

# SuperKEKB 入射器のノイズ対策

## NOISE COUNTERPLAN OF SUPERKEKB INJECTOR LINAC

矢野喜治\*、明本光生、荒川 大、片桐広明、川村真人、Qiu Feng、中尾克己、  
中島啓光、本間博幸、松下英樹、松本修二、松本利広、三浦孝子

Yoshiharu Yano\*, Mitsuo Akemoto, Dai Arakawa, Hiroaki Katagiri, Masato Kawamura, Feng Qiu,  
Katumi Nakao, Hiromitsu Nakajima, Hiroyuki Honma, Hideki Matsushita, Shuji Matsumoto,  
Toshihiro Matsumoto, Takako Miura

High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

### Abstract

The KEK electron-positron injector LINAC has begun to work as electron injector of the PF ring in 1982. We modified it variously, and it's working as the injector of SuperKEKB at present. We modified it variously to achieve low emittance beam in Linac. We found out that a new RF monitor contains unexpected noise. The noise entered at an air intake of a RF monitor. We found out that a noise source is RF where it leaked from a cable splice of a sub-drive line cable. We'll report the investigation system for noise mixed part and investigation method.

### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構の電子陽電子入射器 (Linac) は 1982 年に PF リングの電子入射器として稼働を開始したがその後 3 回大きな改造を実施した。

- 1986 年に TRISTAN の電子陽電子入射器として運転するために陽電子発生部を増設。
- 1998 年に KEKB の電子陽電子入射器として運転するために SLED を増設し RF パワーを増強。
- 2016 年に SuperKEKB の電子陽電子入射器として運転するためにダンピングリングを増設。

1986 年の増設では建屋も増築され建築初期の 1~5 セクターの上流に A~C セクターが付加された。1998 年の増設では大電力クライストロンモジュレーターの制御システムも更新され PLC とタッチパネルが導入された [1]。この制御システムは約 10 年間運用された。制御システムが古くなると保守部品の確保が困難になり 2011 年には新たな制御システムを構築した。新制御システムは CPLD, FPGA, MPU 等で構成されており加速器の制御に使われている EPICS に対応している [2]。

マスターオシレーターで発生した 2856 MHz の RF (CW) を  $4 \mu\text{s}$  のパルスに成形し RF の出力と位相を制御するシステムを励振器 (Drive system) と呼んでいるが、1998 年の改造ではそれぞれの機能を持った NIM モジュールの組合せで構成されていた。より良いビームを供給するために 2006 年には IQ 変調器と IQ 検出器を FPGA で制御する方式を取り入れた励振器を開発した [3] [5] [6]。1998 年に導入された RF モニターは当時の新しい規格である VXI を採用していた [4]。このモニターではクライストロンの出力、SLED の出力、加速管出口の信号を常時観測し

ていた。それらのトレンドを監視することでビームに異常が起きた場合の原因究明に非常に役立ってきた。当時は約 1 時間毎に電子と陽電子を切り替えてビームをリングに入射していたが、ルミノシティ向上のため入射ビームは 20 ms のパルス毎に電子と陽電子を切り替えて入射出来るようにした。それに伴い新しいモニターシステムが必要となり IQ 検出器と FPGA を使用した RF モニターを開発した [5] [7]。

### 2. 基準信号に混入した RF 信号と制御システムの誤動作

Figure 1 に RF 信号系の全体図を示す。マスターオシレーターで作られた 2856 MHz の RF は比較的距離が近い A,B,C,1 セクターの恒温槽には位相安定形ケーブルで、距離のある 2,3,4,5 セクターの恒温槽には位相安定光ファイバーケーブルで配信されている。この信号系をメインドライブラインと呼んでいる。各セクターの恒温槽には励振器 (Drive system) が設置されサブブースタークライストロンをドライブしている。サブブースタークライストロンは 8 台の大電力クライストロンをドライブしている。この信号系をサブドライブラインと呼んでいる。各クライストロンの出力は SLED で増強された後、4 本の加速管に導かれる。サブブースターから独立したクライストロンも複数本あり、励振器の出力を半導体アンプ (SSA) で増幅し大電力クライストロンをドライブしている。恒温槽内で増幅されたリファレンス信号は位相安定形ケーブルでセクター当たり 4 架のモニターラックに配信される。この信号系をレファレンスラインと呼んでいる。モニターラックに設置された新しい RF モニターでレファレンスラインの RF 信号を観測したところ  $4 \mu\text{s}$  のパルス波形が混入していた。この RF 信号は本来 CW 信号であるためパルス波形が観測されることはない。しかしほぼ半

