

KEK 電子陽電子入射器における 改良型 PIN フォトダイオード放射線カウンターを用いた測定システムの構築

CONSTRUCTION OF THE MEASUREMENT SYSTEM USING AN IMPROVED PIN PHOTODIODE RADIATION COUNTER 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)}, 浅野大輔^{E)}, 時吉正憲^{E)},
松本佳宣^{F)}, 石垣陽^{G)}, 佐藤雅俊^{H)}

Itsuka Satake^{#, A)}, Hiroshi Iwase^{B), C)}, Tsuyoshi Suwada^{A), B)}, Shiro Kusano^{D)}, Daisuke Asano^{E)}, Masanori Tokiyoshi^{E)},
Yoshinori Matsumoto^{F)}, Yo Ishigaki^{G)}, Masatoshi Sato^{H)}

^{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)

^{E)} TAISEI CORPORATION, Project Planning Department, Nuclear Facilities Division

^{F)} Keio University, Faculty of Science and Technology, Department of Applied Physics and Physico-Informatics

^{G)} The University of Electro-Communications, Research Center for Realizing Sustainable Societies

^{H)} YAGUCHI ELECTRIC CORPORATION

Abstract

A simple real-time monitoring system for a radiation counter was under development. The simple radiation counter (Radiation-Watch, trademarked as PocketGeiger/PIN photodiode dosimeter) has been improved to measure higher radiation by changing the size of sensor. This system is a small and portable system using the Raspberry Pi. Calibration tests were performed using radiation sources, Co-60 and Cs-137, and the measurement range of the radiation counter was determined based on these results. It was confirmed that the radiation dose can be measured during operation and shutdown of the KEK electron/positron injector linac. This information is useful for safety management of not only the equipment but also people working in the radiation environment. In this paper, we report the detailed results of measurement tests using this system.

1. はじめに

2022年、放射線カウンター (Radiation-Watch 社、商標 PocketGeiger[1]/PIN フォトダイオード線量計) を用いて、線源を用いた校正試験と KEK 電子陽電子入射器[2] (以下、KEK 入射器) における放射線測定を実施した。その結果、放射線カウンターの測定範囲の上限が約 83 $\mu\text{Sv/h}$ であることを確認した。

放射線カウンターはマイコン (Raspberry Pi 財団、商標 Raspberry Pi[3]) と接続でき、リアルタイムに放射線をモニタリングすることが可能である。さらに、安価かつ小型で、可搬性を備えたシステムである。

改良型放射線カウンター (高線量率 IoT 線量計: 大成建設株式会社 特許出願予定) を用いて、システムを構築した。改良型放射線カウンターは、センサーサイズを 1/13 以下に変更し、感度を低減させることでより高線量率の場で測定できるように改良されたものである。Co-60 と Cs-137 の線源を用いて校正試験を行った。また、KEK 入射器運転中及び運転停止時の放射線量測定試験を実施した。本稿では、これらの測定試験の結果について

[#]itsuka.satake@kek.jp

詳細を報告する。

2. 改良型放射線カウンターを用いた放射線測定システムの概要

2.1 システム構成

本システムの構成部品を Table 1 に示す。Raspberry Pi の入出力には、40pin の GPIO にリボンケーブルを接続

Table 1: Components of the Radiation Monitoring System Using an Improved Radiation Counter

本体	改良型放射線カウンター
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
電源	Raspberry Pi へ供給
ネットワーク	有線 LAN

し、Dsub コネクタに変換している。改良型放射線カウンターからの信号線も Dsub コネクタに変換される。Raspberry Pi と GPIO ピンとの間の長さは、Dsub コネクタ付ケーブルの長さによって調節できる。システムの配線図を Fig. 1 に示す。改良型放射線カウンターのセンサーの仕様を Table 2 に示す。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ため、環境放射線の場合、

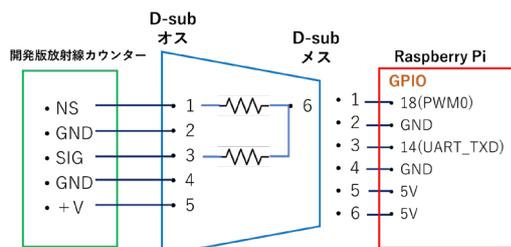


Figure 1: Wiring diagram between an Improved radiation counter and GPIO pin on Raspberry Pi.

