

## 非パルス計数型放射線検出回路の製作

### DEVELOPMENT OF NON PULSE COUNTING TYPE RADIATION DETECTION CIRCUIT

下ヶ橋秀典<sup>#, A)</sup>, 帯名崇<sup>A)</sup>

Hidenori Sagehashi<sup>#, A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

Two primary radiation measurement patterns have been identified in the KEK-PF electron storage ring tunnel: a short, high-intensity pattern from electron loss near the injection point and a steady X-ray pattern from stored electrons, especially near the superconducting wiggler. Instruments have been developed to detect both types using non-pulse measurement circuits with a 20  $\mu\text{s}$  response time, featuring a photodiode, scintillator, and single-chip preamplifier for effective signal detection. The simple and cost-effective design aims for widespread sensor distribution.

#### 1. はじめに

KEK-PF 電子蓄積リングトンネル内で放射線計測を行う場合、大きく分けて 2 種類のパターンがあることが判明している。1 つ目は入射した電子の一部が失われることに起因する短時間で強い(ピークの高い)パターンであり、これは入射点付近(下流)やリング内の物理開口サイズが狭い部分において強く検出される。もう 1 つはリングの蓄積電子が発生する X 線由来の放射線であり、PF では超伝導ウイグラー付近(下流)で特に強く検出される。この 2 種類の放射線の両方に対して検出可能な機器の開発を行っている。現在、検出部の試作及びテストを行っている。はじめに回路構成の方針を決め、数種類の非パルス計数型(DC 出力型)の放射線検出回路を製作した。製作した回路は机上テストおよび PF リング内で実ビームによる検出波形観測を行っている。本稿では製作した検出回路の説明と各種テスト結果、波形観測結果、問題点について報告を行う。

#### 2. 検出部の回路構成の方針

これまで PMT とシンチレータを使用した放射線検出器を開発してきた。PMT では数 10 ns から 1  $\mu\text{s}$  程度の時間応答で高感度かつ高 SN 比で検出できている[1]。一方で PMT では許容される平均電流が低く、DC 出力の場合、簡単に故障してしまう。ここでは PMT 程の高速応答は求めない代わりに、より堅牢な検出システムを構築することを目標とした。具体的な開発目標は以下の通りである。

##### 1. 強度比例した計測

広いダイナミックレンジを確保するにはパルス計数方式が一般的であるが、検出信号を DC 出力の大きさに計測することとし、高い放射線領域の検出を目標とする。

##### 2. 計測速度は 20 $\mu\text{s}$ 程度

20  $\mu\text{s}$  程度以下で放射線レベルを直読可能とする。シンチレータ CsI(Tl)、プリアンプの動作速度を考慮すると、この程度がコストや開発の難易度の面でも

適切である。また、PF のリング周回周波数が 1.6  $\mu\text{s}$  であるため、1 回の入射あたりの放射線量を評価することを目標とした。

##### 3. 長時間の DC 出力を許容

定常的な高放射線を DC 出力で測定するため、定常出力が不得手な PMT ではなく、フォトダイオード(PD)を使用して連続 DC 出力を可能とする。

##### 4. 検出信号の増強(高 SN 比化・検出範囲の拡大)

SN 比を高くすること、1 台の検出範囲を広めることに加え、PD への放射線ダメージを小さくするために、線源から検出器の距離を保つ目的がある。方法としてシンチレータ、プリアンプを検出部に内蔵させる。

##### 5. 死活監視機能

PD の放射線ダメージ等を確認するため、LED を検出器に組み込んでおくこととする。

##### 6. 高い保守性と多数設置の想定

放射線にさらされる検出部を消耗品と考え、10 個から 100 個程度までの多数設置も考慮し、出来る限りシンプルで安価なものとする。さらに信号線、電源線、LED 配線に RJ-45 コネクタを用いることにより保守性を高める検討も行うこととした。

#### 3. 検出部の回路設計と製作

今回、設計製作した回路は主に 2 種類である。

1 つ目は PD1 個に IV 変換とアンプ(0-40 dB)のモデルで、PD1 個に IV 変換と増幅器がシリーズ接続されているタイプである。Figure 1 に回路構成図を示す。高い SN 比を得るためにこのような構成にした。Figure 2 に製作(試作)した検出部を示す。配線コネクタには RJ-45 を用いている。

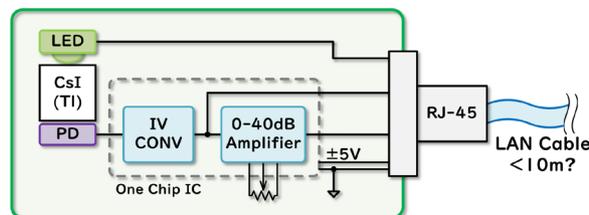


Figure 1: Detection circuit (1PD Model).

