

SuperKEKB 入射器のノイズ対策-3

NOISE COUNTERPLAN OF SuperKEKB INJECTOR LINAC-3

矢野喜治 *^{A)}、明本光生 ^{A)}、荒川 大 ^{A)}、片桐広明 ^{A)}、川村真人 ^{A)}、中島啓光 ^{A)}、
夏井拓也 ^{A)}、本間博幸 ^{A)}、松下英樹 ^{A)}、松本修二 ^{A)}、松本利広 ^{A)}、三浦孝子 ^{A)}
Yoshiharu Yano*^{A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Dai Arakawa^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Masato Kawamura^{A)},
Hiromitsu Nakajima^{A)}, Takuya Natsui^{A)}, Hiroyuki Honma^{A)}, Hideki Matsushita^{A)}, Shuji Matsumoto^{A)},
Toshihiro Matsumoto^{A)}, Takako Miura^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

Abstract

The electron-positron injector at KEK started operation in 1982 as the electron injector for the PF ring, and after various additions and modifications, it is currently in operation as the injector for PF, PF-AR, and SuperKEKB. The injector has a variety of devices, but the 60 RF power supplies generate significant noise during Linac operation. This noise causes equipment malfunctions and reduces beam quality. In addition, the commercial AC voltage fluctuates by several percent, so each device has its own countermeasures, but unexpected fluctuations can still degrade the beam quality. Here, we used a noise monitor and AC100(V) monitor with a Raspberry Pi to record common-mode noise and AC100(V) fluctuations in a distribution board to investigate the causes of equipment malfunctions and other problems.

1. はじめに

機器の誤動作は機器そのものが発生するノイズや外部から混入するノイズが制御回路に入る事で引き起こされる。Linac 立上げ当初はサイクロトロンスイッチング時に発生するノイズが自身のモジュレータ電源の誤動作の原因になっていた。様々な対策を取った結果現在は運転に支障が無い程度まで誤動作の発生頻度を抑えている。しかしノイズが原因と思われる誤動作が完全に無くなった訳では無い。発生頻度が低く不定期で起こる誤動作の原因はノイズであると思われるが犯人探しは非常に困難である。その為のツールとして Raspberry Pi を使ったノイズモニタ (EMI モニタ) を開発して運用している [1]。その結果陽電子ターゲットに設置されたフラックスコンセンレータ (FC) のモジュレータが発生するノイズが広範囲に拡散し A セクタ、B セクタ、1 セクタ、2 セクタのモジュレータのアース線にも影響を及ぼしている事が分かった。FC の負荷はギャラリーの地下部分の加速管室に設置されており 10 パラのケーブルでモジュレータと接続されている。電源線、アース線共に通常のクライストロンモジュレータと同じ扱いをしていたため非常に大きなノイズが拡散されていた。FC のシステムをノイズカットトランスで他の機器から分離する事でノイズの拡散を抑える事が出来た [2-4]。

2. RF 信号系の全体図と電源の給電網

Figure 1 に RF 信号系の全体図と電源の給電網の様子を示す。一般的な機器には D 種アースのみ、クライストロンモジュレータには A 種アースと D 種アースが以下の仕様で配線されている。

- A 種アース；実験機器用のアースで機器の近くの壁にアース端子を設け、壁の外で接地している。

- D 種アース；電源等の機器の安全を確保するため変電室から電源ラインと共にケーブルラック上に配線されている。(接地抵抗は 100 Ω 以下) 立上げ当初に設置された 1~5 セクタのアース線はこのルールに沿って布設されている。しかし増設に伴う機器に関してはこのルールが適用されておらず A 種アースと D 種アースがケーブルラック上に配線されており A,B,C セクタのクライストロンモジュレータには専用の A 種アース端子が設置されていなかった。設備が完成している現状では必要な A 種アース端子 22 箇所を新設する事は不可能であるため以下のルールで A 種アース線の配線替えを行った [4]。
 - ケーブルラックの A 種アース線は使用しない。
 - クライストロン組立ホールの A 種アースは新設し専用の端子台を設置する。
 - A,B,C セクタに関してはセクタ毎に A 種アース用の金属管を設置し、中のケーブルを近傍の A 種アース端子台に接続し A 種アース線とした。
 - 各クライストロンモジュレータの分電盤の下に A 種アース専用の端子台を設置しモジュレータ用の A 種アースとした。