\* yoshiharu.yano@kek.jp

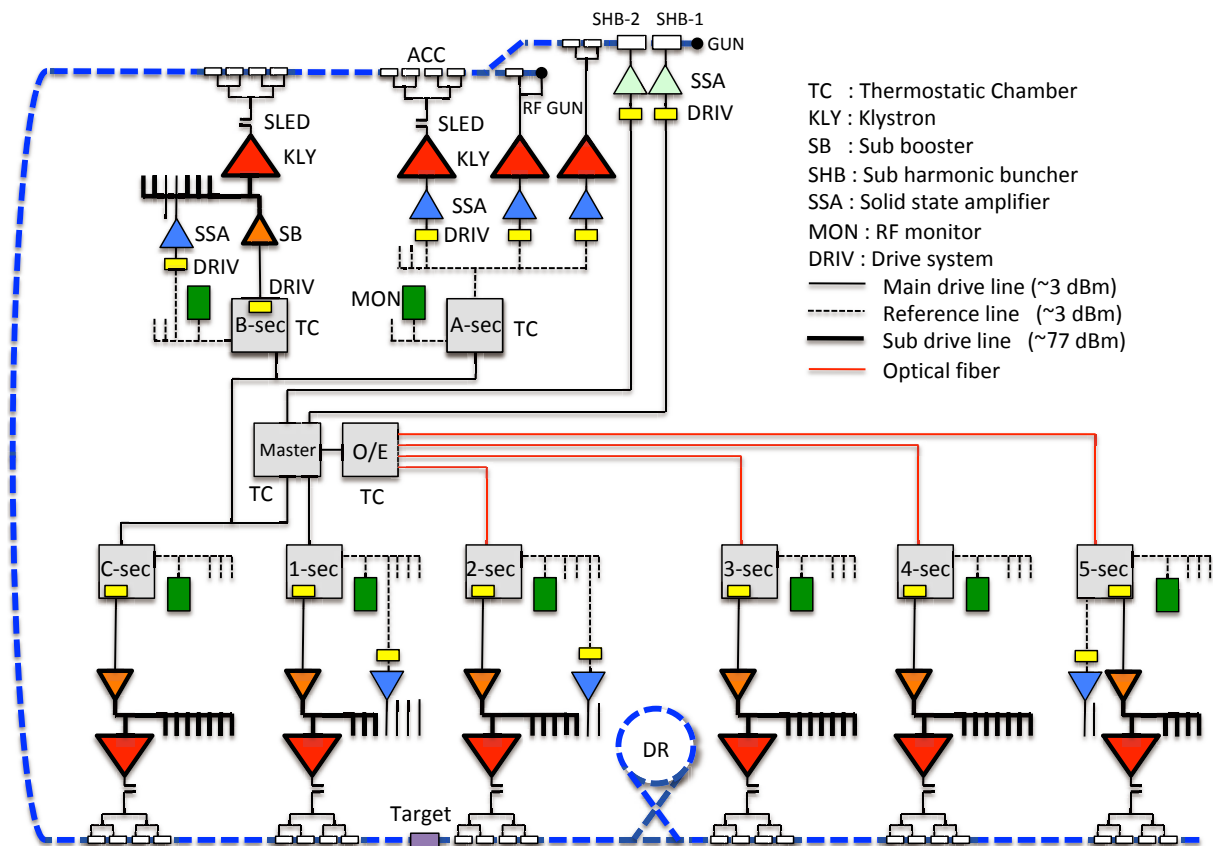


Figure 1: General drawing of a high frequency control drive system.

数の RF モニターのレファレンスラインで  $4\mu\text{s}$  のパルス波形が観測された。レファレンス信号に予期しない信号が混入しているとこの信号を基準に行う全ての測定に懐疑が生まれるため原因を突きとめ問題を排除しなくてはならない。

新制御システム開発時にはモジュレーター電源のサイラトロンが発するノイズにより誤動作が多発していたが、様々な対策を実施してほぼ誤動作は収まった。しかし発生頻度は低いが今だに次のような誤動作が起きている。

- 制御不可となり制御システムの再起動で復活。
- 制御電圧変更コマンドの記録はないが電圧が変更されている。

これらの誤動作は発生頻度が2~3ヶ月に1~2回程度と低いので完全な解決には至っていない。ただ、サイラトロン波形のジッタが大きくなると誤動作の発生頻度が上がることは分かっている。この時はサイラトロンのスイッチングが不安定になっておりノイズの発生も非常に多くなっている。この場合リザーバー電圧を調整する事でこの状態を回避できるがノイズの混入経路を特定し対策を取らなくては根本的な解決にならない。

### 3. ノイズ混入経路の調査

#### 3.1 ケーブルの調査

ノイズの侵入経路が電源線、アース線、信号線などケーブル経由であることを疑いそれらのケーブルに乗ったノイズをオシロスコープで調査したが RF パルスの混入経路を特定することは出来なかった。また、新制御システムの誤動作を引き起こす疑いのあるノイズも特定できなかった。しかし調査の過程で Linac の各電源類が設置されているクライストロンギャラリーのアース線の配線に問題がある事が分かった。クライストロンギャラリーの機器のアースは A 種接地と D 種接地が採用されている。

- A 種接地；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。（接地抵抗は  $10\ \Omega$  以下）
- D 種接地；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  $100\ \Omega$  以下）

1~5 セクターは A 種接地、D 種接地が正しく配線されていたが、1986 年に増設した A、B、C セクターとアーク部のアース線が正しく配線されていなかった。増設した場所は A 種接地線、D 種接地線共に変電室から 2 本のアース線がケーブルラック上に並行して布設されていた。この状態を放置すると大電力

のクライストロン電源で発生したノイズがD種接地線を経由してA種接地線に回り込み機器の誤動作を誘発する恐れがあるため放置できない。

### 3.2 電波ノイズの調査

RF モニターに混入するノイズ調査の過程で以下の症状が見られた。

- ・ユニットの入っているラック内のケーブルの取り回しを変えるとノイズの様子が変化する。
- ・ユニットの入っているラックの後ろ扉の開け方でノイズの様子が変化する。

この事からユニット内に電波が侵入していると推測し Fig. 2 に示すユニット後部にある冷却ファンをアルミホイルで塞いだところパルスノイズが減少した。この冷却ファンの穴径が約 8 cm、クライストロンの周波数が 2865 MHz で波長が約 10 cm であるためここから RF ノイズが侵入していた。対策は冷却ファンと前面の空気取り入れ口にシールドファンフィルターを取り付ける事である。また前面パネルには機器操作のためのタッチパネルが付いており此処からもノイズの侵入が認められた。モニターラック全体を電磁的にシールドすればノイズの混入は避けられるが発生源を特定しノイズを止めなければ根本的な解決にはならない。



Figure 2: Rear panel of RF-monitor.

## 4. RF ノイズ発生源の調査

RF ノイズの漏洩箇所を調査するために Fig. 3 に示すホーンアンテナ、同軸導波管変換器及びピックアップコイルを使用した。調査手順は次に示す通りである。

- ・ホーンアンテナで電波の飛んでくる方向を推測する。
- ・同軸導波管変換器で漏洩箇所を推測する。
- ・ピックアップコイルで漏洩箇所を特定する。

Figure 4 に示す様にノイズ調査中のモニターラックからホーンアンテナで漏洩電波の飛んでくる方向を推測した。この結果サブドライブラインの方向性結



Figure 3: Coaxial waveguide converter, Horn antenna & Pickup coil .

合器の取付部に締め付け不足がある事が判明した。それらの場所を増し締めしその場所の漏洩は止める事ができたが RF ノイズは根絶できなかった。

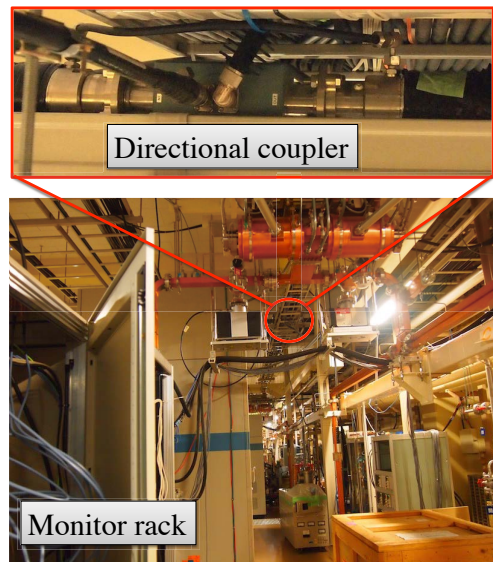


Figure 4: Monitor rack & Directional coupler.