Table 2: Specifications of Sensors Used in an Improved Radiation Counter

センサーの種類	PIN フォトダイオード
放射線照射面積	7.5 mm ²

X/γ 線カウンターとして動作する。

2.2 EPICS IOC

1 台の Raspberry pi に対し、1 台の改良型放射線カウンターが接続される。Raspberry pi 上で EPICS IOC[4] を動かしている。

放射線が検出されると、放射線検出信号出力 SIG はプルアップ抵抗 22 kΩ を通して Low になる。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 (Counts Per Minute) を放射線量(線量率)に換算している。EPICS IOC で収集した情報は EPICS PV に格納され、アーカイバシステムを通して保存される。取得している情報を 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 に換算係数を乗じて線量率(μSv/h)を算出する。

Table 3: List of the Acquired Data in the Radiation Measurement

CPM	1分当たりのカウント数 (Count Per Minute)
μSv/h	線量率
Error	計数 N の統計誤差(√N)

3. 線源を用いた線量率校正

3.1 実験室での校正

線源は、Cs-137(放射能 0.507 MBq)を使用して、改良型放射線カウンターと線源間の距離を 5 cm から 20 cm まで変更し、放射線量を測定した。

Table 4 に、Cs-137 の被曝管理に用いられる 1 cm 線量当量率定数を示す。

Table 4: 1-cm Dose Equivalent Rate Constants for External Exposure with Cs-137 and Co-60

Cs-137	0.0927 (μSv/h)・(m ² /MBq)
Co-60	0.354 (μSv/h)・(m ² /MBq)

この定数を用いて実効線量を推定した。放射能の核種が判明している場合、1 cm 線量当量率定数を用いて、ベクレル(Bq)からシーベルト(Sv)へ換算できる。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)を放射線場に置き、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 2 に、実験室での改良型放射線カウンターと線源との距離に対する線量率の変化を示す。測定の結果、1 cm 線量当量率(図中赤線)に沿った線量率が得られた。線源との距離が 7.5 cm 以下の範囲では、線量率は高く測定される傾向が見られた。比較的狭い実験室での測定では、壁または床からの散乱の影響を受けている可能性がある。

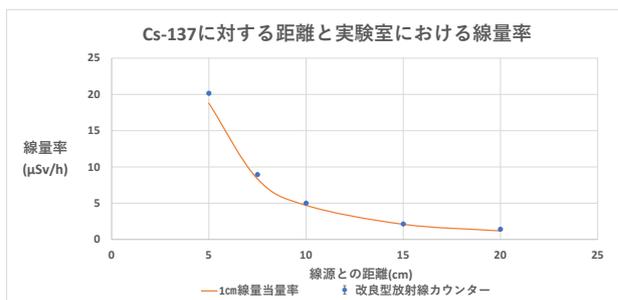


Figure 2: Variations in the dose rate as a function of a distance between the radiation source (Cs-137) and the measurement system in the laboratory.

3.2 放射線照射場での校正

線源は、Co-60(放射能 8.04 GBq)を使用して、改良型放射線カウンターと線源間の距離を 0.5 m から 4 m まで変更し、放射線量を測定した。この測定は、グレーチング(金属すのこ)床を有する大空間でおこなうため、壁または床からの散乱の影響は小さいと考えられる。Table 4 に、Co-60 の被曝管理に用いられる 1 cm 線量当量率定数を示す。この定数を用いて、実効線量を推定した。

Figure 3 に、実験室での改良型放射線カウンターと線源との距離に対する線量率の変化を示す。Cs-137 の校正試験と同様に、1 cm 線量当量率に沿った線量率が得られた。線源との距離が 0.5 m まで近づくと、数え落としが顕著となることがわかる。

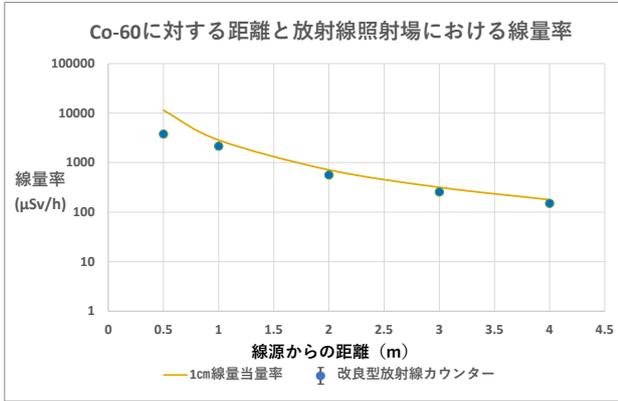


Figure 3: Variations in the dose rate as a function of a distance between the radiation source (Co-60) and the measurement system in the irradiation facility.

