

cERL 大電流化に向けたロスモニターの開発

DEVELOPMENT OF LOSS MONITOR FOR cERL WITH LARGE CURRENT

路川徹也^{#A)}, 倉田正和^{B)}, 本田洋介^{B)}

Tetsuya Michikawa^{#A)}, Masakazu Kurata^{B)}, Yosuke Honda^{B)}

^{A)} Alten Japan Co., LTD.

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

When accelerating and storing high-current electron beams, reducing beam loss is extremely important for suppressing the generation of radiation and radioactivity of equipment. To grasp the beam loss throughout the accelerator, a large number of radiation monitors are required, but commercially available equipment is very expensive, making its introduction difficult. Therefore, we are developing a loss monitor that is inexpensive and takes into consideration communication functions and response speed by simplifying the measurement and specializing only in radiation measurement. We will report on the current progress and issues of development, as well as future plans.

1. はじめに

加速器での大電流の電子ビームの加速及び蓄積において、ビームロスの低減は発生する放射線、機器の放射化を抑制する上で非常に重要である。

本来は測定が必要な箇所全てに配置することが望ましいが、市販の測定機器は非常に高価であることが多く、ほとんどの場合重要な測定点に限定的に設置せざるを得ない。また、安価な機器は通信機能を持つものがほとんどなく、通信機能を持つ機器は高価である。

cERL(compact Energy Recovery Linac)においては、今後予定されている大電流化に向けてビームロスの低減が喫緊の課題となっているが、ビーム測定には GigE カメラと BPM、放射線測定はシールド内にある 12 か所の Aloka 放射線モニター(MAR-783)[1]と CW 運転のインターロック用に設置したロスモニターがあるのみで、ビームロス発生箇所を特定するのは困難な状況にある。そのため放射線測定点を増やすことでビームロス発生箇所を絞り込み易くし、ビーム調整の指針とすることが可能となる。

本開発は放射線測定のみの特化し、測定を簡素化することで安価で応答速度や通信機能も考慮したロスモニターの開発を進めており、その開発状況と今後の予定を報告する。

2. 開発方針

今回開発しているロスモニターについては、以下の様な方針で行っている。

- PIN フォトダイオードを使用した測定。
- 放射線単位(Sv/h 等)への換算は行わない。
- トリガー信号との同期測定。
- 測定エネルギーは 100 keV~10 MeV 程度を想定
- データ出力はデジタルのみでアナログ出力は行わない。
- 放射線検出部とアンプ部は分離。
- EPICS[2]対応。

- チャンネル単価が安価。
- 構成する部品はできるだけ入手しやすいものを使用。

参考として使用した回路(以下、参考回路)[3]は 9 V 電池での動作を前提としているため、そのままでは長期運転に使用することが不可能であるため、測定に使用可能な電源部の製作が必要となった。また、ADC でのデータ取得を確実にするために、ピークホールド/リセット回路を追加した。

始めにテスト用として 1ch 版を作成し、問題がなければ運用には多チャンネル版を作成して使用することとした。

2.1 システム構成

基本的な測定システム構成を Fig. 1 に示す。

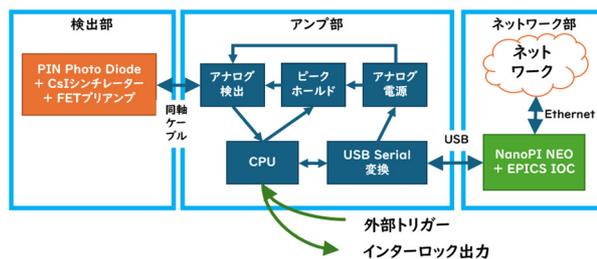


Figure 1: Measurement system configuration diagram.

