PASJ2018 THP008

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 µs 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]。

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 µs 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

Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan

PASJ2018 THP008



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 4µs 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 Ω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 Ω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 Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan

PASJ2018 THP008

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個所を推測する。
- ・ 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 の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

PASJ2018 THP008

剥がし更に調査を進めるとケーブルの外部導体とコ ネクターの隙間から漏れている事が分かった。サブ ドライブ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ー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ー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 ブラインのパワーは約 50 kW と大きいため噛み合わ せ部分の隙間から RF が漏れている事が分かった。同 様の箇所はサブブースター、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 部のギャラリー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
- [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.