3. 電源電圧とノイズ

3.1 電源ラインモニタとノイズモニタ

ノイズ信号は電源線、アース線、信号線などのケーブルに検出コイルを巻きつけたフェライトコアを設置して検出信号をノイズモニタの RF 入力チャンネル (ch-1, ch-2) から取り込まれる。電源電圧の変動が機器の誤動作に与える影響を調べる為電源ラインモニタを開発した。RMS/DC コンバータを使用して交流電圧の実効値を直流電圧に変換するモジュールを製造した。この直流電圧はノイズモニタモジュールのアナログ入力チャンネル (ch-3, ch-4) で取込まれる [1]。ノイズモニタの ch-1 に設定レベル以上の信号が入力されると全チャンネルのデータを取込む

* yoshiharu.yano@kek.jp

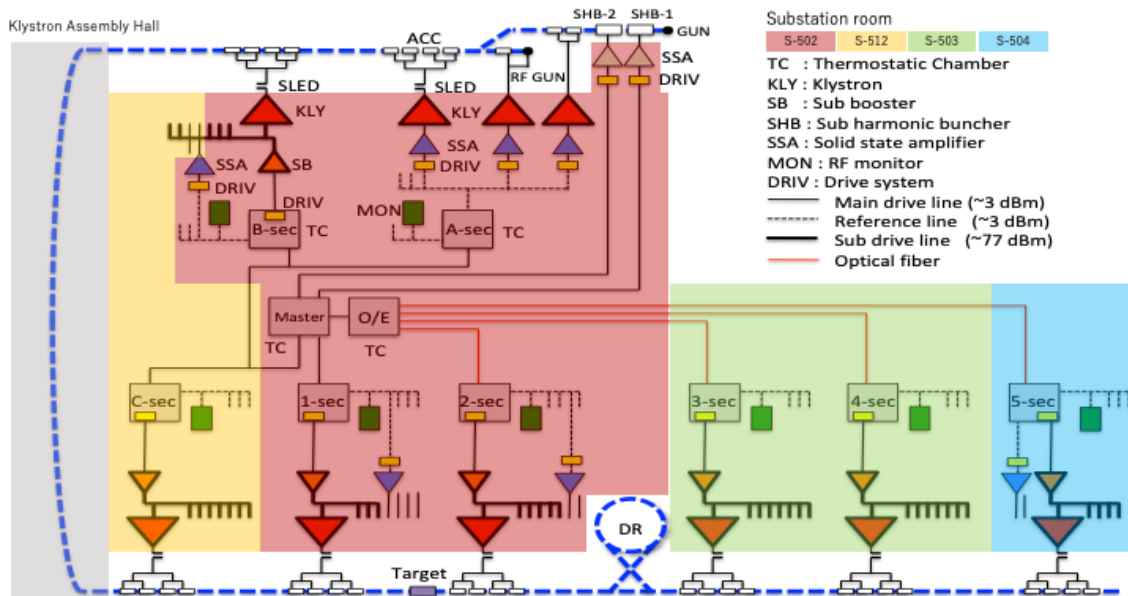


Figure 1: Block diagram of high frequency drive system and power supply network.

セルフトリガモードで運用した。クライストロンは50Hzで運転しているのでノイズは20 msec毎に発生している。ノイズモニタは10sec間の平均値を1点として読み出している。電源ラインモニタとノイズモニタを分電盤に設置した様子をFig. 2に示す。

3.2 マスター分電盤のD種アース線で観測されるノイズの電圧依存性

電源電圧(AC200)とマスター信号源用の分電盤(マスター分電盤)のD種ノイズ(MasterD)の24時間の変動の様子をFig. 3に示す。ここでAC200は電源電圧、AC200-AVは電源電圧の移動平均(50分)である。散布図を見ると弱い相関が見られる。相関の時間変化を見るためAC200とMasterDの移動相関係数(母数;500点)をプロットしたところ全期間で弱い相関が見られた。しかしサンプルデータは非常にバラついているので直接移動相関係数を計算しても相関が見えにくくなってしまった。緩やかに変動するデータ間の相関を見るため移動平均を取ったデータ間で移動相関係数をプロットした。最下段のグラフを見ると2データ間には強い相関があり時折相関が弱くなる時が現れている。これは電源電圧に強い相関を持ったノイズがマスター分電盤のD種アース線に入っている事が分かる。相関が弱まった時期はノイズ発生源で電源電圧との相関が弱くなっているか他のより強いノイズが混入していると思われる。

3.3 入射器内の電源電圧変動

電源ラインモニタはサブブースタ(A,B,C,1,2,3,4,5セクター)の分電盤のAC100VとAVRの100Vにセットしノイズモニタの3ch, 4chで取り込んでいる。同分電盤のD種アース線にはフェライトコアを使ったコモンモードノイズ測定用のフェライトコア

