

STF-2 加速器における L バンド RF 電子銃ロングパルス運転に向けた高周波系 SYSTEM FOR LONG-PULSE OPERATION OF L-BAND RF-GUN AT STF-2 ACCELERATOR

沼田直人^{#, A)}, 石本和也^{A)}, 埴泰河^{A)}, 明本光生^{B)}, 荒川大^{B)},
片桐広明^{B)}, 中島啓光^{B)}, 松本修二^{B)}, 松本利広^{B)}, 三浦孝子^{B)}
Naoto Numata^{#, A)}, Kazuya Ishimoto^{A)}, Taiga Hanawa^{A)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Dai Arakawa^{B)},
Hiroaki Katagiri^{B)}, Hiromitsu Nakajima^{B)}, Shuji Matsumoto^{B)}, Toshihiro Matsumoto^{B)}, Takako Miura^{B)}
^{A)} NAT Co. Ltd

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

Abstract

At the Superconducting RF Test Facility (STF) of KEK, the STF-2 accelerator, which consists of one RF gun and fourteen superconducting cavities, is operated for the development of the International Linear Collider (ILC). From this year, it is planned that the STF-2 accelerator will be operated at ILC-compliant beam power. For the stable operation with long beam pulse of the RF gun, the monitoring system for identifying the location of discharge inside waveguide power distribution system is improved and the automatic start-up procedure to shorten the recovery time after the occurrence of discharge is evaluated. In this report, we describe the current RF gun operation status at STF-2 accelerator.

1. はじめに

KEK の超伝導 RF 試験施設 (STF) では、国際リニアコライダー (ILC) 開発に向けた超伝導空洞を用いた線形加速器 (STF-2 加速器) の運転を行っている。

STF-2 加速器は、RF 電子銃 (RFGUN) から電子ビームを加速する構成である。この RF 電子銃空洞へ安定なマイクロ波を供給するため、5 MW クライストロンによる高周波系を構築、管理を行ってきた (Fig. 1)。2021 年度のビーム加速試験では、繰り返し 5 Hz, RF パルス幅 150 μ s, RF 電子銃空洞への入力パワー 3.87 MW で運転を行っている [1]。

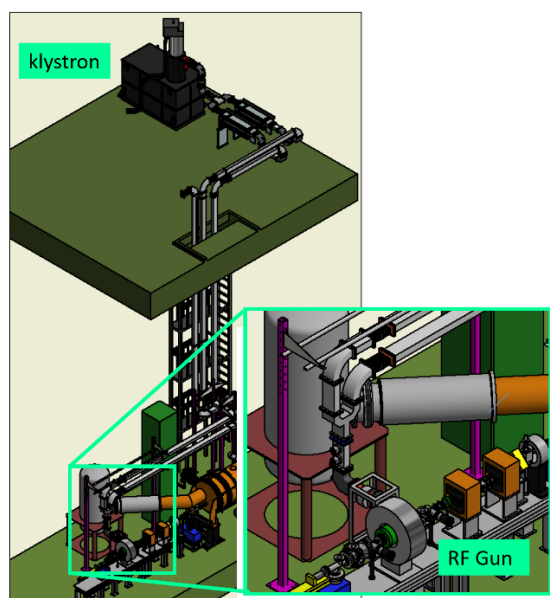


Figure 1: Overview of RFGUN's RF system for STF-2 Accelerator.

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

2022 年度以降、STF-2 加速器はビームパルス幅を広げることでビームパワーの増強を目指し、ILC と同程度のビームパワーで運転を行う計画である。このため、RF 電子銃にはロングパルスでの安定的な運転が要求され、放電等の発生状況や発生箇所の特定制を行うモニタ系の開発や、立ち上げプロセスの自動化による放電発生後の復旧時間の短縮を目指した高周波系の開発を進めている。

本報告では、現状の STF-2 加速器の RF 電子銃の運転状況とビームパワー増強時に安定に運転を行うための各種対策について報告を行う。

2. STF-2 加速器での RF 電子銃

2.1 RF 電子銃の高周波系

STF-2 加速器の高周波系は、基準発振器で 1.3 GHz の CW 信号を生成、I/Q 変調器や増幅器等を用いて、運転周波数の RF を各高周波系に配信する構成を採用している。タイミング信号と同期してパルス変調された RF は、ビーム加速のタイミングに合わせて、対象となる RF 空洞へパワーを供給する [2] (Fig. 2)。

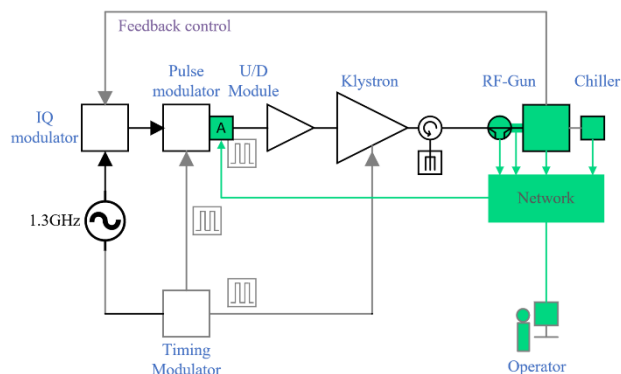


Figure 2: RFGUN operation system.

高周波系のモニタには、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、AE(アコースティックエミッション)センサーを使用している。各センサーからの信号をオシロスコープで計測、インターロック用のモニタとして用いて、放電発生状況と発生位置の推定を行う。データ取得には、Python スクリプトを使用して、自動で保存を行っている[3]。

2.2 モニタ系の増設

今回の試験では、Rohde & Schwarz 社製のオシロスコープ(RTB-2000 シリーズ)を導入した[4]。現在は、このクラスでもヒストリ機能が搭載されており、トリガー信号に同期した波形データを多量に保存が可能である。このためインターロック時に、時系列でのパルス信号の変化を確認、現象の理解を深めることができる(Fig. 3)。

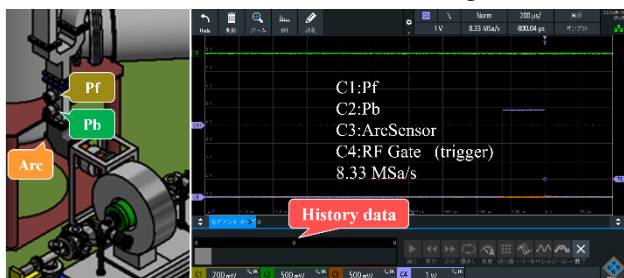


Figure 3: RF Interlock monitor.

既設のモニタ系は、インターロック信号に同期してデータ取得を行っている。今回の運転では、AE センサーのモニタは、セルフトリガーに変更し常時モニタを行っている。これは、インターロックの発報に関わらず、地下トンネル内での空洞や導波管内で放電が発生しており、その放電音は、制御室ではまったく聞こえないことに対処するためである。常時モニタすることで、放電による異常現象を早急に検出できると考えている。

波形取得に 2 秒程度の取り込み時間を設定した。時間内の AE センサー出力の peak-to-peak 値をとらえ、この値を Epics レコード値として、CSSS[5]を使用して表示している。トレンドモニタに加え、レコード値の上昇から、警告音を鳴動するパネルの作成をし、試験を行っている(Fig. 4)。

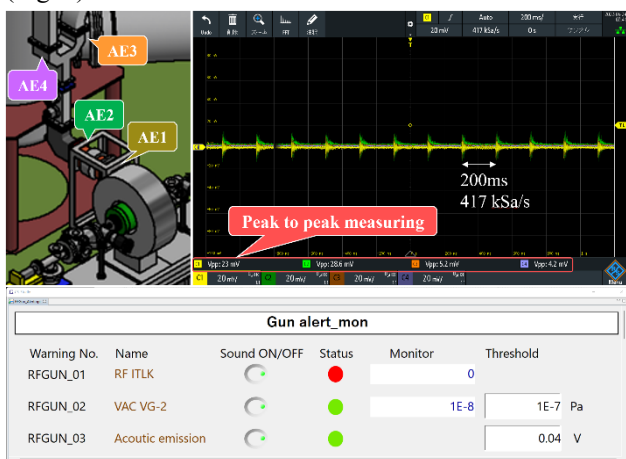


Figure 4: AE monitor.

2.3 誤報阻止の AND 回路導入

これまでのビーム運転では、超伝導空洞に配置した放電を検出するアークセンサーによるインターロックの発報が何度も起きた。しかし、発報のタイミングが RF パルスとタイミングと合っていなかったため、誤報と判断した。これは、センサーに使用しているファイバケーブルが長く、信号増幅の過程でノイズレベルが上がったことによるものと考えられる。この対策に、インターロック信号と RF のゲート信号の AND を取るモジュールを組み込んだところ、誤報がなくなり、高周波系の運転が安定になった。RF 電子銃でも、ケーブルの長さが同程度であり、上記のトラブルが起きる可能性があるため、このモジュールの組み込みを検討している(Fig. 5)

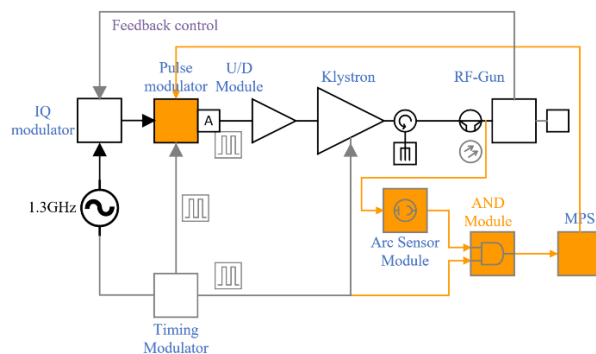


Figure 5: AND circuit module for arc sensor.

2.4 RF 電子銃空洞の冷却系

RF 電子銃を立ち上げる際、RF 入力に応じた空洞での熱損失による共振周波数のズレを補償するために、電子銃空洞の冷却水を変化させる必要がある[6]。

ここでは、チラーを用いて冷却水温の調整を行っている。このチラーの循環温度(以下チラー温度)をモニタしながら、設定温度の制御を行い、RF 電子銃空洞の共振周波数の制御を行っている(Fig. 6)。

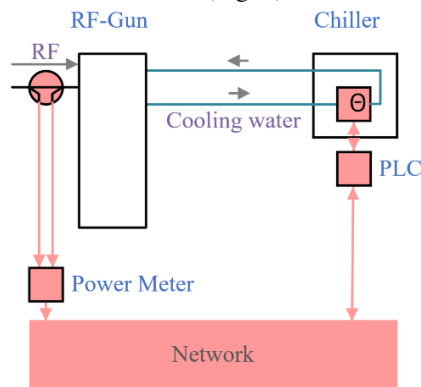


Figure 6: Cooling and RF monitoring system for RFGUN cavity.

3. RF 電子銃立上げの自動化

RF 電子銃の立上げ操作は、ビームスタディを行う限られた運転担当者の手動操作によって行われてきた。この

プロセスを自動化することで、手動操作部分をシンプルにし、操作対応できる人員を増やすことを想定している。また、プロセス時間の短縮も期待できるため導入を考えた。

3.1 RF パワーとチラー温度の較正

入力パワーを上げいくと、RF 空洞の共振周波数の帯域幅内に入ること、空洞に入力パワーの供給が開始される。チラーを用いて、空洞を冷却することで、入力パワーの供給が継続され、反射パワーのレベルは徐々に下がっていく。反射パワーのレベルが、最小となるところで入力パワーの効率が最も良くなる。これは、反射パワーのレベルをモニタし、チラー温度を制御することで、空洞へのパワー供給を制御できることを示している。

入力パワー(Pf)と反射パワー(Pb)、チラー温度の運転データから、上記の条件を満たす値を較正した。また、パルス幅で熱負荷が変わるため、ビーム運転時に想定されるパルス幅での較正も行った(Fig. 7)。これらの値から、ターゲットラインを求め、自動立上げ用スクリプトとモニタの構築を行った。

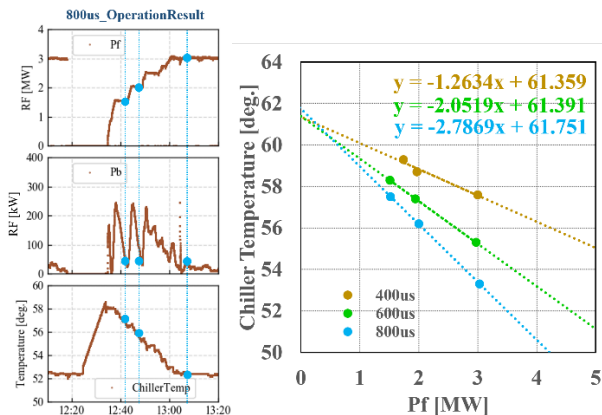


Figure 7: RF input vs Chiller temperature.

3.2 自動化用モニタ構築

ターゲットラインに関わる温度制御の可視化は、トレンドモニタに加えて、直感的に理解し易いモニタが必要と考える。プロセスの判定基準は、入力パワーと反射パワー、チラー温度のモニタ値である。入力パワーとチラー温度の相関、反射パワー/入力パワーをマーカー色に変えて表示する。これに、ターゲットラインを表示し、プロセス状況を把握できるよう構築した。また、タイムチャートのモニタも追加し、試験を行っている(Fig. 8)。

モニタ構築は、Jupyter Notebook[7]を使用している。このアプリケーションは、Web ブラウザ上で利用できるプログラムの実行環境であり、データサイエンスの分野で広く用いられている。今回の運転では、現場で情報共有をしながら、適宜コード修正を行い有効活用できたと考える。また、グラフ作成には Python のライブラリである matplotlib を使用し、FuncAnimation 関数を用いている。

3.3 運転立上げのプロセス

運転時の手動操作は、立上げ用スクリプトへ「許可」を出すこと、入力パワーの設定値を決めることのみとして、手動部分を極力減らすように構築を進めている。温度の

変更は、スクリプトがプロセス状況に合わせて行っている。立上げのプロセスを下記に示す。項目番号と Fig. 8 に示される番号は一致する。

- i. 「許可」を ON に操作、入力パワーの設定値を入力する。
- ii. 入力パワーの設定値に向けて、実際のパワーが上げられる。空洞へ入力パワーを供給するため、ターゲットラインを超える必要がある。この条件では、入力パワーから換算された温度と、チラー温度を比較しながら温度を上げている。チラー温度の方が高くなるまで温度を上げていく。
- iii. ターゲットラインの+0.5°Cを超えると、空洞に入力されたパワーを冷却しながら、入力パワーと温度の目標値に向かう。
- iv. 入力パワーが設定値を超えると、反射パワーが低くなるよう温度を下げていく。
- v. 最後に入力パワーの目標値とターゲットラインにあたる温度の設定値が入力される。

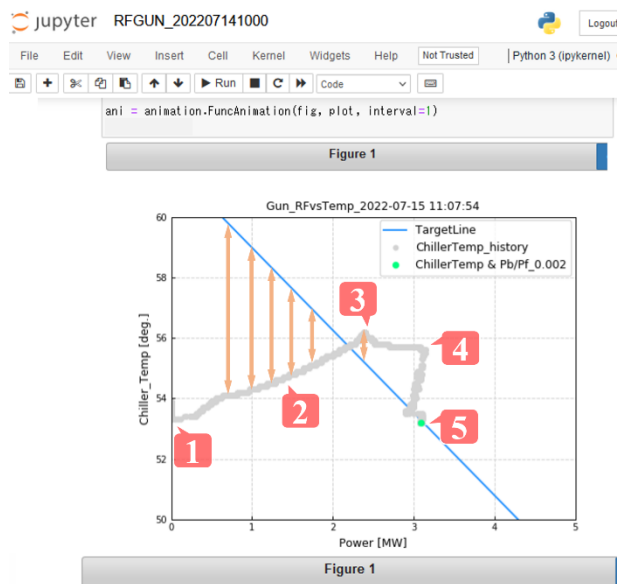


Figure 8: Monitor of Auto control process.

この内容で、プロセス時間の確認を行い、機器安全を考慮し運転を進めている。ターゲットラインより温度を高めめに設定し、冷却しながら調整していくと、入力パワーと反射パワーの変動が緩やかになり、制御は比較的容易になることもわかってきた。

4. 試験結果と考察

RF 電子銃のロングパルスでの大電力試験を進めて、現段階では RF 電子銃単独で、繰り返し 5 Hz, RF パルスを 800 μs まで広げて、3 MW の入力パワーで運転を行っている。この設定で、2 時間以上キープできることを確認できた(Fig. 9)。

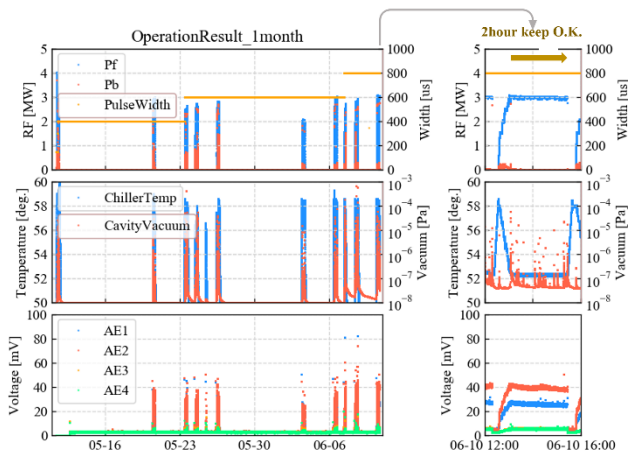


Figure 9: High power test result.

4.1 モニタ系の結果と考察

この大電力試験でも、空洞内と導波管内の放電が発生している。空洞内の放電は、真空悪化が見られ、RF の全反射や波形の乱れが見えている。また、導波管内の放電は、AE センサーの振幅レベルが大きく上昇しており、トンネル内で破裂音のような大きな音が鳴っていたと考えられる(Fig. 10)。

波形データは、放電の状況により全く違ったものが見えてくる。ヒストリ機能で時系列の変化も加えると、より顕著に表れる。今後も、放電の状況や内部の異常をより正確に検出できるよう開発を進めたい。また、保存データの増加に伴い、データ管理や表示方法も課題となっている。波形画像を合成処理し、動的なモニタも導入している。

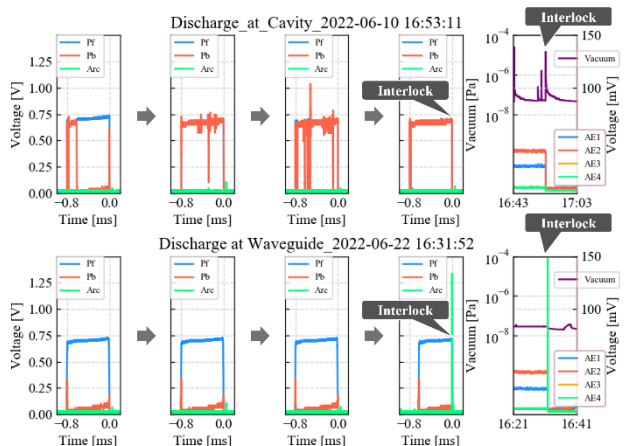


Figure 10: Interlock data.

4.2 自動化の結果と考察

RF 電子銃の立上げプロセスは、開始時に空洞内の温度が高く、そこから冷却していく方が反射パワーのレベルは低く抑えられる。しかし、放電等のインターロックで、RF が OFF になると、空洞内の温度は低い状態になっている。その状態から運転を再開すると、空洞の温度をまず上げる必要があり、そのプロセスはビーム運転時において非効率になる。自動立上げに加えて、上記プロセス時間の短縮を目指し、その進展が見られてきた。

立上げスクリプトを用いた運転で、入力パワーとチラー温度を同時に制御することで、プロセス時間の短縮が可能になる。空洞が冷えた状態から、入力パワーを供給するまでは、反射パワーのレベル上昇は大きくなる。立上げ速度も上がるため、空洞内と導波管内の放電のリスクは高まる。現状としては、インターロックの発報は起こらず、自動立上げによる高周波系の安定性は担保できている(Fig. 11)。

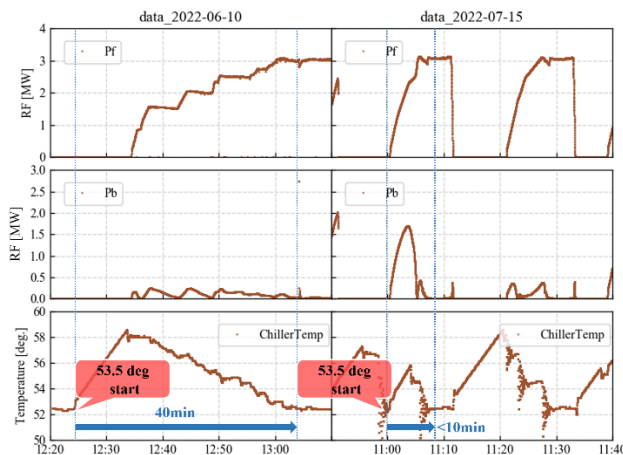


Figure 11: Operation process time.

ビーム運転時に想定される条件でも試験を行っており、最初のチラー温度を変えた場合や、RF パルス幅を変えて(400 μs -> 600 μs -> 800 μs)のデータ取得も行った。その結果、入力パワーを 3MW まで、10 分以内の立上げ時間で調整ができてきている(Fig. 12)。

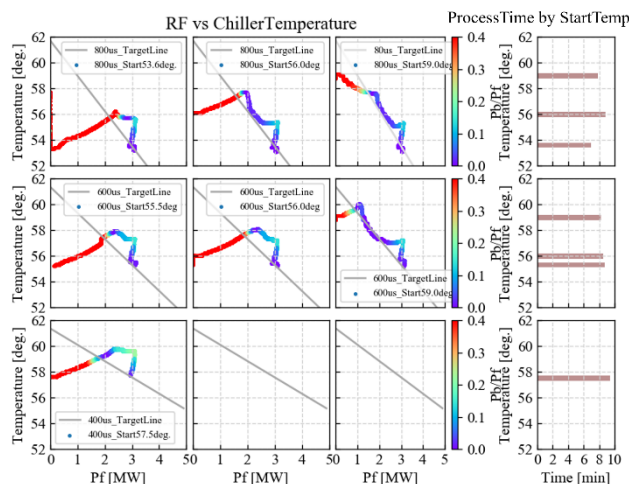


Figure 12: RF vs Chiller temperature by RF Pulse width.

RF パルス幅が短い設定や、出力が低い場合は、調整が容易であるため、自動化の対象外としている。

5. まとめと今後

今回の大電力試験では、RF 電子銃の単独では、繰り返し 5 Hz、RF パルス幅 800 μ s まで広げて、RF 電子銃入力パワー 3 MW で運転を行った。この設定で最大で 2 時間以上キープできることを確認できた。

モニタ系の開発も進めており、インターロック発報時の原因特定の精度が高まり、適切な処置を行えるようになってきた。

自動化の試験では、手動操作部分をシンプルにでき、対応可能な人員を増やすことが期待できる。ビーム運転を想定した立上げでは、時間短縮が可能になり、10 分程度で調整ができています。この結果は、RF 電子銃のロングパルスによる、安定的な加速器運転に向けて進展があった。

今後は、RF 電子銃入力パワーを 4 MW まで目指し運転を行う。また、自動化で機器安全の向上と、安定した高周波系の供給ができるよう開発を進めていく。

謝辞

今回の、大電力試験と自動化の調整運転では、加速器施設早野仁司先生にご教授をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Fukuda *et al.*, “Beam tuning and beam parameter measurement in STF-2 accelerator”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan QST-Takasaki Online, Aug. 9-12, 2021, THP029.
- [2] N. Numata *et al.*, “Performance of the power distribution system in the STF2 accelerator”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan QST-Takasaki Online, Aug. 9-12, 2021, THP045.
- [3] N. Numata *et al.*, “Construction of RF System for RF Gun Operation at KEK-STF”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, THP059.
- [4] https://www.rohde-schwarz.com/jp/products/test-and-measurement/oscilloscopes/rs-rtb2000-oscilloscope_63493-266306.html
- [5] <https://www-linac.kek.jp/cont/epics/css/>
- [6] S. Kashiwagi *et al.*, “Development of l-band RF gun L-band RF GUN (III)”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Himeji, Aug. 4-6, 2010, THPS018.
- [7] <https://jupyter.org/>