<sup>#</sup> hidenori.sagehashi@kek.jp

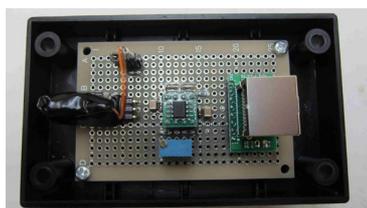


Figure 2: Detection board (1PD Model).

もう1つはPD2個にそれぞれにIV変換を接続したモデルで、片方のPDにはシンチレータが無いモデルである。Figure 3に回路構成図を示す。配線経路での同相ノイズを加速器トンネル外に設置した差動アンプにより除去する[2, 3]目的で製作した。両種類ともIV変換までは同仕様である。Figure 4(a)に製作(試作)した検出部(回路)を示す。

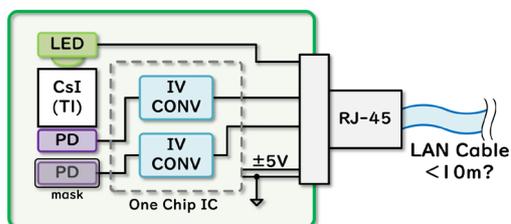
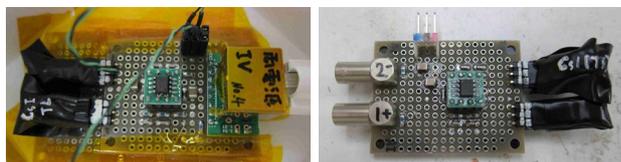


Figure 3: Detection circuit (2PD Model).

他に Fig. 3 構成で信号線を同軸コネクタ接続にしたモデル(Fig. 4(b))や単電源、50 Ωドライブモデル等を製作してテストしている。



(a) RJ-45 (b) coaxial

Figure 4: Detection board (2PD Model).

#### 4. 検出部の回路のシミュレーション

SPICEを用いてPDの出力をIV変換した回路のシミュレーションを行った。PDの等価回路は電流源と端子間容量とシャント抵抗を平行接続してモデル化した[4]。Figure 5は電流源の出力をPD短絡電流の1/3に設定し、パルス幅を1~10 μs変化させた場合のシミュレーション結果である。パルス幅はシンチレータに減衰定数1 μs

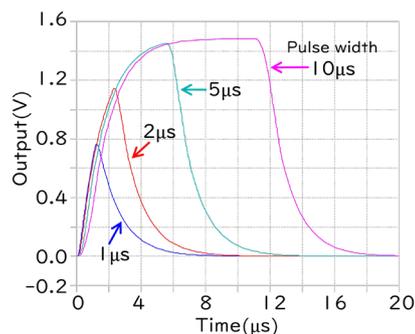


Figure 5: Simulation of detection circuits.

のCsI(Tl)を用いるため、パルス最小幅を1 μsにした。シミュレーションの結果、設定程度の入光があれば、放射線検出器として十分な出力が得られることが確認された。また、シミュレーションによってプリアンプの選定やパラメータの確認等を行うことが出来た。

#### 5. 机上テスト(内蔵LEDを使用したテスト)

内蔵LEDを用いての机上(非放射線環境)テストを行った。使用した検出部モデルはPD1個にIV変換とアンプ(0-40 dB)のモデル(Fig. 1, Fig. 2)で、アンプのゲイン設定は34 dBとした。LEDの駆動波形は矩形波(パルス)でパルス電圧は2.5 V、パルス幅は10 μs、LEDの制限抵抗は1 kΩとなっている。Figure 6に波形観測結果を示す。IV変換波形はほぼシミュレーションと同様な波形となった。後段のアンプ出力は高利得設定であったため、電源電圧付近まで振り切っている。使用状況によって利得を調整する必要があると考える。

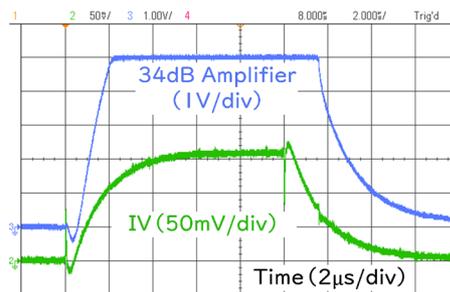


Figure 6: Testing on desktop using LED.

#### 6. 実ビームテスト(PFリング、入射点付近)

PFリング入射点付近に検出部を設置し、加速器運転状態での波形観測を行った。設置状況をFig. 7に示す。検出部モデルはFig. 4(b)のPD2個の同軸コネクタ接続モデルを使用した。また、加速器室外の地下トンネルに差動アンプを設置している。



Figure 7: Set up near the injection point.

##### 6.1 ビーム入射時の放射線観測

ビーム入射時の検出波形をFig. 8に示す。比較的大きな出力時の波形である。図中PMTは光電子増倍管にシンチレータを組合せた既設の入射診断用ロスモニタの波形である。IV[CsI]はシンチレータ有りのPDのIV変換出力、IV[no CsI]はシンチレータ無しのPDのIV変換出力、Differentialは差動アンプ(1倍)の出力波形である。IV変換出力はテストしたモデルでは負出力である。

IV[CsI]は電源電圧に達する出力が観測された。

IV[no CsI]でも 0.6 V の出力が観測された。Differential は IV[no CsI] - IV[CsI] の波形になっている。入射点での短時間で強い(ピークの高い)パターンの測定が可能であることが確認された。

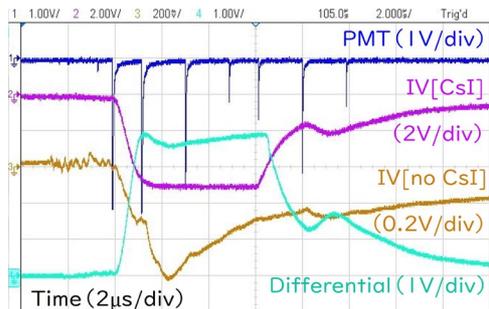


Figure 8: Near injection point at beam injection.

### 6.2 入射後検出信号が揺れる現象

比較的大きな放射線検出信号の後 1.5 ms 程度、出力信号が揺れる現象が確認された (Fig. 9)。両 PD 出力の大きさはおおむね同じであるが、逆相で振れているため差動アンプで相殺出来ない。大電流使用の周辺機器による GND の振れの影響とも考えられるが、今のところ原因不明である。机上テストでは LED の発光量が小さかったためか特に気にならなかった。机上テストも含めて、今後調査を実施する。

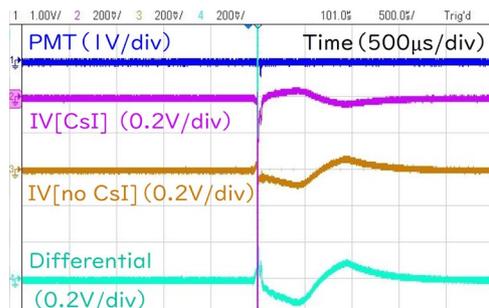


Figure 9: Detection signal fluctuates after injection.

## 7. 実ビームテスト (PF リング、ウイグラ下流)

PF リングウイグラ下流に検出部を設置し、加速器運転状態での波形観測を行った。設置状況を Fig. 10 に示す。



Figure 10: Set up downstream of the wiggler.

検出部モデルは Fig. 4 (a) の PD2 個の RJ-45 接続モデルを使用した。また、加速器室外の地下トレンチに差動アンプを設置している。

### 7.1 入射時の放射線観測 (蓄積電流 0mA)

ビーム入射時の検出波形を Fig. 11 に示す。蓄積電流は 0 mA で、比較的大きな出力時の波形である。IV[CsI] の信号ピーク (0.6 V) が入射点付近に比べると低いと測定可能であることが確認された。

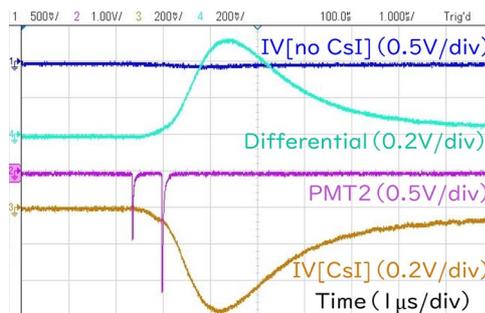


Figure 11: Downstream of wiggler at beam injection.