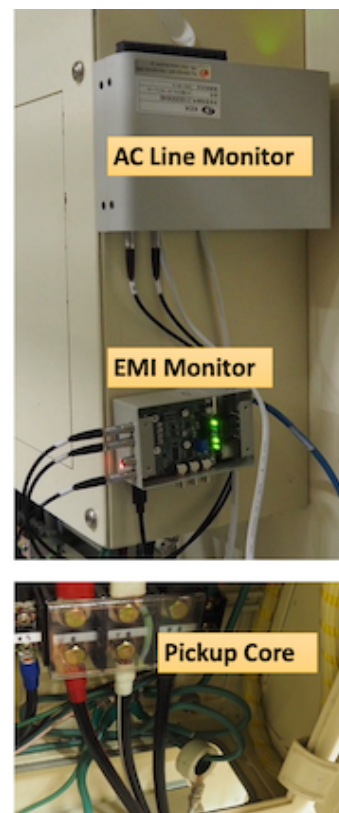


Figure 2: Photograph of AC line monitor, noise monitor and pickup core.

をセットしている。2次側は2ターンのコイルとしている。入射器の電源電圧の場所による違いを見るために全サブブースタの分電盤のAC100Vの1日のデータを比較した。サブブースタA(SBA)のデータ

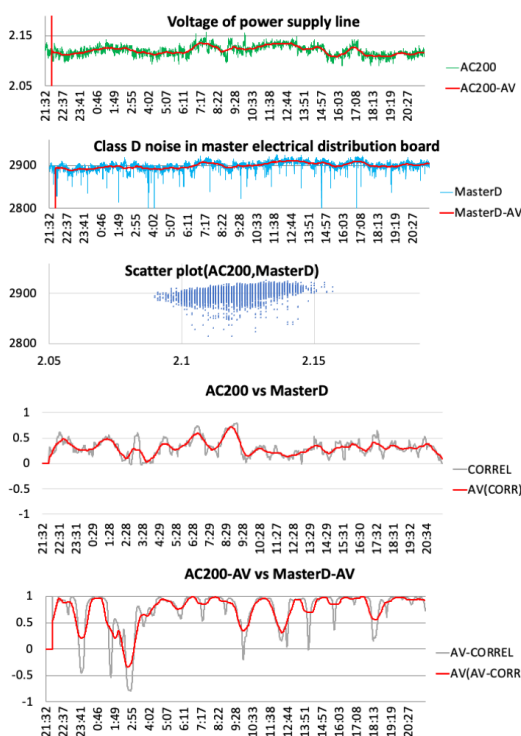


Figure 3: Voltage dependence of Class D noise in master electrical distribution board.

とその他のデータの差をグラフ化したものを Fig. 4 に示す。グラフ上の1点は2分間(100点)の移動平均を取ったものである。SBAとSBBのAC100Vの変動パターンはほぼ同じである。SBC、SB2、SB3、SB4、SB5の変動はSBAに対して同じ様な変動を示している。SB1もほぼ同じ様な変動をしているが9:00~12:00の間だけステップ的な変動が見られる。これはSB1の電源ラインに接続された他の機器のON/OFFで電圧降下が生じたものと推測される。SBAのような電圧変動は入射器に限ったものではなく所内全域で起きており測定箇所によってSB1の様なパターンが観測される。SBAのような電圧の変動パターンは東京電力側で起きたものでトランスのタップ切替えにより生じているものと思われる。SBAとSBCの差のグラフを見ると6:00を境にジッタ成分が増加しているのが分かる。このパターンは土曜日と日曜日を除いてほぼ毎日起きている。より長期間のデータを観測するとジッタ成分が火曜日の22:00から増加して土曜日の13:00におさまる時と、水曜日の21:00から増加して土曜日の13:00におさまる2つのパターンが見られた。

4. サイラトロンのリザーバ電圧とノイズ

今季9月16日の立上げ以降KL-A1Bの制御システムの誤動作が1日に1回程度発生していた。誤動作の発生が続くため9月26日にサイラトロンのリザーバ電圧を調整したが治らなかったため9月27日に再度調整を実施したところ誤動作の発生は無くなった。この事例について9月16日から9月30日

