

KEK 電子陽電子入射器における マイコン接続型リアルタイム残留放射線量測定システムの構築

CONSTRUCTION OF A MICROCOMPUTER-CONNECTED REAL-TIME RESIDUAL RADIATION DOSE MEASUREMENT SYSTEM AT THE KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

佐武いつか^{#, A)}, 岩瀬広^{B, C)}, 諏訪田剛^{A, B)}, 草野史郎^{D)}

Itsuka Satake^{#, A)}, Hiroshi Iwase^{B, C)}, Tsuyoshi Suwada^{A, B)}, Shiro Kusano^{D)}

^{A)} High Energy Accelerator Organization (KEK), Accelerator Laboratory

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Department of Accelerator Science

^{C)} High Energy Accelerator Organization (KEK), Radiation Science Center

^{D)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd (MSC)

Abstract

Residual radiation dose measurements were conducted at both the klystron gallery during operation and the tunnel area of the KEK electron/positron injector linac during periods of operation shutdown. The aim is to measure the dose levels and its decay in time at several sites with high residual radiation doses. A simple real-time monitoring system has been developed using a portable radiation counter (Radiation-Watch, trademarked as PocketGeiger/PIN photodiode dosimeter). The radiation counter can be connected to a general-purpose microcomputer. The system was designed to be inexpensive, small, and portable, using Raspberry Pi. Measuring the decay curve of residual radiation during the shutdown will help determine a measure of the radiation environment in which workers can work safely. We conducted calibration of the system using a radiation source, measurement tests in the klystron gallery during operation, and in the tunnel during shutdown. In this paper, we report detailed results of the measurement tests using this system.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器[1]における放射線量測定は、加速器トンネルでは運転停止中に測定が行われ、クライストロンギャラリーでは運転中に測定が実施されてきた。放射線量の多地点リアルタイムモニタリングを実現するため、汎用マイコンと接続可能である、放射線カウンター (Radiation-Watch 社、商標 PocketGeiger[2]/PIN フォトダイオード線量計) を用いたシステム構築を行った。このシステムは放射線カウンターとマイコン (Raspberry Pi 財団、商標 Raspberry Pi[3]) を用いて、安価かつ小型で、可搬性を備えたシステムという特徴を持つ。残留放射線の減衰を測定することで、作業者が安全に作業できる放射線環境の目安を決定づけるのに役立つと考えられる。

線源を用いた校正、運転中のクライストロンギャラリーでの測定試験、運転停止直後のトンネル内での測定試験を行った。本稿では、本システムを用いた測定試験について詳細を報告する。

2. マイコン接続型リアルタイム残留放射線量測定システムの概要

2.1 システム構成

本システムを Fig. 1 に、構成部品を Table 1 に示す。Raspberry Pi の入出力には 40pin コネクタ (GPIO ピン) にリボンケーブルを接続し、さらに Dsub コネクタに変換して



Figure 1: Real-time monitoring system using a portable radiation counter and Raspberry Pi, which are connected through a Dsub cable.

Table 1: Components of the Real-Time Monitoring System

本体	放射線カウンター (PocketGeiger type5)
入出力	Dsub コネクタ
マイコン	Raspberry Pi 4 Model B
入出力	40pin コネクタ/リボンケーブル /Dsub コネクタ
接続	Dsub コネクタ付ケーブル
電源	Raspberry Pi へ供給
ネットワーク	有線/無線 LAN

[#]itsuka.satake@kek.jp

いる。放射線カウンターの入出力を Dsub コネクタとして
いるので、両者を Dsub コネクタ付ケーブルで接続する
ことができる。こうすることで、任意長のケーブルで延長を
可能にする。カウンターと Raspberry Pi の GPIO ピン間の
信号は、Fig. 2 のように配線される。

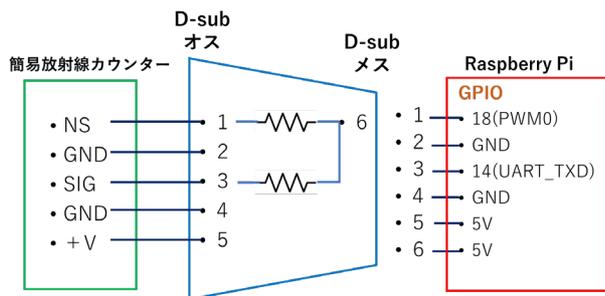


Figure 2: Wiring diagram between a portable radiation counter and GPIO pin on Raspberry Pi.

2.2 放射線カウンターの仕様

カウンターには、組込マイコン用モデルである
PocketGeiger type5 を使用している。Table 2 にカウンターの
仕様¹を示す。

2.3 EPICS IOC

1 台の Raspberry pi に対し、カウンター1 台が接続され
る。Raspberry pi 上で EPICS IOC[4] を動かしている。

Table 2: Specification of a Portable Radiation Counter

線量率の測定範囲	0.05~100 $\mu\text{Sv/h}$ (Cs-137)
放射線数の測定範囲	0.01~5400 cpm
センサー	PIN フォトダイオード
サイズ	H61 x W34 x D12 mm
重さ	80 g
消費電力	約 30 mW
精度	$0.05 \pm 0.02 \mu\text{Sv/h}$

Table 3: List of Acquired Data for the Real-Time Radiation Measurement System

CPM	1分当たりのカウント数 (Count Per Minute)
$\mu\text{Sv/h}$	線量率
Error	線量率の計数誤差($\sqrt{N/N}$)

¹ センサー自体はベータ線と X/γ 線の両方に感度があるが、センサーの前にベータ線遮蔽用真鍮板を挿入しているので X/γ 線
カウンターとして動作することに注意してほしい。

放射線が検出されると、放射線検出信号出力 SIG が
Low になる。プルアップ抵抗は 10 k Ω ~22 k Ω が適して
おり、この値によりパルス幅が変わる。本システムでは、
22 k Ω を使用している。EPICS IOC では、この放射線検
出信号出力 SIG を GPIO ピンで取得し、パルス数を計数
する。単位時間当たりの計数 CPM 値を放射線量(線量
率)に換算する仕様である。EPICS IOC で収集した情報
は EPICS PV に格納され、アーカイブシステムを通し
て保存される。主な取得データを Table 3 に示す。

EPICS IOC 内で、1 分間の積算値を算出し、CPM に
換算する。測定された CPM をもとに、線量率は換算係
数を乗じた計算式($\mu\text{Sv/h} = \text{CPM} / 53.032$)により換算さ
れる。

2.4 動作試験

測定システムは、Table 4 に示す2つの異なるシステム
で動作試験を実施し、どちらも正常に動作することを確認
した。オシロスコープで測定した検出信号波形を
Fig. 3 に示す。

Table 4: Two Different Test Systems for the Real-Time Radiation Measurement System

Raspberry pi 型番	制御プログラム	ネットワーク
zero	Web 公開のプログラム	無線 LAN
4 Model B	EPICS IOC	有線/無線 LAN

3. 線源を用いた線量率校正



Figure 3: Radiation signal waveform measured with an oscilloscope. The horizontal and vertical scales are 100 $\mu\text{s}/\text{div}$ and 1 V/div, respectively.

3.1 実験室での校正

線源は、Cs-137(γ 崩壊 661.7 keV, 165.6 MBq, 購入
時:370 MBq)を使用して、カウンターと線源間の距離を
0.1 m から 2 m まで変えながら放射線量を測定した。

Table 5に、Cs-137の被ばく管理に用いられる2つの異なる定数を示す。

Table 5: Two Different Constants Used for External Exposure with Cs-137

1 cm 線量当量率定数	0.0927 (μSv/h)・(m ² /MBq)
実効線量率定数	0.0779 (μSv/h)・(m ² /MBq)

これらの定数を用いて、実効線量を推定した。ベクレル(Bq)からシーベルト(Sv)への変換は、放射能の核種がわかる場合には、1 cm 線量当量率定数、あるいは、実効線量率定数を用いて変換できる。

これらの定数は、既知の放射能を示す線源である場合に、線源から1 m離れた位置での空間線量率を実効線量率、あるいは、1 cm 線量当量率で表すための換算係数のことである。1 cm 線量当量率定数とは、人体組成を模擬した元素組成値をもつ直径30 cmの球体(ICRU球)を放射線場に置いて、その球表面から1 cmの深さの点での線量値(周辺線量当量)のことである。

Figure 4に、本システムと線源との距離に対する線量

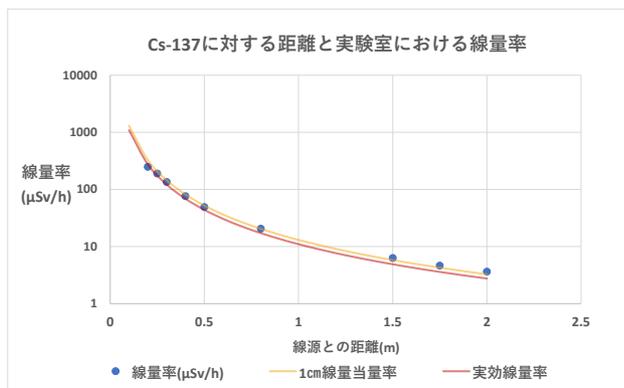


Figure 4: Variations in the dose rate as a function of the distance between the radiation source and the measurement system in the laboratory.

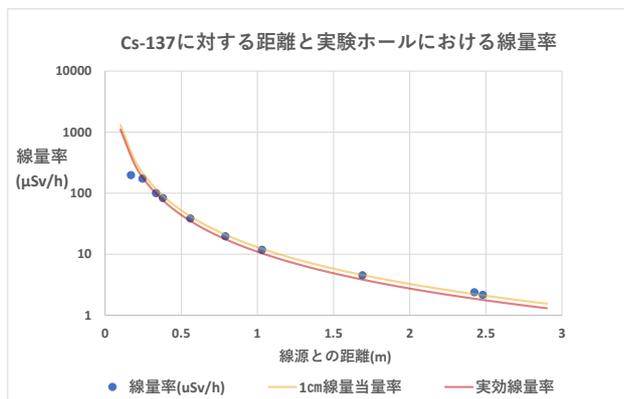


Figure 5: Variations in the dose rate as a function of the distance between the radiation source and the measurement system in the experimental hall.

率の変化を示す(実験室での測定)。1 cm 線量当量率とほぼ一致した線量率が測定された。線源との距離が短いと、数え落としが顕著となることがわかる。

3.2 実験ホールでの校正

実験室での校正では、実験室の壁または床からの散乱の影響を受ける可能性がある。そのため、この影響を考慮する必要のない、敷地容量の広い実験ホールにおいて同様の校正を実施した。

同じ線源を使用して本システムと線源間との距離を変えながら同様な測定を実施した。Figure 5に、線源とシステム間距離に対する線量率の変化を示す。実験室での結果と同様に、1 cm 線量当量率にほぼ一致した線量率が測定された。線源との距離が短いと、数え落としが顕著となることは実験室における測定と同様であることがわかる。

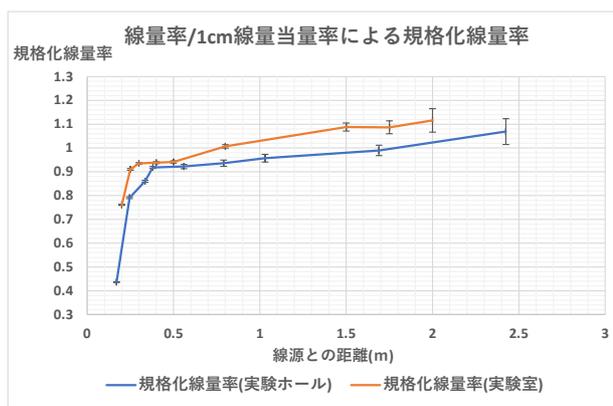


Figure 6: Variations in the dose rate normalized by 1cm-equivalent dose rate as a function of the distance measured in the experimental hall and room.

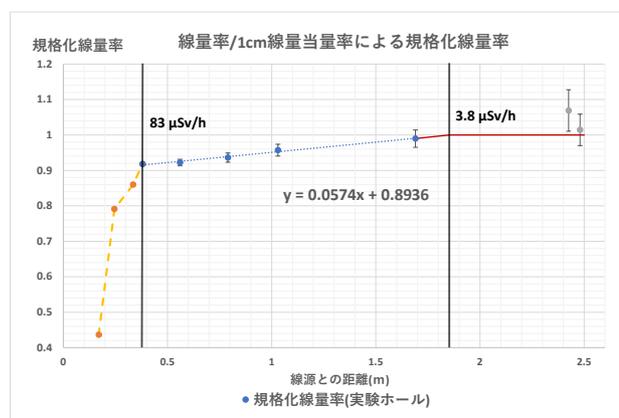


Figure 7: Same plot as figure 6. This plot is divided by three different distance regions. In the saturation region (left), the data points are connected by using a dashed line, in the counting loss region (middle), a linear approximation in the range between 3.8 (ratio of 1) and 83 μSv/h is applied, and the ratio is fixed to be 1 in the region of less than 3.8 μSv/h (right).

3.3 2つの校正による考察

Figure 6 に、2 つの校正における、1 cm 線量当量率で規格化した線量率(規格化線量率=線量率/1 cm 線量当量率)を示す。線源との距離が大きいほど、立体角が小さくなり、単位時間当たりの検出数が減少するので測定誤差が大きくなる。従って、その誤差を考慮した規格化線量率の誤差も大きくなる。実験室での結果は、実験ホールでの結果と比較して、規格化線量率が大きくなっており、明らかに壁からの散乱成分による影響であると考えられる。

実験ホールのデータ(青線)をみると、距離が 2.42 m の規格化線量率は、バックグラウンドを考慮すると測定誤差の範囲内で1に一致している。また、線源との距離が短い領域(<0.38 m)では、それが 1 より大きく下がっている。比率が大きく低減し始める点を飽和点と呼び、この点より線量率が大きな領域を飽和領域と呼ぶことにすると、飽和点での線量率は 83 $\mu\text{Sv/h}$ である。本カウンターの仕様は線量率 0.05~100 $\mu\text{Sv/h}$ の範囲にあり、本実験で得られた飽和点はほぼ仕様値に一致し、飽和点を超えると数え落としが急速に大きくなることに注意されたい。

Figure 7 に、実験ホールで得られた規格化線量率を再記載する。このプロットでは、飽和点から1までの中間領域を線形近似し、規格化線量率1を超える領域を1に固定している。線型領域では、ほぼ一定の傾きで比率が線型に変化していることがわかる。規格化線量率1を超える領域は1に固定しても矛盾はない。線型領域との交点は 3.8 $\mu\text{Sv/h}$ (距離~1.85 m)である。この結果は、この交点から数え落としが緩やかに生じることを示す。飽和点における最大数え落としは~10%である。この領域における数え落としの原因は、pin フォト固有のダイオード特性を示しているのか、或いは pin フォトとその前面にあるベータ線遮蔽用の真鍮板(厚さ 0.5 mm)との幾何学的配置に関係して角度を持った放射線入射に対する検出もれの可能性もあり現在評価中である。

以上の結果から、線量率測定の上限值は 83 $\mu\text{Sv/h}$ 、バックグラウンドを下限值として 0.028 $\mu\text{Sv/h}$ を得た。本システムのダイナミックレンジは 2963 倍であることを確認した。ただし、数え落とし開始線量率は 3.8 $\mu\text{Sv/h}$ であることに注意してほしい。

Figure 6 によると壁からの散乱の影響は、最大で~10% である。線量率が飽和点以下の領域では、狭い実験室であれば壁からの散乱で最大 10%程度の誤差が、また数え落としによる誤差が最大 10%程度見込まれる。これら2つの効果を考慮すると最大 20%の誤差となるので、数え落としが発生する領域での線量率測定には注意が必要である。

4. 入射器での残留放射線測定

入射器運転中に、A1 電子銃室(地下)、ギャラリー C7(地上)の 2 か所での測定を実施した。Table 6 に、A1 電子銃室及びギャラリー C7 での測定結果を示す。本システム以外にも、校正された3種類のサーベイメータを用いて測定した。

2 種類の NaI シンチレーション式サーベイメータは、物質との励起作用を利用した測定器で感度が高い。広エネルギーレンジ X/ γ シンチレーションサーベイメータでは

X 線モードで測定を行った。一方、電離箱は放射線と気体との電離作用を利用した測定器で、検出感度は比較的低い。

2 か所とも線量率が元来低い場所なので、サーベイメータ間の誤差も大きい結果となった。本システムによる測定結果は、電離箱と NaI シンチレーション式サーベイメータによる測定値の間を示し、各測定器間で矛盾のない結果を得ることができなかった。これは、測定線量が小さいことも一因であろうが、X 線とベータ線に対する各測定器の感度が異なることにも起因していると考えられる。

Table 6: Four Different Dose Rates Measured by Using the System and Three Different Survey Meters in A1 Electron Gun Room and at Gallery C7

測定器	A1 電子銃室 ($\mu\text{Sv/h}$)	ギャラリー C7 裏 ($\mu\text{Sv/h}$)	入射器棟 ロビー (BG, $\mu\text{Sv/h}$)
本システム	0.066	0.32	—
広エネルギーレンジ X/ γ シンチレーションサーベイメータ(X 線モード)	0.017	0.090	0.016
NaI シンチレーションサーベイメータ	0.09	1.00	0.10
電離箱 サーベイメータ	0.0	0.5	0.0