### 7.2 ビーム蓄積時 (450 mA、420mA) の放射線観測

蓄積電流 450 mA (マルチモード運転) 時の検出波形を Fig. 12 に示す。入射ビームは無し。IV[CsI] で DC 出力が 120 mV 観測された。リングの蓄積電子が発生する X 線由来の放射線について測定が可能であることが確認された。

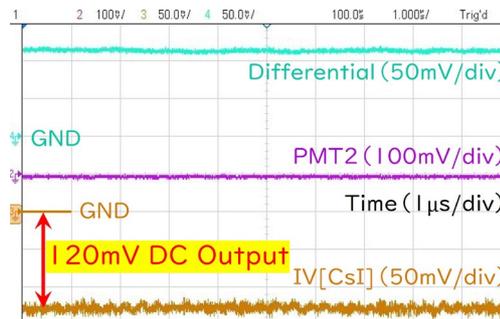


Figure 12: Downstream of wiggler at beam stored.

Figure 13 にビーム蓄積電流 0 mA から 420 mA (ハイブリッドモード運転) に対する IV 変換出力を示す。リニアに変化していることが確認された。ただ、Fig. 12 と比べると IV 出力電圧が低下している。測定条件が違うが、それを加味しても明らかに低下している。原因として、2 つの測定の間には約 6 ヶ月間高放射線下に曝されていた期

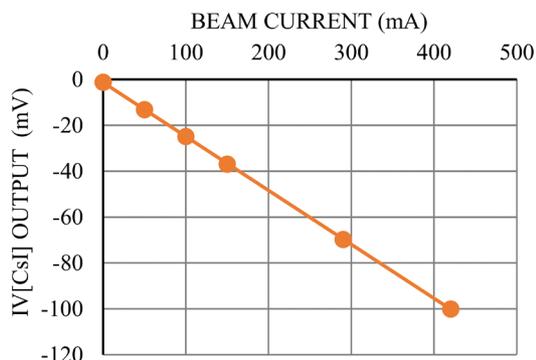


Figure 13: Beam current vs IV conversion output.

間があり、PD や電子部品の放射線損傷の可能性がある。詳細は今後調査する。

### 7.3 ビーム蓄積(450 mA)+入射の放射線観測

蓄積電流 450 mA (マルチバンチモード)時にビーム入射があった時の検出波形を Fig. 14 に示す。検出波形のピーク高さは Fig. 11 に比べて低いが、観測時の通常はこの程度であった。Figure 12 の DC 出力に入射波形が重畳された波形となっている。2 種類のパターンの放射線が同時に観測される場合、DC 成分とピーク成分を分離する処理が必要であると考える。

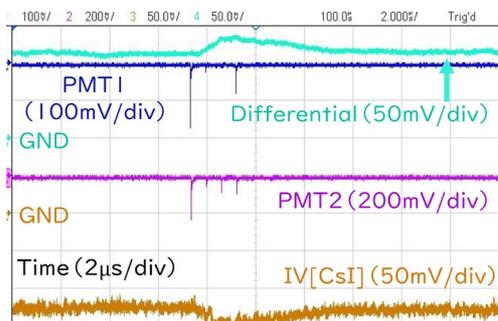


Figure 14: At injection during stored.

### 7.4 100 kHz ノイズに信号が埋もれる現象

蓄積電流 450 mA (マルチバンチモード)時にビーム入射があった時の検出波形を Fig. 15 に示す。検出器は Fig. 2 を単電源にしたモデルである。IV 出力は正出力である。IV 出力に 100 kHz、20 mV 程度のノイズが観測された。環境の問題か回路の問題かは現在不明である。入射のピーク波形がノイズに埋もれてしまい、観測が困難である。今のところ机上テストでは確認されていない。原因の追及が必要である。

## 8. 実ビームテスト(マルチとハイブリッド)

Figure 16 に (a)マルチバンチモードと (b)ハイブリッドモードの観測波形(450 mA 蓄積時)の比較を示す。観測場所は入射点付近で使用検出部は Fig. 4 (b) の PD2 個の同軸コネクタ接続モデルである。ハイブリッドモードで周回周期ごとに 100 MHz 以上の波形が観測された。シンチレータの有無に関わらず同じ出力レベルで観測された。波形は両極性であり、PD の受光による出力では無いように見える。直接電子部品に作用しているようだが、

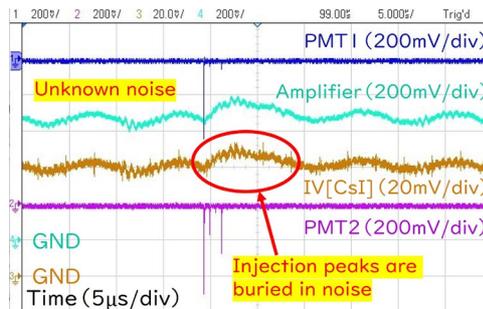


Figure 15: Phenomenon of signal buried in noise.

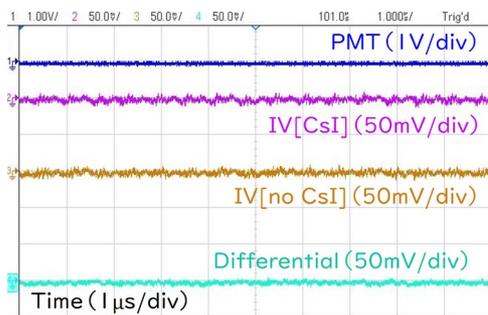
原因は不明である。Figure 16 (b)では差動アンプ出力(Differential)で 100 MHz 以上の成分は除去されているが、差動アンプの帯域が 10 MHz であるので差動の効果というより、帯域によるものであると考える。

## 9. まとめ

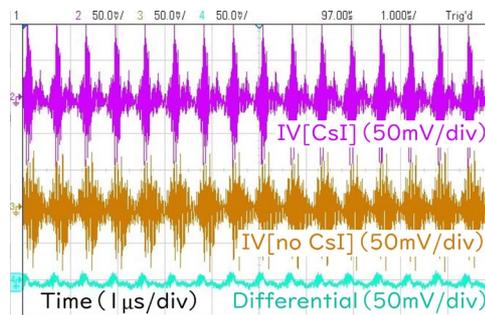
今回、以下のことを行った。

- 検出部の回路構成の方針を策定した。
- 2 種類の検出回路を製作した (IV 変換までは共通)。
- 回路シミュレーションを用いて動作の確認とパラメータの決定をした。
- 内蔵 LED を用いての机上(放射線環境外)テストを行った。
- 入射点付近に検出回路を設置して実ビームによる波形観測をした。
- 入射点付近で入射後に信号が揺れる現象を確認した。
- ウィングラ下流に検出回路を設置して実ビームによる波形観測をした。
- ウィングラ下流での 100 kHz ノイズを確認した。
- マルチバンチモードとハイブリッドモードの検出波形の違いを確認した。

現時点で差動アンプを用いた同相ノイズ除去の仕組みを採用するかどうかの判断は出来ていない。また、配線ケーブルについて、設置の利便性が高い LAN ケーブル (RJ-45) とノイズ耐性高い同軸ケーブルのどちらを採用するかは、今後の評価を通して判断する。LAN ケーブルは 2 m までに限定する、あるいは信号線は同軸ケーブルでそれ以外は LAN ケーブルにする等々の方式も考えられる。



(a) Multi-bunch mode



(b) Hybrid mode

Figure 16: Comparison of waveforms near the injection point (stored current 450mA).

## 10. 今後

今回行った波形観測では、原因不明の事象や判断が出来ていない問題が確認されている。それらの原因追及と対策を講じることが今後の課題である。また、回路方式をある程度絞り込んだ後には量産化に向けて検出部回路の基板化と筐体製作を行う予定である。さらに、現在粘着テープで固定しているPDとシンチレータを納める遮光ホルダの検討、製作を行う予定である。そして、PD や電子部品の放射線耐性についてもテストを実施する予定である。

## 参考文献

- [1] H.Sagehashi *et al.*, “TEST OF DETECTION UNIT FOR THE CERL HIGH-SPEED LOSS MONITOR”, Proc. 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2014), Aomori, Japan, Aug. 2014, pp. 1231-1233.
- [2] Y. Shimosaki *et al.*, “DEVELOPMENT OF BEAM LOSS MONITOR FOR THE SPRING-8 STORAGE RING”, Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, pp. 1284-1286.
- [3] Y. Shimosaki *et al.*, “MEASUREMENT OF BEAM LOSS DISTRIBUTION IN THE SPRING-8 STORAGE RING”, Proc. 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2009), Ibaraki, Japan, Aug. 2009, pp. 275-277.
- [4] ANALOG DEVICES フォトダイオード回路設計ウィザード.  
<https://tools.analog.com/jp/photodiode/>