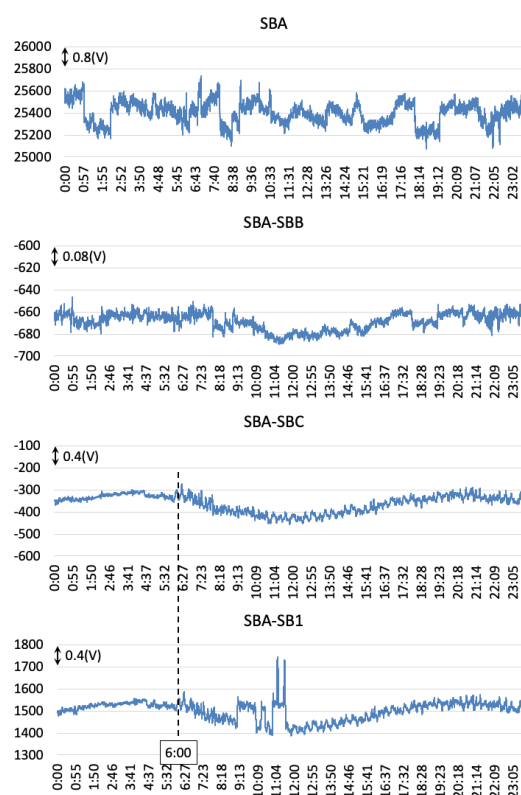


Figure 4: Daily time variation of power supply voltage.

のKL-A1Bの制御用電源ケーブルのコモンモードノイズ(KL-A1B-C)と電源電圧(AC100V)の関係を調べたところ Fig. 5の様な調査結果が出た。9月18日にKL-A1B-Cが明らかに大きくなっている。この日はリザーバ電圧の調整を実施したと記録にあった。9月26日の調整でノイズは僅かに下がっているが誤動作が発生したため9月27日に再度調整した。この調整でノイズレベルは明らかに下がっており誤動作も治まった。この期間の電源電圧とノイズの移動相関係数を計算すると下の2つのグラフのようになる。上のグラフは移動相関係数(母数;100点)でノイズが大きい期間は相関はほぼ0で、ノイズが小さい期間は弱い相関が見られた。下のグラフは移動平均(母数;100点)の移動相関係数(母数;100点)でノイズが大きい期間は相関は不定で、ノイズが小さい期間は強い相関が見られた。サイラトロンのリザーバ電圧の調整でAC100VとKL-A1B-Cの相関係数が変化する事はKL-A1Aでも再現している[3]。ただしKL-A1Aの場合はこの相関係数が-1になる所が異なっている。この違いの原因はまだ分かっていない。今後計測箇所を増やし調査を進めると共にこのメカニズムを解明したい。

5. まとめ

機器の誤動作の原因を究明するためにノイズモニタと電源ラインモニタを運用しているが当初の目的である誤動作と突発的なノイズとの対応づけはまだ出来ていない。しかし電源電圧の細かな変動と

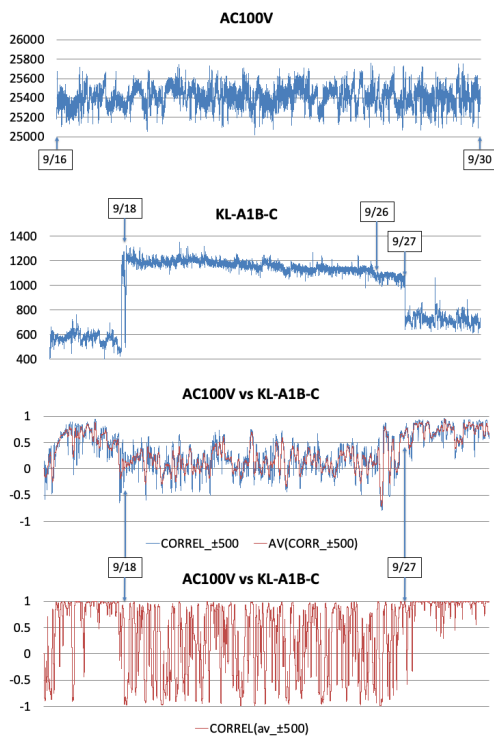


Figure 5: Voltage dependence of Common mode noise in control power cable.

ジッタ成分の増減があるパターンで起きている事が分かった。ジッタ成分の増減がビーム性能に直接結び付く証拠はまだ得られていないが過去に陽子加速器のビーム取出し効率の悪化と精錬所の稼働時間が関連していた事例があるため注視している。このモニタシステムを効果的に活用する為には測定箇所が足りておらず更なる増設が必要である。最後にこのモニタシステムを構築するにあたり、データの取込みに関する Raspberry Pi のプログラミングとデータ表示及び解析に関するツールの開発においてお世話になった関東情報サービス（株）の大房氏に感謝します。

参考文献

- [1] Y. Yano *et al.*, “SuperKEKB 入射器のノイズ対策-2” Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-12, 2021, Online, Japan.
- [2] T. Natsui *et al.*, “KEK 入射器棟の FC 電源におけるノイズ低減について” Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, 2022, Online, Japan.
- [3] Y. Yano *et al.*, “SuperKEKB 入射器の高周波制御システム” Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11, 2014, Aomori, Japan.
- [4] Y. Yano *et al.*, “SuperKEKB 入射器のノイズ対策” Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan.