

KEK-STF における RF 電子銃用高周波系の構築

CONSTRUCTION OF RF SYSTEM FOR RF GUN OPERATION AT KEK-STF

沼田直人^{#,A)}, 石本和也^{A)}, 堤和昌^{A)}, 明本光生^{B)}, 荒川大^{B)}, 江木昌史^{B)},
片桐広明^{B)}, 竹中たてる^{B)}, 中島啓光^{B)}, 松本利広^{B)}, 三浦孝子^{B)}

Naoto Numata^{#,A)}, Kazuya Ishimoto^{A)}, Kazuyoshi Tsutsumi^{A)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Dai Arakawa^{B)}, Masashi Egi^{B)},
Hiroaki Katagiri^{B)}, Tateru Takanaka^{B)}, Hiromitsu Nakajima^{B)}, Toshihiro Matsumoto^{B)}, Takako Miura^{B)}

^{A)} Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

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

Abstract

In the Superconducting rf Test facility (STF) at KEK, various components, such as superconducting cavity, helium refrigerator, and rf system, for International Linear Collider (ILC) have been developed. It is planned to demonstrate the beam operation of the STF2 accelerator from February 2019 and the rf system for photo-cathode rf gun is constructed. For the stable operation of the rf gun, the rf system is equipped with power meter, arc sensor, and acoustic emission sensor and the conditioning of the rf-gun cavity has been progressed. The present status of the rf system for rf-gun is reported in this paper.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)超伝導 RF 試験施設(STF)では、国際リニアコライダー(ILC)での加速器技術確立を目指し、STF2 加速器の建設が進められている[1]。STF2 加速器は、上流より常伝導空洞のフォトカソード RF 電子銃、2 台の超伝導空洞をもつキャプチャークライオモジュール、12 台の超伝導空洞をもつ CM1 クライオモジュール、CM2a クライオモジュールの構成である。これら空洞へは 1.3 GHz、RF パルス(幅 1.5 ms、繰り返し 5 Hz)のマイクロ波を供給してビームを加速する。この高周波源は、地上階に置かれた 3 基のクライストロンを用いて、各クライストロンからの RF パルスは L バンド導波管(WR650 規格)で地下加速器室にある各空洞へ供給される[2]。本報告ではフォトカソード RF 電子銃の高周波系構築及びコンディショニング状況の報告を行う。

2. RF 電子銃用高周波系

フォトカソード RF 電子銃の高周波系は、高周波源として 5 MW クライストロン(ターレス社製 TH2104C)を用いて、その RF パルスが空洞へ入力される構成である。昨年高周波系のための試験では、露製 5 MW サーキュレータは 2 MW の入力レベルを超えると、内部で放電が発生しインターロックの作動により運転を継続することができなかった。これらの結果から、クライストロンから地下加速器室内のフォトカソード RF 電子銃までの立体回路系の見直しを行った。クライストロン直後で RF パワーを分割し、電子銃直前の上流で再度合成することで 4 MW を空洞へ入力する構成へ変更した(Figure 1)。RF パワーの分割はサーキュレータの入力レベルを下げることでサーキュレータ内での放電を抑制することを目的としている。導波管及びサーキュレータ内で放電の発生頻度が高くなると、放電痕の付着の可能性は高くなり、付着が原因で放電が発生して悪循環となる。放電痕の付着は導波管の交換及び放電痕の研磨が必要となる[3]。また、導

[#] nat-numa@post.kek.jp

波管構成だけではなく、インターロックを構築して RF を高速で遮断することで導波管内の放電を最小限に抑えている。現在、モニタ構築の開発を進めると同時に、導波管内の現象理解を深めることで状況に適した高周波系の構築を行いながら RF 電子銃空洞のコンディショニングを進めている。

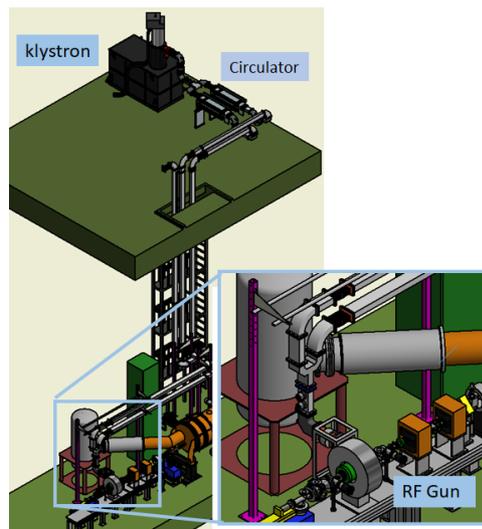


Figure 1: RF system for RF gun.