測定システムは主に 3 つに分けられる。

- 検出部
 - アンプ部
 - ネットワーク部
- それらの概要について説明する。

2.1.1 検出部

検出部は、放射線環境下に設置して X 線や γ 線等の放射線を検出する部位である。放射線がシンチレーターに当たった時に発生する光が PIN フォトダイオードで電流として検出される。この電流は pA と非常に小さくノイズに弱いので、なるべく近くで増幅する必要があるが、今回は検出部内に FET を実装することでこれに対応してい

[#] hig-mchi@post.kek.jp

る。PINフォトダイオード近傍にプリアンプとしてFETを実装することで対ノイズ性能が向上し、放射線の影響を受けて誤動作しやすいアンプ部との距離を取ることができる。実際にアンプ部とのケーブル長は 20 m まで問題なく延長可能であった。参考回路で使用しているFET(2SK117-BL)は既に廃番になっており、今回は同等の性能である2SK209-BLを使用することとした。

検出部の主な特徴としては、次のようになっている。

- FET(2SK209-BL)によるプリアンプを内蔵。
- CsI(Tl)シンチレータ(1 cm 角)を使用。
- PIN フォトダイオードは浜松フォトニクス製 S6775[4]。
- 可視光の遮光構造。

検出部は、実装用基板をシリコンテープ、絶縁用カプトンテープ、シールド/遮光用アルミテープ及び3Dプリンタで製作したケースで覆われた構造となっている。

Figure 2 に検出部の外観を示す。



Figure 2: Appearance of the detector.

2.1.2 アンプ部

アンプ部の基本的な構成は、次のようになっている。

- アナログ検出回路
 - アナログ電源回路
 - ADC/デジタル制御回路(CPU、シリアル変換)
- 取得したデータは ASCII 文字列データとして USB を

介して EPICS IOC が動作しているシングルボードコンピュータである NanoPi NEO[5](以下、SBC)に送られ、電源供給も USB から行われる。

Figure 3 にアンプ部のアナログ検出部の回路図を示す。

2.1.3 アナログ検出回路

アナログ検出回路は、基本的に参考回路をそのまま使用し、今回の仕様に合わせて抵抗やコンデンサの係数、オペアンプ電源電圧を変更するだけにしてある。オペアンプは、日清紡 NJM4580DD[6]を使用している。この回路において検出部へは 4 V/8 mA の電源供給を行う必要があるが、供給する電源ノイズが性能に大きな影響を与えるため2段のCRフィルタに変更することで対応した。また、ADC が確実にデータ取得するためにピークホールド回路を追加してある。ホールド/リセット信号はCPUで生成して、ホールド中にADC読込を行うようプログラムしている。

2.1.4 アナログ電源回路

開発初期は設計した回路が動作するか確認するためにユニバーサル基板に実装して検証してみたが、電源からのノイズを抑えることができず、何通りか配線パターンを変更してみたが改善されなかった。そこで市販品のDCDCコンバーター[6]を使用することで宇宙線観測が測定可能なレベルまでノイズを抑えることが可能となったが、価格の問題で今回は採用を見送ることにした。最終的には±12 V 出力絶縁 DCDC コンバーターとリニアレギュレーターで必要な電圧を生成することで市販品のDCDCコンバーターと同等の性能が得られるようになった。

2.1.5 ADC/デジタル制御回路

取得した測定電圧をADCでデジタル化し、ASCII文字列データ化してSBCに送信する。ADC取得時にはピークホールドし、終了後にホールドリセットを行う処理を繰り返すことでデータ取得を行う。データ取得間隔は、タイマー等を使用せずにCPUの処理速度に依存するよう