3.3 2つの校正による考察

Figure 4 に、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、単位時間当たりの検出数が減少するため測定誤差が大きい。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っている。

線源との距離が 1 m よりも小さい領域では、1 よりも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 2.1 mSv/h である。この飽和点を超えると、数え落としが大きくなる。

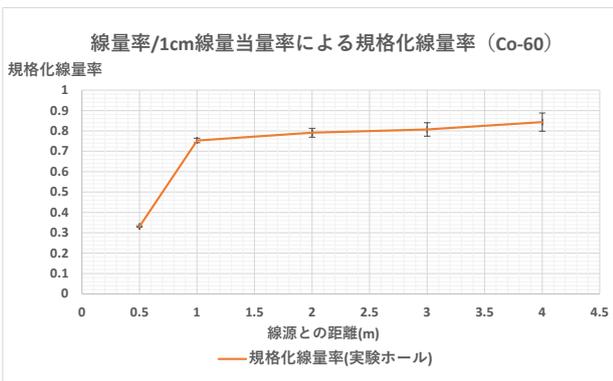


Figure 4: Variations in the dose rate normalized by 1cm-equivalent dose rate as a function of the distance measured in the irradiation facility.

以上の結果から、線量率測定の検出上限値は 2.1 mSv/h、バックグラウンドを下限値として 0.087 μSv/h を得た。この結果から本システムのダイナミックレンジは 2.5×10^4 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 2.1 mSv/h であることに注意する必要がある。

4. 入射器運転中での放射線測定

地上の貫通孔より、改良型放射線カウンターとガフクロミックフィルムをトンネル内(地下)に下ろし、測定を実施した。ガフクロミックフィルムとは、アメリカの Ashland 社が製造・販売している放射線への暴露により着色するフィルムである。現像の必要がなく、汎用のスキャナーを使うことで簡単に2次元の線量分布が得られる。今回の測定では、感度が 0.01~10 Gy の EBT3[5]を用いた。EBT3 は、放射線照射機の線量確認などに用いる IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy) 向け透過型線量確認フィルムである。

Figure 5 に、トンネル内 C-7 での線量率を示す。KEK 入射器運転停止直前から、運転停止中(5 時間)、運転再開後の 2 週間測定をおこなった。

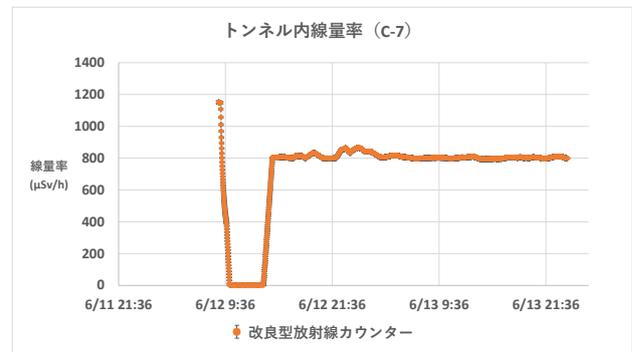


Figure 5: Time traces of the radiation dose rates measured by an improved radiation counter at C-7 during operation and shutdown of the KEK electron/positron injector linac.

加速器運転中は、約 1.1 mSv/h であった。運転停止中は、約 0.17 μSv/h まで下がり、運転再開後は約 0.81 mSv/h であった。運転停止後に線量率の減衰が見られ、0.17 μSv/h まで下がるのに要した時間は、運転停止 (9:00) から 1 時間であった。

ガフクロミックフィルムの測定結果は、1.13 Sv であった。この値から線量率を算出すると、3.35 mSv/h である。この期間での改良型放射線カウンターの平均値は、0.77 mSv/h である。ガフクロミックフィルムの結果が妥当であるとすれば、改良型放射線カウンターの結果は約 1/4 に過小評価しているといえる。この不一致の原因は数え落としであると考えられる。

改良型放射線カウンターを用いた数え落としの原因は、いくつか考えられる。1 つ目は、ビームは連続ではなく、パルスで出力されるためである。ビームは定常的ではなくパルス状であり、この線源パルスの幅 10 ps は放射線カウンターの不感時間(300 μs)よりも極端に短いため、数え落とし易い測定条件である。その他にも、PIN フォトダイオード固有のダイオード特性、或いは、改良型放射線カウンターの角度依存の寄与の可能性があると考えられる。