3. RF モニタ系構築

RF 電子銃用高周波系でのモニタ系は RF パワーを測定するパワーセンサー、放電発光を検出するアークセンサーで構築される(Figure 2)。また上記のセンサーに加えて、AE(アコースティックエミッション)センサーからの信号をオシロスコープで波形取得することにより、放電発生位置推定を行っている。波形モニタに関しては、Python スクリプトを使用してデータ取得及び波形生成、処理(AE 信号は FFT も含む)を自動化しており、最終的には Web ブラウザで容易にモニタリングを可能にしている(Figure 3)。また STF では EPICS が構築されており、Viewer を使

用してのモニタ監視も行っている。ViewerにはJava及びCSSを使用して、オシロスコープを使用した高速モニタシステムと共に開発を進めている(Figure 4)。

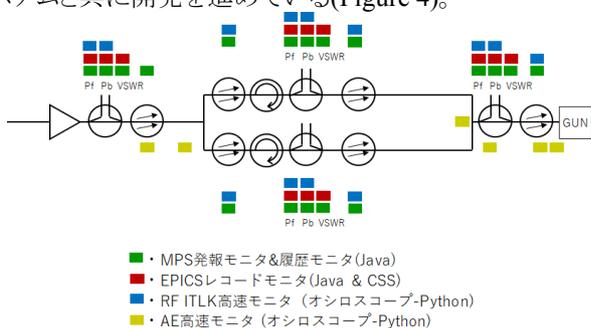


Figure 2: Monitor system for RF gun.

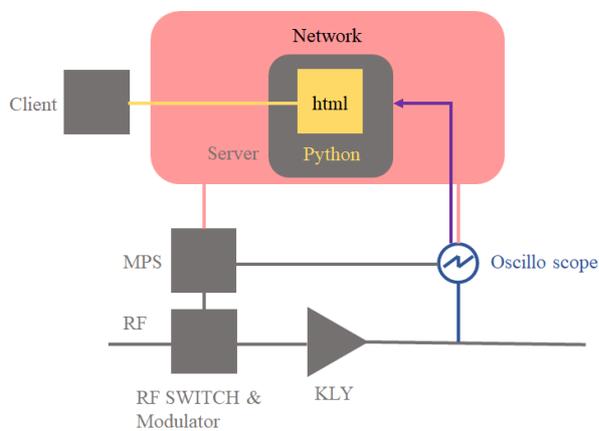


Figure 3: High speed monitor system.

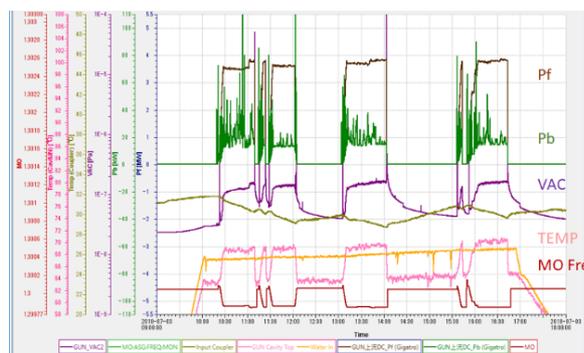


Figure 4: Trend monitor.

4. RF インターロックシステム

モニタ系では、機器保護を目的としてインターロックシステムの構築を行っている。インターロックモジュール(MPS)は、J-PARCのMRのインターロックシステム用に使用している[4]。このインターロックシステムを用いて、放電検出によるRF遮断に関しては1 μ s以下を可能としている。

また、発報項目により導波管内の状況を確認かつシステムの利便性を活用するため、発報の履歴までモニタできるようにパネルを作成している(Figure 5)。発報履歴モニタは発報時刻と発報項目が記録されることに加え傾向も

容易に確認できる。

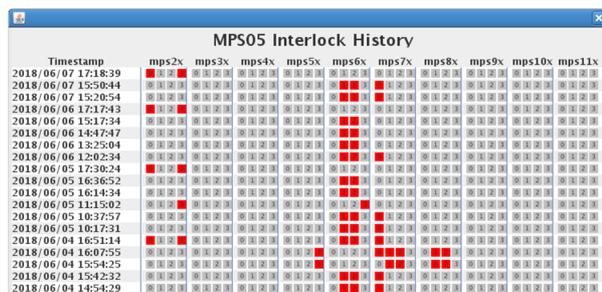


Figure 5: MPS historical monitor.

