を測定した。その結果、全ての入射位置において σ で時間分解能 $64 \sim 78 \text{ psec}$ が得られ、要求が満たされていることを確認した。また、第 1 図に光電子増倍管からビーム入射位置までの距離と光量の最頻値との関係を表した。これより減衰長が $98 \pm 2 \text{ cm}$ と求められた。

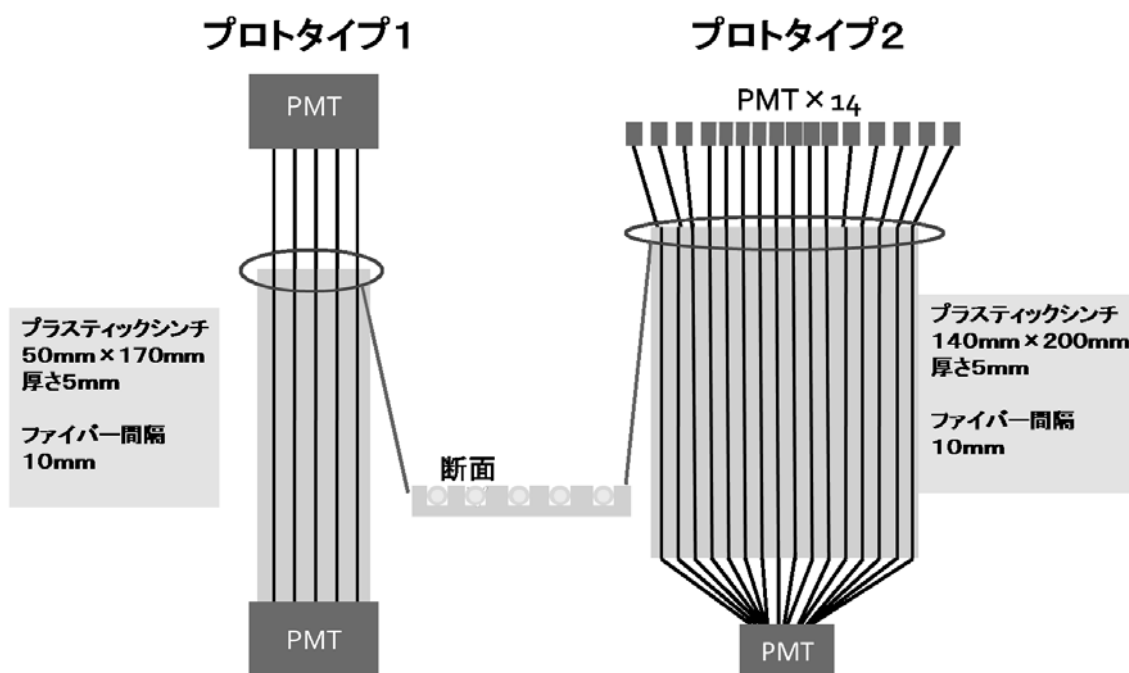


第 1 図 光電子増倍管からビーム入射位置までの距離と光量 (ADC) の最頻値の関係。指数関数でフィットし、減衰長として $98 \pm 2 \text{ cm}$ が得られた。

§ 3. プラスチックシンチレータの波長変換ファイバーを用いた読みだし

E13 実験においては、 $(K^-, \pi^-\gamma)$ イベントの中に K^- の崩壊イベント $K^- \rightarrow \pi^-\pi^0$, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ が深刻なバックグラウンドとして混ざってくる。そこで、これを除去するために、鉛とプラスチックシンチレータを層状に並べた SP0 カウンターを製作している。そのプラスチックシンチレータの読み出しとしてスペースの制限から波長変換ファイバーを用いる予定であるが、その場合の光量および粒子の入射位置の分解能について調べた。

第 2 図に製作した 2 種類のプロトタイプを示す。厚さ 5 mm のプラスチックシンチレータに $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ の溝を作り、その中に波長変換ファイバーとして KURAY Y11 (直径 1 mm) を埋め込んだ。この 2 種