5. 入射器トンネル内の残留放射線測定

2024 年 7 月 12 日、KEK 入射器の運転を停止した。ビームが停止して約 12 時間後、アーク(R0_14)にて測定を開始した。アークは、KEK 入射器における 180° 偏

向部(アーク)で、運転時はビームロスが比較的大きい所である。本箇所を測定開始時に電離箱で測定したところ、約 500 $\mu\text{Sv/h}$ であった。検出器ヘッドが大きく、測定中心が設置場所に到達しないため、実際にはこの値よりも線量率は高い。Figure 6 に、アーク(R0_14)での線量率の減衰を示す。測定開始時には、922 $\mu\text{Sv/h}$ であった線量率が 600 $\mu\text{Sv/h}$ まで下がるのに要した期間は、測定開始時から 8 日間であった。現在も測定中である。

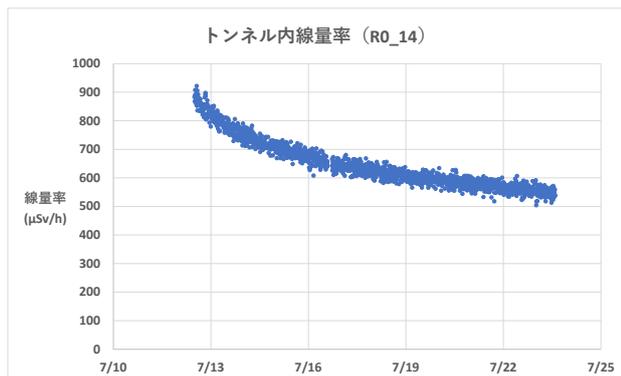


Figure 6: Time traces of the residual dose rates measured by improved radiation counter at ARC(R0_14) during shutdown of the KEK injector linac.

6. まとめ

改良型放射線カウンターを用いた、小型で可搬性を備えた放射線リアルモニタリングシステムを構築することができた。Co-60 と Cs-137 の線源を用いた校正試験の結果より、本システムにおける線量率測定の上限值は 2.1 mSv/h、ダイナミックレンジは 2.5×10^4 倍であることが確認できた。

KEK 入射器におけるアーク(R0_14)にて、残留放射線量の測定をおこなった。ビームが停止して約 12 時間後の時点で 922 $\mu\text{Sv/h}$ であった。600 $\mu\text{Sv/h}$ まで下がるのに要した期間は、測定開始時から 8 日間であった。

KEK 入射器における、C-7 での加速器運転中及び停止時の放射線量を測定することができた。加速器運転中

(C-7)の線量率は約 1.1 mSv/h であった。運転停止後に線量率の減衰が見られ、0.17 $\mu\text{Sv/h}$ まで下がるのに要した時間は、運転停止から 1 時間であった。しかし、ガフクロミックフィルムとの比較によって、この期間の測定では数え落としがおきていることが確認できた。数え落としの原因にはビームによる線量測定の飽和问题などが考えられる。そのため、今後は正確な放射線測定の評価のため、さらなる校正試験を実施するつもりである。

トンネル内の残留放射線量は、運転中のビームロスに依存するので測定の度に大きく異なる。したがって残留放射線量の測定では、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となる。入射器停止中に残留放射線量をリアルタイム測定することで、作業者が安全に作業できる環境の目安を与えることが可能となる。さらに、加速器運転中では 2.1 mSv/h までの放射線環境下で測定可能であることが初めて確認できた。しかし、この測定値では数え落としをしているため、さらなる校正が必要である。今後は、KEK 入射器の加速器運転中及び停止時に測定した情報をもとに、加速器運転に関わる様々な機器の安全管理にも役立てていきたい。

謝辞

本発表の改良型 PIN フォトダイオード放射線カウンターを用いた測定システムの構築にあたり、多大なご協力をいただきました。大成建設株式会社 原子力本部 原子力プロジェクト部 放射線チームの長峰春夫氏、西山恭平氏、谷口雅弘氏、吉本龍彦氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] PocketGeiger, <http://www.radiation-watch.org/p/pocketgeiger.html/>
- [2] H. Ego *et al.*, "Upgrade status of KEK electron/positron injector LINAC for improvement on beam injection to SuperKEKB", Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2024, THP023, this meeting.
- [3] Raspberry Pi, <https://www.raspberrypi.com/>
- [4] EPICS, <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [5] Gafchromic EBT3, http://www.gafchromic.com/documents/EBT3_Specificatio ns.pdf