5. 空洞コンディショニングの状況

5.1 空洞コンディショニングの状況

RF電子銃空洞のコンディショニングは、STF2加速器の運転目標値であるパルス幅1ms、4MWを目指している。コンディショニングに先立ちダミーロード終端による高周波系のみでの試験では到達することを確認した。空洞コンディショニングは短パルスから開始して、最大4MW出力で30分間キープを目安としパルス幅を徐々に広げていく。現在のパルス幅は800 μ sまで到達しており、順調にコンディショニングが進められている。Figure 6はパルス幅を広げていく過程でのインターロック発報項目を示している。

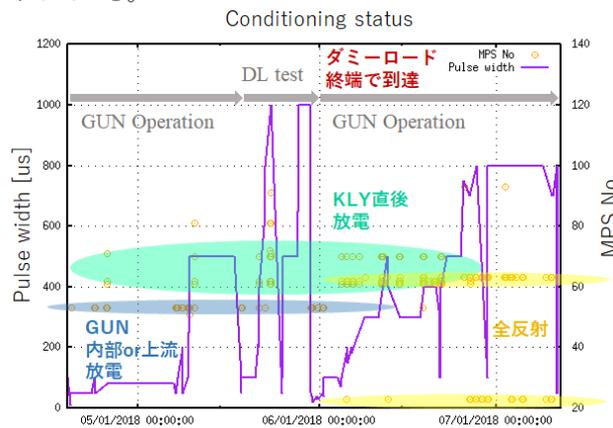


Figure 6: Conditioning status.

コンディショニング中のインターロック発報状況について報告する。短パルス(10~100 μ s)のコンディショニング時に、RF電子銃上流のアーカセンサーが発光を検出しインターロックが作動し、電子銃空洞内のコンディショニングが進んでいるように見られた。しかし同時にインターロック発報時に空洞内の真空悪化が見られないことがあり、導波管内での放電も考えられた。高速モニタの波形から、アーカセンサーのモニターレベルが上昇していることを確認し、またRF遮断が完了した後からRF信号に振幅変動が見られており、方向性結合器付近で放電のような事象が起きていることが考えられた(Figure 7)。

AEセンサーでも方向性結合器付近での応答を確認し、周波数解析結果からは超音波帯域の信号も確認した(Figure 8,9)。数回の事象を確認後、導波管を外して内面確認を行ったところ、放電痕のようなものが見つかり、

RF 信号の振幅変動はこれが原因であると考えられた。現在、方向性結合器を修復し運転を継続している。

パルス幅 400 μ s 時はクライストロン直後の導波管内で放電が何度かあった。さらに AE センサーによる放電発生位置の推定を行ったが、推定した場所には放電の跡は見られなかった。コンディショニングを進めていくと放電がなくなったため、原因は不明であった。

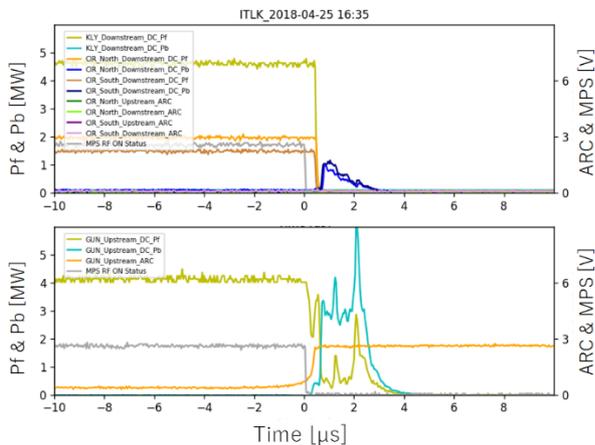


Figure 7: Waveform of RF and discharge.

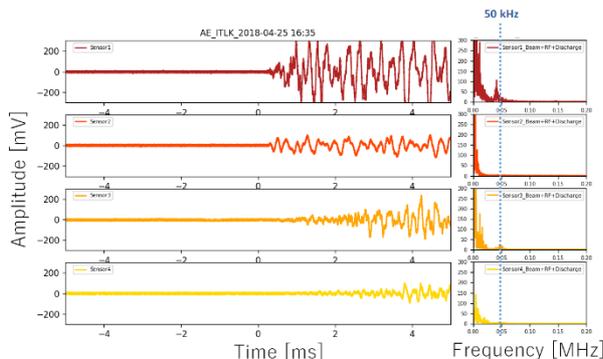


Figure 8: Waveform of AE.

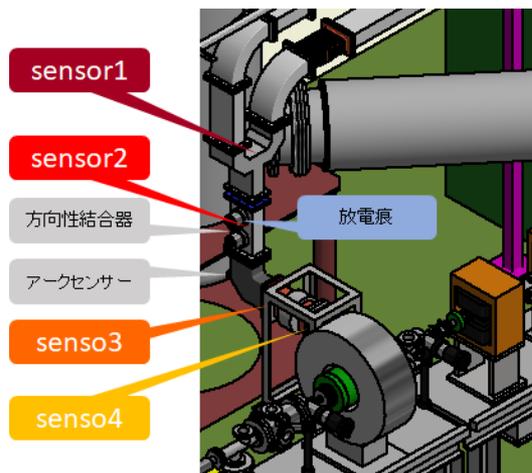


Figure 9: Position of AE sensor.