5. 入射器トンネル内の残留放射線減衰測定

運転停止直後から、トンネル内最下流にある第 3 スイッチヤード(SY3)及び陽電子生成ターゲット付近の 2 か所での測定を実施した。データ取得開始点は運転停止から約 30 分後である。Figure 8 に、2 か所での線量率の減衰を示す。陽電子生成ターゲットのフェンス地点で 20 $\mu\text{Sv/h}$ まで下がるのに要した時間は、運転停止(9:00)から 8 時間 20 分後である。停止直後は多くの核種の半

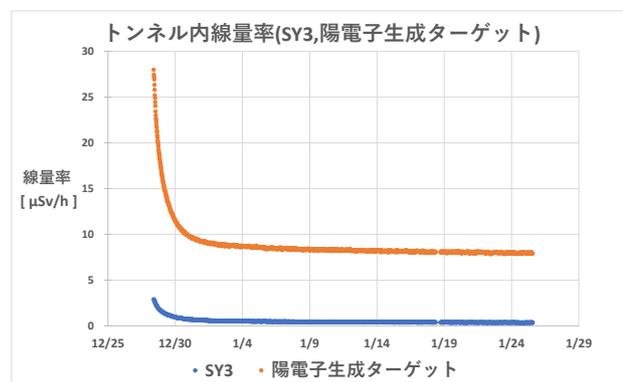


Figure 8: Time traces of the residual dose rates measured at the positron production target and SY3.

減期が重ね合わさっており、単純な指数関数ではフィットできない。この急速な減衰にかかる時間は、SY3:約 4.3 日、陽電子生成ターゲット:約 4.9 日である。支配的核種が減ってきたと考えられる、運転停止後 2 週間後から 2 週間分の測定データを使って指数近似を行った (Fig. 8 参照)。この測定データを使って実効的な半減期を算出した。実効的な半減期は、SY3 では約 63 日で、陽電子生成ターゲット付近では約 250 日であった。以上の結果より、この期間での支配的核種としては、半減期が 271.7 日である Co-57 や、70.8 日である Co-58 が推定される。

6. まとめ

汎用マイコンと接続可能である PocketGeiger と Raspberry pi を用いた本システムにより、安価で小型の、可搬性を備えたシステムを構築することができた。

線源からの距離に応じて線量率が減衰する結果が得られた。線源を用いた校正によって、線量からの距離に依存する線量強度の減衰曲線との比を取ることで、本システムのダイナミックレンジが $\sim 3 \times 10^3$ 倍、数え落とし開始線量率が $3.8 \mu\text{Sv/h}$ 、飽和領域開始点が $83 \mu\text{Sv/h}$ であることが確認できた。狭い実験室で校正を行うと壁からの散乱の影響が少ない測定誤差が見込まれるので注意する必要がある。

陽電子生成ターゲットのフェンス地点で $20 \mu\text{Sv/h}$ まで下がるのに要した時間は、運転停止から 8 時間 20 分後であった。トンネル内の残留放射線量は、運転中のビームロスにも影響するため、残留放射線量は測定するたびに大きく異なる。したがって、残留放射線量を正確に測定するためには、入射器運転停止時における毎回のリアルタイム測定が必要不可欠である。

入射器停止中の残留放射線の減衰曲線のリアルタイムモニタリングが実現できれば、作業者が安全に作業できる環境の目安を決定づけることができる。しかし、現状では運転中の高線量環境ではダイナミックレンジを優に超えるので本システムによるリアルタイム測定が難しいことがわかった。今後は、高線量率に耐える広ダイナミックレンジを可能にする回路開発、或いは高線量率に耐えるイオンチェンバーを開発しようと検討を始めている。並行して、KEK 入射器棟内にある低速陽電子施設での作業時間を決定する目安とするため、本システムを用いた線量率の減衰曲線を測定したいと考えている。

参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, "Achievement of 200, 000 Hours of Operation at KEK 7-GeV Electron 4-GeV Positron Injector Linac", in Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'22), Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 2465-2468.
- [2] PocketGeiger;
<http://www.radiation-watch.org/p/pocketgeiger.html/>
- [3] Raspberry Pi;
<https://www.raspberrypi.com/>
- [4] EPICS;
<http://www.aps.anl.gov/epics/>