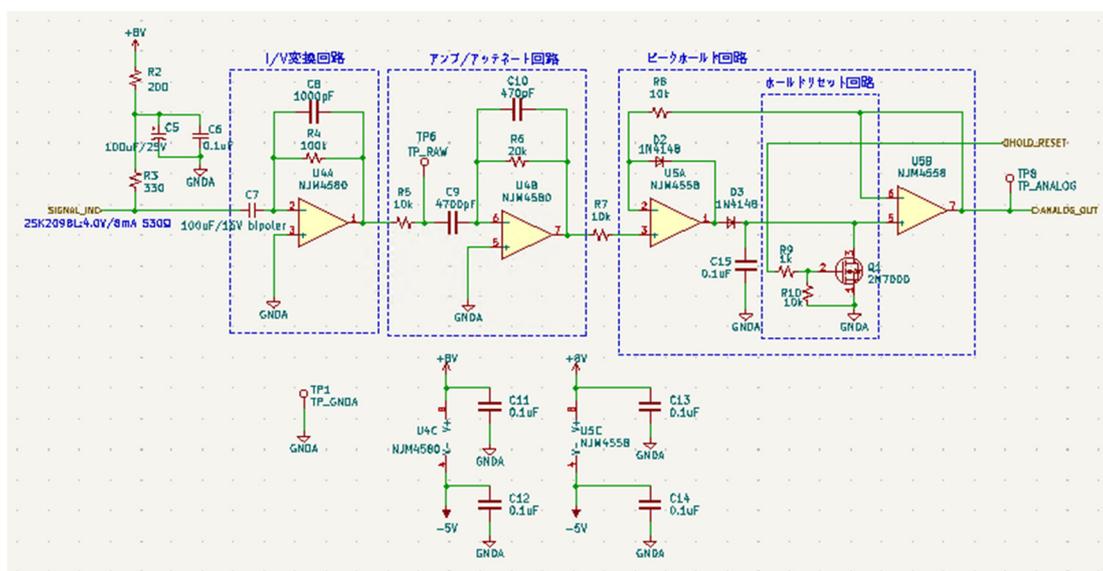


Figure 3: Amplifier analog detection circuit diagram.

にしている。取得したデータは一定間隔で SBC に自動的に送信され、送信間隔はコマンドにより設定可能となっている。ADC/デジタル制御回路は、1ch 版と多チャンネル版では仕様が異なっており、詳細は別途記述する。

2.2 1ch 版と多チャンネル版

現システムにおいて、1ch 版と多チャンネル版の 2 種類のシステムが存在している。1ch 版はテスト用に製作したものを単独測定点でも使用可能にしたものである。多チャンネル版は、複数の測定点を同時に測定する場合に使用する。現在使用している多チャンネル版は 4ch を 1 つのアンプ部で使用可能になっている。

1ch 版と多チャンネル版の違いを Table 1 に示す。

Table 1: Differences of 1ch and Multi-Channel Versions

	1ch 版	多チャンネル版
ch 数	1	4
CPU	Microchips ATtiny402	Raspberry Pi PICO (RP2040)
ADC	CPU 内蔵	Microchips MCP3204
ADC bit 数	10	12
サンプリング数/秒	約 3.3k	約 20k/1ch
外部トリガー	非対応	対応
インターロック出力	非対応	対応

CPU 制御用ファームウェアは、それぞれの環境に対応したものを別途作成し、ソースコードの互換性はない。

3. 実機試験と基板係数調整

3.1 ユニバーサル基板実装での試験

動作実証用にアナログ回路をユニバーサル基板で実装し、市販品の DCDC コンバーターを使用したテスト機を使って cERL 電子銃単独運転で動作検証を行った。

Figure 4 にユニバーサル基板へ実装したアンプ部と検出部、SBC を含めた一式の画像を示す。



Figure 4: Universal board mounting version.

cERL 電子銃付近のスクリーン近傍に検出部を設置し、アンプ部と SBC は放射線の影響が少ない箇所に設置し

て、スクリーン挿入時に発生する放射線を測定する。アンプ部は、参考回路をそのまま使用している。アンプ部から出力されるデータは、1000 サンプリングした ADC 値の最大値を約 25 Hz で送信するプログラムが書き込まれている。送信されたデータは、EPICS IOC で受信してレコード化する。

この実験により、スクリーン挿入時には ADC が飽和してしまうので、ゲイン調整が必要なが判明した。また、データの一部を時間方向に拡大してみたところ、cERL のトリガーである 5 Hz 毎にデータが分離できていることが確認できたので、応答速度は問題ないことが見てとれた。

3.2 プリント基板制作と係数調整

回路としては動作に問題ないことが確認できたので、プリント基板を製作して動作確認を行った。制御用ファームウェアも更新し、サンプリング間隔は 1 秒固定とした。出力データもサンプリング間隔で取得したデータの最大値、平均値、積算値をまとめて出力するように修正した。最大値はバースト出力のロス、平均値は CW 出力や暗電流のような DC 出力のロスを検出することを想定している。積算値は最大値がノイズに埋もれてしまうような状態でも測定の指標となると考えている。また、積算値はある定数以上のデータのみを積算するようにしてある。これは外乱ノイズとして検出される宇宙線のある程度除去するための対策である。

Figure 5 に 1ch 版プリント基板の画像を示す。



Figure 5: Printed circuit board mounting version(1ch).

3.2.1 放射線実験棟でのゲイン調整測定

プリント基板制作後にアンプ部のゲインを決定するために、KEK 放射線実験棟にて線源として Co^{60} を使用した実験を行った。測定は、線源から検出部までの距離とゲイン調整用の抵抗を変更しながら、その都度 5 分程度測定データを取得していった。

Co^{60} の線量は Aloka シンチレーションサーベイメーター (TCS-171) で測定した。

- 使用線源: Co^{60} 0.354 $\mu\text{Sv}/\text{m}^2$
(1.17 MeV, 1.33 MeV)

測定結果を Table 2 に示す。この測定結果から、ゲインは 2 にすることにした。

3.2.2 検出波形の時定数調整

放射線測定において、放射線量が高くなってくると検出イベントが重なるパイルアップ現象が発生する場合がある。これは検出後の信号減衰時間が長くなると発生する可能性が高くなるので、検出精度を上げるためになるべく短くすることが必要となるが、同時に検出感度も下がることが多いので調整が必要となる。今回の使用目的に

は、参考回路のままでは時定数が長過ぎるのでコンデンサ容量をゲイン低下が発生しない範囲で時定数の調整を行った。調整する部品は C9、C10 で、波形の時定数を決定するコンデンサとなっている。TP6 は I/V 変換後の波形、TP8 は ADC 取得で使用されるピークホールド時の波形が出力されるテストピンである。TP8 の mV 換算は、C9 が 1000 pF、C10 が 100 pF 時、TP6 の電圧 340 mV を 1 としたとき、各設定の TP6 との電圧比と TP8 の電圧を掛けたものである。この値が C9 が 10000 pF、C10 が 1000 pF と近いものを選別する。

Table 2: Gain Adjustment Experiment Results

ゲイン	距離 [m]	$\mu\text{Sv/h}$	ADC MAX	ADC AVG	ADC CNT
10	0.1	2700	200~270	13	7200~7500
	0.2	700	180~220	7~8	4500~4800
	0.4	220	130~200	3	1700~1800
	0.5	100	130~200	3	1100~1300
	1	30	60~150	0~1	250~350
1	0.1	2700	35~45	1	70~110
	0.2	700	30	0	15~40
	0.4	220	20~30	0	5~15
	0.5	100	20~30	0	0~10
	0.1	0.1	2700	3	0

Table 3 に時定数調整を行った際のコンデンサ容量と発生した時間と電圧の関係を示す。

Table 3: Amplifier Time Constant and Capacitor Adjustment

C9 [pF]	C10 [pF]	TP6 [mV]	TP6 [μs]	TP8 [mV]	TP8 mV 換算
1000	100	340	336	91	91
1000	470	224	272	54	82
1000	1000	304	360	124	139
4700	100	142	380	131	313
4700	470	106	356	90	289
10000	1000	182	696	167	312

時定数変更前後の検出波形を Fig. 6, 7 に示す。

以上の結果から、C9 は 4700 pF、C10 は 470 pF を採用することとした。

3.2.3 多チャンネル版作成

1ch 版での実験結果をもとに多チャンネル版を作成した。

Figure 8 に多チャンネル版システム構成を、Fig. 9 に多チャンネル版アンプ部の写真を示す。



Figure 6: C9 10000 pF, C10 1000 pF detected waveforms.

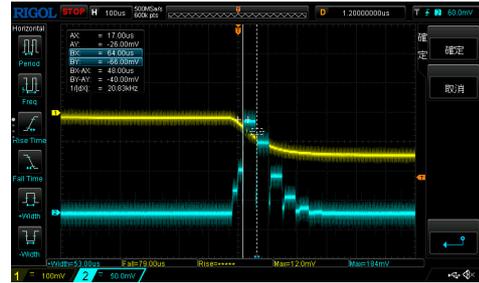


Figure 7: C9 4700 pF, C10 470 pF detected waveforms.

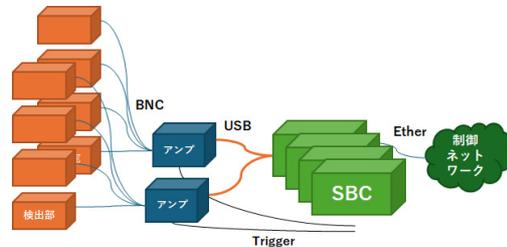


Figure 8: Multi-channel system configuration diagram.



Figure 9: Multi-channel amplifier.

CPU 用ファームウェアは、運用に必要なコマンドを追加し、トリガー信号に同期してデータ出力が行えるように修正した。また、トリガーから指定個数分データの最大値を出力する機能を追加したことで、ほぼビーム由来のデータのみを扱えるようになり、対ノイズ性能も向上させた。他にもデバッグ用として、CPU 内にバッファしているトリガー一問の全 ADC データの出力も可能にした。

4. 運用試験と実運用

4.1 運用試験と実運用

cERL での運用時は、検出部、アンプ部、SBC は全てシールド内に設置し、アンプ部と SBC は放射線の影響を受けにくい架台下の床面に設置した。トリガー信号は、

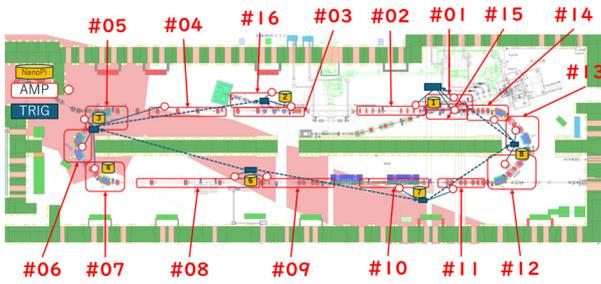


Figure 10: Loss monitor layout (2025/6/21~7/20).



Figure 11: Data display screens.

GigE カメラで使用している信号を分岐したものの使用している。インターロックは当面使用しないので配線していない。

2024/11/21~12/20 の cERL 運転において一部区間で運用試験を行い問題が無いことが確認できたので、全周に配置して実運用に使用することにした。

2025/6/13~7/4 の cERL 運転において、全周に多チャンネル版アンブ部 16 と検出部 64 を設置した。また、トリガー信号は使用しなくなった GigE カメラから全てのアンブ部に分配するように変更した。この運用において、機械学習を用いたビーム調整への利用や、今まで検出できなかった電子銃の光陰極へ入る迷光による微弱な DC ビームの一部が加速/輸送されることで発生する放射線が見えるなど、本来の主ビームのロス検出以外の用途にも使えることがわかってきた。

アンブ部と検出部の設置箇所を Fig. 10 に示す。

4.2 運用画面表示

データ表示用に CSS[7]と grafana[8] で表示画面を作成した。CSS は BPM モニターで見られるような表示方式で全検出部の瞬時値を表示している。CSS 画面の上部グラフは、最大値と積算値、下部にはトリガー値と平均値を表示している。grafana は各アンブと測定方法毎に時系列データを表示する。

Figure 11 に表示例を示す。

5. まとめと今後の課題

本開発によって、cERL のビームロス発生箇所の特定が容易になり、ビーム調整においても測定点が増えたことでロス減少による輸送効率の向上や機械学習による自動調整への応用に利用可能なことから有用性を示すことができた。

今後の課題として以下の様な項目が考えられる。

- インターロックへの応用
- 全データ出力機能
- ファームウェア更新の半自動化
- アンブ部の表面実装版
- 検出部、アンブ部の製造資料作成

特にインターロックへの応用は重要な課題だが、応答時間や各種閾値条件等調査が必要なので、今後のコミッションングで確認していく必要がある。

参考文献

- [1] <https://gradin.jp/product/1984.html/>
- [2] <https://epics-controls.org/>
- [3] <http://doku.bimyo.jp/preamp/index.html>
- [4] <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S6775.html>
- [4] https://wiki.friendlyelec.com/wiki/index.php/NanoPi_NEO
- [5] <https://strawberry-linux.com/catalog/items?code=13260>
- [6] <https://www.nisshinbo-microdevices.co.jp/ja/products/operational-amplifier/spec/?product=njm4580>
- [7] <https://www.controlsystemstudio.org/>
- [8] <https://grafana.com/>