

STF-2 クライオモジュールのビーム運転のための超伝導空洞の調整 SUPERCONDUCTING CAVITY TUNING FOR BEAM OPERATION IN STF-2 CRYOMODULES

菊池祐亮^{#, A)}, 今田信一^{A)}, 山本康史^{B)}, 加古永治^{B)}, 梅森健成^{B)}, 松本利広^{B)}
Yusuke Kikuchi^{#, A)}, Shin-ichi Imada^{A)}, Yasuchika Yamamoto^{B)}, Eiji Kako^{B)}, Kensei Umemori^{B)},
Toshihiro Matsumoto^{B)}
^{A)} NAT Co., Ltd.

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

Abstract

From February to April 2021, the STF-2 cryomodules were cooled down and high-power-tested, and the beam operation was carried out at the STF tunnel in KEK. In this beam operation, every superconducting cavity installed into the cryomodules (CM1/2a) was adjusted (frequency, power distribution, RF phase, feedback, etc.) every day. In this report, we will report the launch and adjustment procedures of superconducting cavities performed before daily beam operation.

1. はじめに

2021年2月から4月にかけて KEK にて STF-2 クライオモジュールの冷却試験およびビーム運転が行われた。Figure 1 は STF-2 の加速器概略図である。

ビーム運転を安定して行うため、超伝導空洞の調整を毎日行った(夜間は運転を行わないので、安全のために空洞は detune 状態にセットされる)。今回の試験では、導波管の整備が進められたため[1]、STF-2 クライオモジュールに組み込まれた12空洞全てを初めて同時に運転することになった。

ここでは、ビーム運転を開始するまでの作業として、超伝導空洞の調整手順について述べる。

2. ビーム運転までの立ち上げ作業

ビーム運転を開始するため、以下の手順で作業を行った。

- 冷却水システムの立ち上げ
- Capture Cryomodule (CCM), Cryomodule 1/2a (CM1/2a)用-Klystron の立ち上げ
- トンネル閉鎖(退避確認)
- ゲートバルブの開操作
- 空洞の調整(周波数調整、パワー分配調整)
- フィードバック制御(フィードフォワード制御含む)

以上のことを行った後、ビーム運転へと引き継ぐことになる。各項目について、以下で説明する。

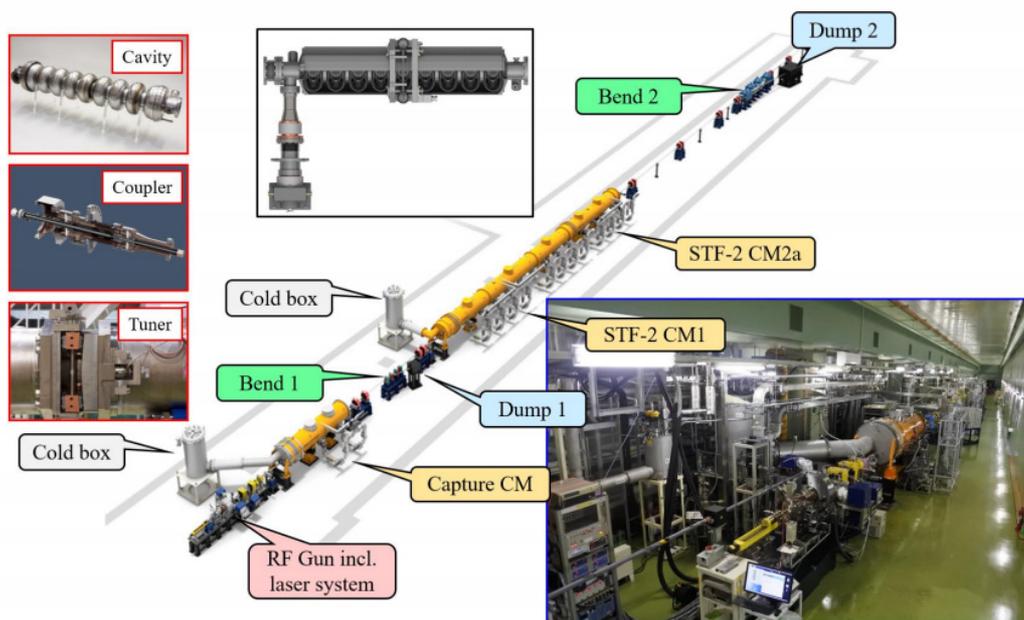


Figure 1: Schematic view of STF-2 accelerator.