更に調査したところ Fig. 5 に示すサブブースター出力ケーブルのコネクターから漏洩がある事が分かった。漏洩箇所を銅テープでシールドしたが漏れを検知する場所がシールドの端に移動するだけで漏れを止める事はできなかった。コネクターの絶縁を



剥がし更に調査を進めるとケーブルの外部導体とコネクタの隙間から漏れている事が分かった。サブドライラインのケーブルは三菱電線工業製の「50 Ω位相安定形 SF 同軸ケーブル」SFZE50-13-P で外部導体は外径 41 mm のアルミニウム管である。このケーブルのコネクタは外部導体と内部導体それぞれにネジを切ってコネクタをねじ込む構造になっている。位相安定化のためにケーブル内部にガスを入れる構造になっているのでガスシールド用の O リングは使われている。しかし RF のシールドはネジの噛み合わせに頼る構造になっている。サブドライラインのパワーは約 50 kW と大きい噛み合わせ部分の隙間から RF が漏れている事が分かった。同様の箇所はサブブスター、方向性結合器の入出力部合わせて約 130 箇所ある。確実に漏洩を止めるためこの隙間を銀ペースト (TK ペースト CN-3160L 化研テック製) で埋めた。その結果 RF モニターの冷却ファンにシールドファンフィルターを取付ける前の状態でもパルスノイズは観測されなくなった。

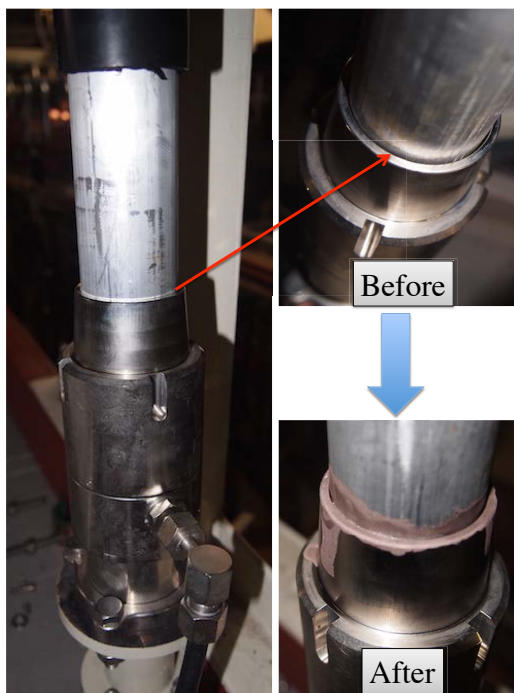


Figure 5: Gap of a cable connector and gap after an improvement.

## 5. まとめ

電波ノイズに関してはほぼ解決したが、新制御システムの誤動作の発生は完全には解決していない。ケーブル調査の過程でアース線の取り方に問題がある事が発覚したので A、B、C セクターとアーク部の A 種接地の再配線を行なっている。またアーク部のギャラリはクライストロン組立ホールと呼び Linac の運転とは非同期に運用している。複数台のクライストロンがあってもそれらが同期して運転されていればサイラトロンのノイズが出るタイミング

は同じなのでその時間を避けてモニター機器を運用することができる。しかし非同期の場合はお互いのノイズの影響を避けることが出来ないのでアースは別々に配線されるべきである。しかしクライストロン組立ホールの A 種接地は C セクターのそれと共通に配線されていたのでクライストロン組立ホール用の A 種接地を新たに施工した。アースの問題を解決した後にケーブルに乗るノイズの調査を本格的に実施する予定である。常時出ているノイズは比較的調査しやすいが、発生頻度が非常に低いノイズと機器の誤動作を結びつけ原因を取り除く事は簡単ではない。サイラトロンの状態によってノイズの出方が変わる事は分かっているので誤動作の原因を解明するために要所のケーブルにノイズモニターを設置する予定である。このノイズモニターはノイズのパワーを数値化し常時監視する。ノイズを監視する事で機器の安全かつ安定な運転に寄与したい。

## 参考文献

- [1] Y. Yano *et al.*, “大電力クライストロンモジュレーター制御システムの更新” Proceedings 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Hiroshima, August 6-8, 2008.
- [2] Y. Yano *et al.*, “クライストロンモジュレーターの新制御システム” Proceedings 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, August 1-3, 2011.
- [3] Y. Yano *et al.*, “小型励振系の開発” Proceedings 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sendai, August 2-4, 2006.
- [4] H. Katagiri *et al.*, “Microwave Monitor System For The KEKB Injector Lianc”, Proceeding of the Asian Particle Accelerator Conference “APAC98”. KEK, Tsukuba, Japan, 1998.
- [5] Y. Yano *et al.*, “小型励振器と RF モニターの開発” Proceedings 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, August 1-3, 2011.
- [6] Y. Yano *et al.*, “SuperKEKB 入射器の高周波制御システム” Proceedings 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, August 9-11, 2014.
- [7] H. Katagiri *et al.*, “SuperKEKB 入射器の高周波モニターシステム” Proceedings 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, August 9-11, 2014.