現在は RF パルス幅 800 μ s に到達しており、RF 電子銃空洞内の真空悪化が原因で全反射が起きている。

これまでは通常の反射波のレベルを考慮して、VSWR のインターロック閾値を高く設定しており、全反射に対してのインターロック構築の検討が必要になった。これはインターロックが構築されていない場合、全反射の影響で導波管内での放電発生の可能性が高まり、RF 遮断の必要があるためである。オシロスコープによりパルス幅トリガーをかけて、TTL 出力を MPS に入力することで RF 遮断を行っている。RF 電子銃内の真空悪化に対してのインターロック発報と比較して、全反射検出の方が応答が速く機器保護の点では有効と考える。現在は試験段階であり継続して評価試験を行っていく(Figure 10)。

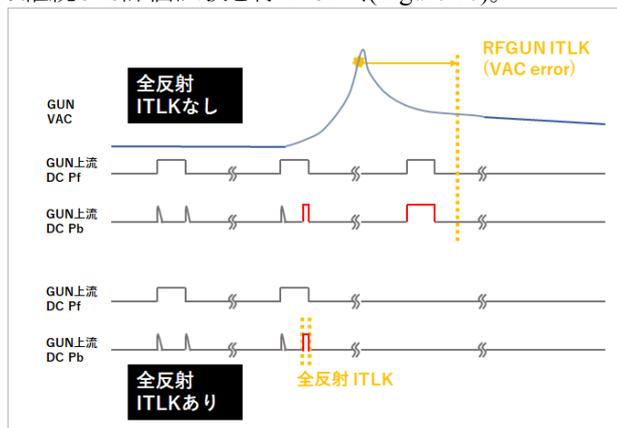


Figure 10: Consideration of total reflection.

5.2 放電発生位置の推定について

AE センサーは振幅及び到達時間より、放電発生位置の推定を行うことができ、位置推定の精度を高めるための開発を進めている。センサーの振幅は導波管構成及びコンポーネントの影響が大きいことが分かってきた。フレキシブル導波管は減衰量が大きく、この特性から放電発生位置の推定も容易になる可能性がある。センサーの位置はこれらの特性を考慮して構築していく必要がある。

AE 信号を捕えるための高速モニタのトリガーはインターロック発報信号を使用しており、インターロック発報時に限定した AE 信号を捕えることができる。またアークセンサーでの発光検出により、原因が放電であることの精度が高められる。このため放電による AE 信号を確実に捕えるためにはトリガー信号の選定は重要になる。

本システムによって捕えられた AE 信号は、ほとんどが放電によるものと考えられる。しかしインターロック未発報時の RF パルス信号をモニタすると AE 信号も捕えられた。これは RF パルス運転が原因の AE 信号と考えられ、インターロック発報時はこの AE 信号も捕えていることを考慮しなくてはならず、RF パルスが原因の AE 信号を確認できるモニタ構築が必要である。

放電発生位置の推定を行うためのモニタ構築は、AE センサーだけでなく他のセンサーと連携し、総合的に考察できるようなシステム構築が必要である。今後もモニタシステムを拡大することで、放電発生位置の推定の精度を高めるための開発を継続していく。

6. まとめ

昨年、高周波系だけの試験では露製 5 MW サーキュ

レータ内部で放電が発生し、インターロックの作動により運転を継続することができなかった。これらの結果から、立体回路系の見直しを行いシステム構築を行ってきた。STF2 加速器での RF 電子銃の運転に向けた高周波系を用いた RF 電子銃空洞のコンディショニングは順調に進んでおり、安定な高周波を供給するための高周波系を構築するため、モニタやインターロックシステムの構築を引き続き検討していく。

参考文献

- [1] H. Hayano *et al.*, “Progress of STF Accelerator development for ILC”, THOM06, in these proceedings.
- [2] N. Hanaka *et al.*, “Status of RF Power Distribution System Construction for ILC in STF”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, 2016, MOP038.
- [3] K. Ishimoto *et al.*, “Construction of waveguide system for testing of 10 MW multi-beam klystron”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, 2017, TUP056.
- [4] S. Sasaki *et al.*, “SuperKEKB アポートトリガーシステム・J-PARC MR の MPS 装置”, Proceedings of the Meeting on the Technical Study at KEK, Tsukuba, Nov. 4, 2014, pp. 1-4.