第2図 シンチレーションカウンターの波長変換ファイバー読み出し法をテストするために製作したプロトタイプカウンター。

類のプロトタイプに同時に陽電子ビームを照射することで、以下の4種類の読み出し法を比較することができる。

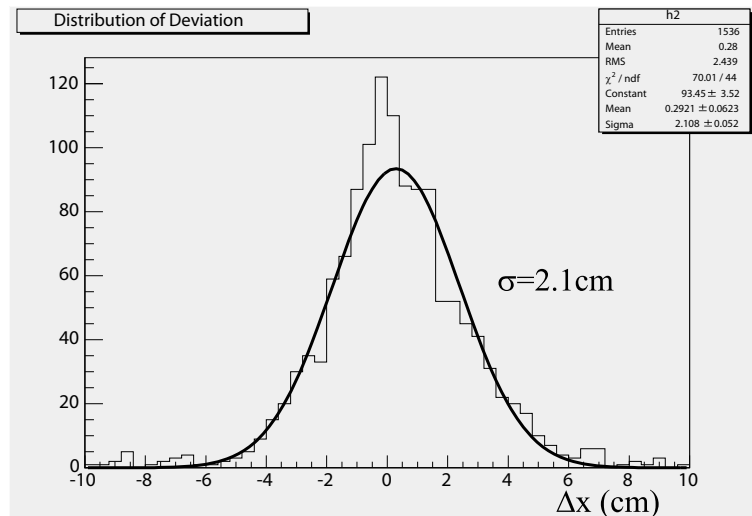
1. ファイバーを用いなくて、直接光電子増倍管で読みだす。
2. シンチレーターに埋め込んだ5本のファイバーを束ねて1つの光電子増倍管で読みだす。
3. シンチレーターに埋め込んだ14本のファイバーを束ねて1つの光電子増倍管で読みだす。
4. シンチレーターに埋め込んだファイバーを1本ずつを別々の光電子増倍管で読みだす。

各読み出しの場合での光量測定結果を第1表に示す。これからファイバーを用いた読み出しでも、問題なくヒットを選び出せることがわかった。

次に位置分解能測定について述べる。ビームの通過位置は、カウンターの直前に置かれた1mm×1mmのシンチレーションファイバーによって求めた。一方、カウンター側では、各波長変換ファイバーから得られる光量の分布をガウス関数でフィッティングして得られる中心値を粒子通過位置とした。これらの差のヒストグラムを示したのが第3図である。これから波長変換剤入りファイバーを用いて得られる位置分解能として $\sigma = 2.11 \pm 0.05$ cm が得られた。

第1表 各読み出し方法で得られた平均光子数と集光効率。集光効率については、シンチレーターを直接読み出した場合を100とした。

読み出しの方法	平均光電子数	集光効率
シンチレーター直接読み出し	76	100
ファイバー5本の読み出し	12	15.8
ファイバー14本の読み出し	18	23.7



第3図 イベント毎に各ファイバーで得られた光量の分布から得られるビーム位置と実際のビーム通過位置との残差分布。分解能は $\sigma = 2.11 \pm 0.05$ cm が得られた。

§ 4. シンチレーションファイバーの MPPC を用いた読み出しの開発

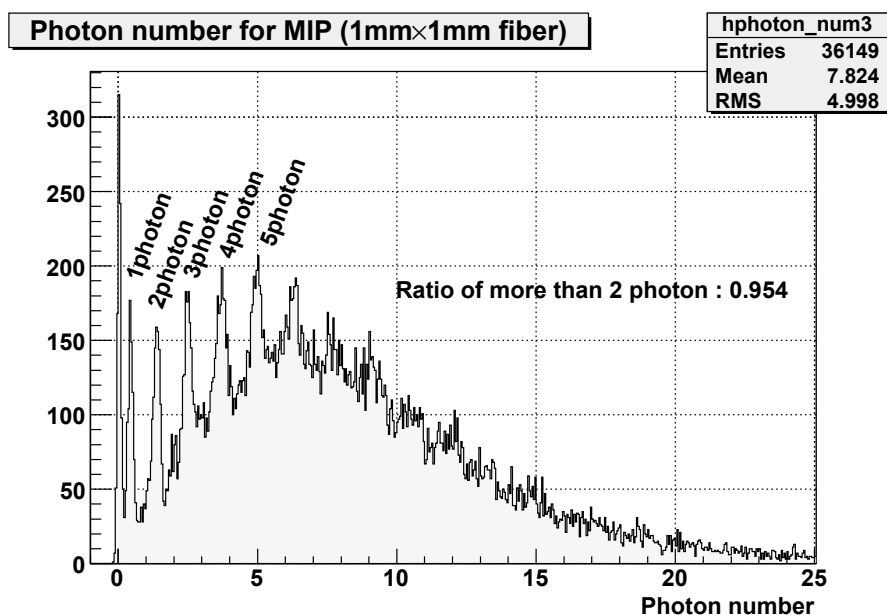
J-PARC では、E03 や E13 以外にも高統計でハイペロン核子散乱実験を行うことを計画しており、そのために、読み出しの速いイメージング検出器を検討している。そのひとつとして、現在シンチレーションファイバーを新型の光素子である Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) で読み出すシステム (Scifi-MPPC システム) を開発している。ハイペロン核子散乱で必要とされる性能としては、最小電離粒子に対し十分な光子数が得られること、および磁場中でも動作可能であることである。核理研の陽電子ビームを Scifi-MPPC に照射し、これらのことを調べた。

20 本のシンチレーションファイバーを 5 segment、4 層構造のファイバーバンドルとして、それぞれのファイバーを MPPC を用いて読み出した。また、検出器をビームライン上の sweep magnet の中に設置し、磁場を 0 T から 1.06 T まで変化させて、光量の変化を調べた。第 4 図に 450 MeV の陽電子を照射したときに得られた光子数の分布を示す (磁場はかけていない)。平均光子数は約 7.8 であり、十分な光量を得ることができた。これで、2 光子以上を要求したときでも 95% の効率で最小電離粒子をとらえることができる。次に、第 5 図に磁場を 0 T から 1.06 T まで変化させていったときの光子数を示す。平均光子数に変化はなく、MPPC が磁場中でも動作可能であるということを確認することができた。なお、第 6 図に陽電子ビームがファイバーバンドルを通過したときの典型的なイメージを示す。陽電子ビームの軌跡をクリアに検出することができている。

本テスト実験をとおして、Scifi-MPPC 読みだしシステムは最小電離粒子の検出に対し十分な性能があることが確認できた。

§ 5. 高密度エアロジェルチェレンコフカウンター

E03 実験では、 (K^-, K^+) 反応のトリガーレートが問題になっている。KEK-PS の E373 実験 [3] の経験から見積もると、first level trigger のレートは毎秒 10^4 のオーダーになり、DAQ で対応できない量になる。実際には、このトリガーのうち実際に (K^-, K^+) 反応であるのはせいぜい 10 個程度で、ほとんどは (K^-, p) イベントを誤認したものであることがわかっている。これは、E373 実験においては first level



第4図 陽電子ビームがファイバーを通過したときに MPPC 読み出しで得られた光子数分布。磁場は 0T である。それぞれのピークが、MPPC で検出された光子数に対応する。

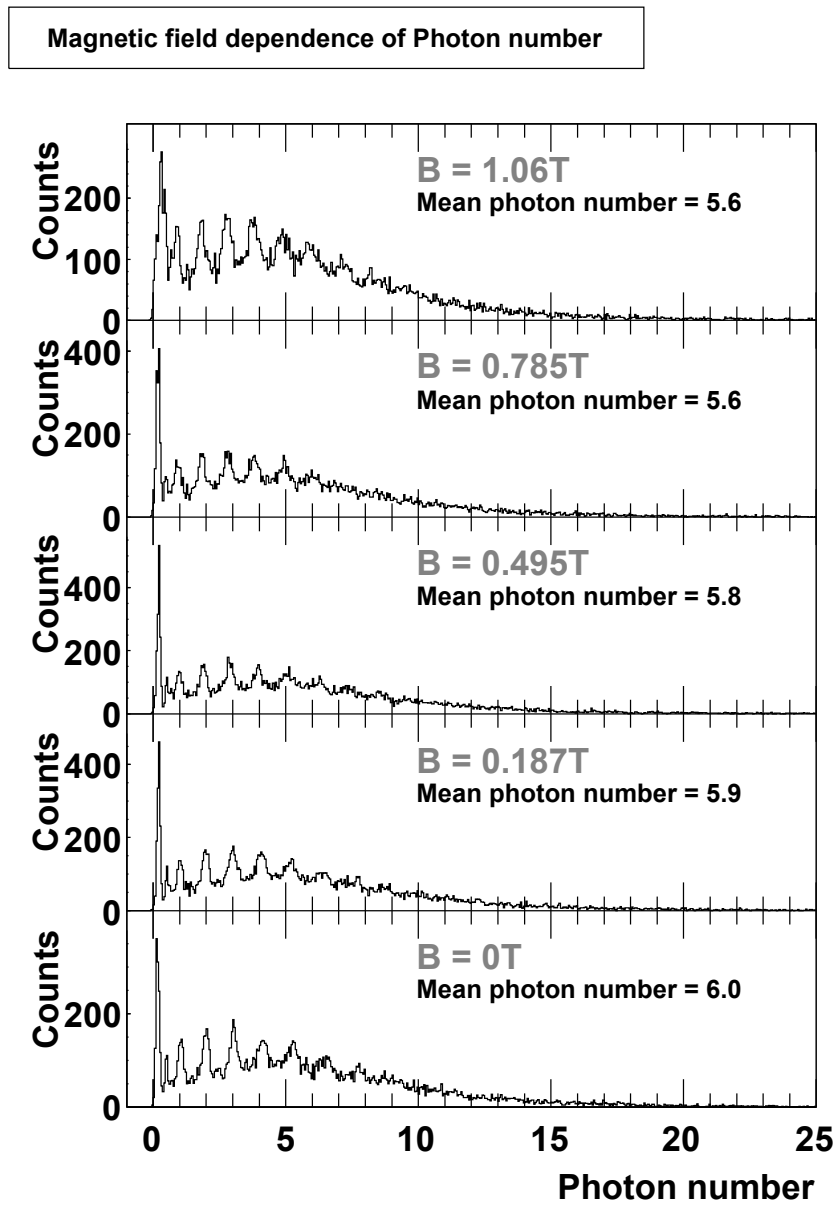
trigger の段階で陽子を K^+ から分けるための仕組みがなかったためであり、適切な屈折率 ($n \sim 1.12$) のチェレンコフカウンターを導入することで、陽子によるトリガーを落とすことが可能である。

このあたりの屈折率を持つ物質は少なく、高圧や低温を必要とするものばかりであったが、最近になって、屈折率が $1.08 < n < 1.26$ の範囲にあるシリカエアロジェルが千葉大学によって開発された。我々は、千葉大学から屈折率 1.12 前後を持つサンプル（大きさは $100 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$ 程度）を数枚譲り受け、チェレンコフカウンターのプロトタイプを作成した。このプロトタイプについて、ドイツの GSI 研究所で光量の速度依存性の測定を行い、 K^+ に対しての検出効率 90% 以上を保ちながら、陽子によるトリガーを 1/10 程度と十分に減らせるとの結果を得たが、GSI ではビームをカウンターの中心に正面から当てた時の測定しかできなかったため、一抹の不安が残っていた。すなわち、実際の K^+ はターゲットから広がってくるため、光量の位置依存性や方向依存性が大きい場合には K^+ に対しての検出効率 90% 以上が確保できるかどうかは定かではない。

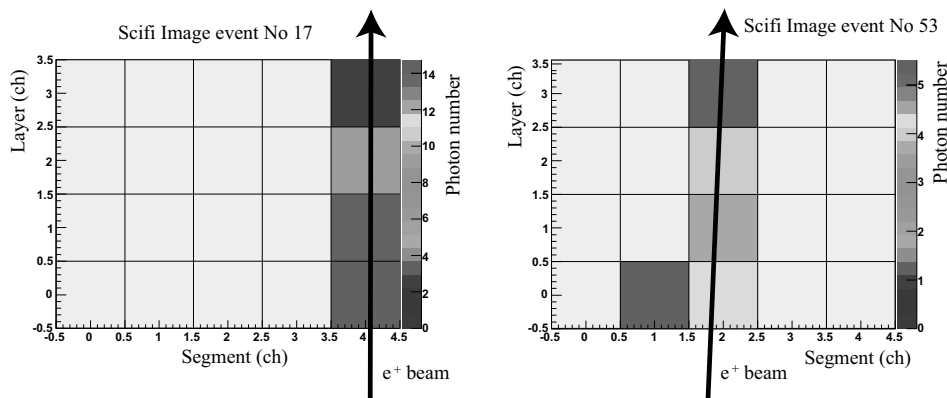
そこで、核理研では $\beta \sim 1$ のビームを用いて、光量の入射角度・位置依存性を測定した。まず、GSI と同じ条件（カウンターの中心に正面から入射）での測定では、平均光子数 15 個と、GSI 実験の結果を $\beta = 1$ へ外挿したのと矛盾しない結果が得られた。さらに、ビームの入射位置・角度を変えて測定したが、どの点においても平均光子数は 12 個以上あることがわかり、シミュレーション結果とも合わせて、光量の位置依存性や方向依存性をそれほど心配する必要はないということがわかった。

§ 6. トリガー可能な線源を用いたインビーム X(γ) 線エネルギー較正システム

E03 実験においては、ゲルマニウム検出器を用いて E 原子からの X 線のエネルギーを 50 eV という高い精度で決定することを目標にしている。ということは、エネルギー較正も 50 eV 以上という高い精度でなされている必要があるが、これが達成できるかどうかはインビームでは自明ではない。というのも、インビームにおいては X(γ) 線のピークの位置が 1 keV 程度、ビーム強度（より正確にはゲルマニウム検出器へ与え



第5図 磁場を0 Tから1.06 Tまで変化させたときの光子数の分布。ペDESTALが太くなっているが、平均光子数は変化していないのが分かる。



第 6 図 陽電子ビームがファイバーバンドルを通過したときの典型的なイメージ。陽電子の軌跡が確認できる。

られるエネルギー強度) に依存して動くことが知られており、50 eV の精度を達成するためにはオフビームでの較正は役に立たないからである。従って、較正データもインビームで同時に取得する必要があるが、今度は膨大なバックグラウンドとの戦いになる。この問題を解決することが J-PARC の PAC において E03 実験が完全採択 (Stage 2 採択) されるための必要条件になっていた。

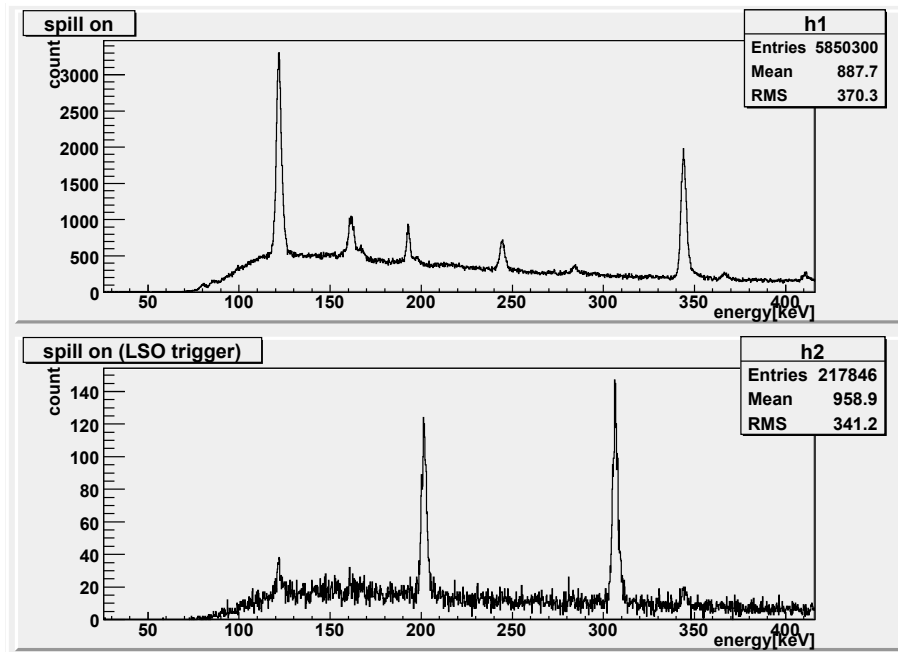
そこで、我々は LSO シンチレーターを用いたトリガー可能線源を開発している。LSO (Lu_2SiO_5) の主要元素である Lu は、放射性同位体である ^{176}Lu を 2.6% 含んでおり、 β 線と γ 線 (主に 202 keV と 307 keV の 2 本) を放出する。これは E03 実験で捕まえようとしている 3 鉄原子の X 線のエネルギー (強い相互作用を無視した場合、約 285 keV と計算されている [4]) を較正するのにちょうど良い。LSO 自身が良いシンチレータであることから、 β 線はほぼ 100% の効率でタグでき、同時に放出される γ 線を使うことで、較正時のバックグラウンドを大幅に減少させることが可能になる。また、小さな ($10\text{ mm}\phi_t \times 1\text{ mm}$) LSO をゲルマニウム検出器のすぐ傍において使うことで、LSO に外からの放射線が当たることによるバックグラウンドも少なく保つことができる。

核理研では、電子ビームを直接ゲルマニウム検出器にあてて E03 実験になるべく近い (あるいはより厳しい) 環境下で較正データを取得した。ビーム強度は 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz の 3 点で測定し、その際のゲルマニウム検出器のシングルレートとデッドタイムを第 2 表にまとめた。ビーム強度 5 kHz または 10 kHz が E03 で予想される環境に近く、20 kHz ではそれよりもかなり厳しい環境での測定となっている。線源

第 2 表 X(γ) 線エネルギー較正実験時におけるビーム強度とゲルマニウム検出器のレート。リセットはゲルマニウム検出器のプリアンプがオーバーフローした際に発行されるもので、リセットレートはゲルマニウム検出器に与えられているエネルギー強度の良い指標になる。表には比較のため、KEK-PS E566 実験におけるゲルマニウム検出器の動作状況も載せた [5]。E03 実験におけるビーム強度は E566 よりも弱いと予想されるので、陽電子ビーム強度 5 kHz ないし 10 kHz が E03 実験での環境に近いと考えられる。

陽電子ビーム強度 (kHz)	ゲルマニウム検出器のシングルレート (kHz)	リセットレート (kHz)	deadtime (%)
5	40	2.5	~ 25
10	60	4	~ 30
20	100	7	~ 60
E566		3	46

としては、LSO だけでなく、標準線源 (^{133}Ba , ^{152}Eu) も置き、ゲルマニウム検出器のシングルスペクトル (間引いて測定している) と LSO が鳴った際のコインシデンススペクトル (こちらは間引いていない) の両方を同時に測定した。LSO とゲルマニウム検出器のコインシデンスレートはビーム強度が最大の時でも 30 Hz で、十分に取りきれられる量であることがわかった。インビームでのスペクトル (第 7 図) を見ると、シングルスペクトルでは見えない ^{176}Lu のピークが LSO とコインシデンスを取ることで綺麗に見えることがわかる。S/N 比はだいたい 1000 倍くらい改善している。次に、各 γ 線のピーク位置をビームオン・オフで比較すると、確かに最大で 2 チャンネル、500 eV 程度移動していることがわかった。



第 7 図 ビームオン時における、ゲルマニウム検出器のシングルスペクトル (上段) と LSO とのコインシデンスを取ったときのスペクトル (下段) の比較。上段では見えていない ^{176}Lu によるピークが下段では 2 本はっきり見えているのと他のピーク (主に ^{152}Eu 線源による) が強く抑制されているのがわかる。S/N 比はおおよそ 1000 倍改善している。

そこで、ビームオン・オフの両方で ^{133}Ba や ^{152}Eu で較正を行い、 ^{176}Lu のピーク位置をエネルギーに変換した結果が第 3 表である。ビームがオンになった際にピーク位置が移動しても、他のピークも同じように動くため較正後の結果は (統計誤差の範囲内で) 変化しないことがわかる。なお、ビーム強度や線源が変わった際に見かけ上 ^{176}Lu の γ 線のエネルギーが変わったように見えるが、これはゲルマニウム検出器がわずかに持つ位置依存性のためである。LSO の位置は変えていないが、 ^{133}Ba や ^{152}Eu 線源はビーム強度に合わせて動かしている。従って、実際の実験で較正を行う際には位置依存性まで考慮する必要があるが、これはオフビームで測定・補正可能であり、大きな問題とはならない。

以上の結果から、この LSO 線源を用いた較正システムは E03 実験が要求する性能を満たしていることがわかった。E03 実験においては 5 時間毎に 50 eV の精度の較正データを取得することができ、放射損傷などによるピーク形状の変化などもモニターすることが可能である。なお、これらのことを 2008 年 1 月の J-PARC PAC に報告することで、較正の問題が解決したことが認められ、E03 実験は Stage 2 採択を勝ち取ることができた。

第 3 表 較正線源 (^{133}Ba または ^{152}Eu) を用いて求めた ^{176}Lu γ 線の (有効) エネルギー。線源の位置によってゲルマニウム検出器の反応がわずかに変わるという効果に対する補正は行っていないため、各測定点で γ 線のエネルギーが見かけ上変わっているように見えるが、ビームのオン・オフによっては統計誤差の範囲内で変わっていないことがわかる。

陽電子ビーム強度 (kHz)	較正線源	ビームオフ (keV)	ビームオン (keV)	差 (eV)
20	Eu	306.635 ± 0.017	306.684 ± 0.061	-49 ± 63
5	Eu	306.734 ± 0.038	306.725 ± 0.052	9 ± 64
10	Ba	306.795 ± 0.027	306.776 ± 0.053	19 ± 59
5	Ba	306.817 ± 0.036	306.734 ± 0.046	83 ± 58

謝 辞

ケーブル等を貸して下さったり、ビームの調整をして実験を手伝って下さった核理研の皆様、特に石川助教に感謝致します。

参 考 文 献

- [1] K. Tanida *et al.*: J-PARC proposal P03 (2006);
http://j-parc.jp/NuclPart/pac_0606/pdf/p03-Tanida.pdf
- [2] H. Tamura *et al.*: J-PARC proposal P13 (2006);
http://j-parc.jp/NuclPart/pac_0606/pdf/p13-Tamura.pdf
- [3] H. Takahashi: Doctoral thesis (Kyoto University, 2003).
- [4] E. Friedman, private communication (2007).
- [5] Y. Ma: Master thesis (Tohoku University, 2006).