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

2.1 冷却水システムの立ち上げ

STF-RF 冷却水システムは STF 棟に隣接する機械棟にまとめられており、その起動は Fig. 2 のスイッチを押すことで完了する。地上と地下の3系統を同時に起動する。



Figure 2: Cooling water operation switch.

2.2 Klystron の立ち上げ

CCM および CM1/2a それぞれに対し、Fig. 3 の Klystron が1台ずつ割り当てられている。

Klystron の立ち上げ手順

1. Klystron 系統の主電源を入れる。
2. Klystron 本体の電源を入れる。
3. LV ON
4. HV ON, トリガー(TRG)ON



Figure 3: 10 MW Multi-Beam Klystron for CM1/2a (up), 800 kW Klystron for CCM (down).

特に、CM1/2a Klystron において上記3では、Klystron イオンポンプに負荷がかかるため、 $3\mu\text{A}$ のインターロックを設けた。インターロックで LV が落ちなくなり安定すると、約 1 時間で HV Ready となる。上記 4 はリモートで実施できる。その後、RF パワーを投入できるようになる。

また、CCM Klystron においては、前述のようなインターロックは設けていない。手順としては概ね同様であるが、上記4においては、出力が正常であるかをリモートでモニターしていないので、Klystron 制御盤本体で実施する。出力は 65 kV, 400 mA に設定した。

両 Klystron は HV を入れた後すぐに RF パワーを入れると電流が弱く安定しないために、RF パワーが安定に

供給できない。したがって、小一時間おいてからパワーを上げるようにする。不安定さに気づかぬまま上げていくと急に入力パワーが上昇することがあるので、空洞に大きな負荷がかかることを防ぐことや、機器を保護する目的もある。

10 MW Multi-Beam Klystron においては、前段のアンプにエラーが起こることがある。出力を上げ、本来入るはずのパワーが入らない時にはアンプエラーを確認するようにする。

2.3 トンネル閉鎖



Figure 4: STF tunnel personal key box.

STF 加速器を運転するためにはトンネルを閉鎖する必要がある。

トンネル内の3カ所に「退避確認スイッチ」があり、人がいないことを確認しつつ、すべて押してからトンネルの外へ出て、トンネルを閉鎖する。

また、トンネル入域にはパーソナルキーが必要であり、パーソナルキー保管器により管理し、誤ってトンネルに人が留まらないよう注意する。Figure 4の黄色の丸で囲って示したメインキーを抜き地上へ上がり、STF 制御室のインターロック制御盤に挿し込み、トンネル閉鎖を完了する。この間、STF 建屋内に速やかな退避を促すアナウンスが流れ続ける。ちなみに、退避確認スイッチや加速器緊急停止スイッチの動作確認は、法令により、年2回の実施が義務付けられている。Figure 5 は退避確認スイッチとトンネル内の設置位置である。

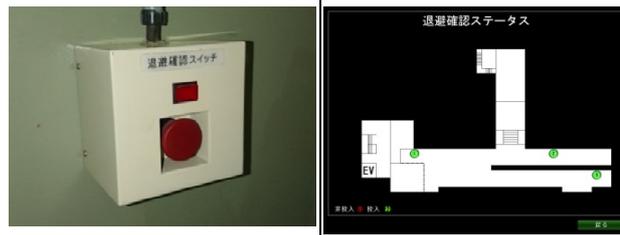


Figure 5: Confirmation switch of avoidance (Left), Status of avoidance (Right).

2.4 ゲートバルブの操作

空洞にRFを投入する前に、STFビームラインのゲートバルブ(GV)を開け、クライオモジュール内にビームを通せるようにする。Figure 6はGVの写真とコントローラパネルで、Fig. 7はSTF Beam Line Layoutである。ビームライン上で、GV-03, -04はCCM前後、GV-05, -06はCM1/2a前後に設置してあり、圧空システムによりリモートで開閉可能である。GVを開けた直後は、アウトガスにより近辺のビームラインの真空が一時的に悪化するため、下がるまで待ってから一つずつ操作していく。

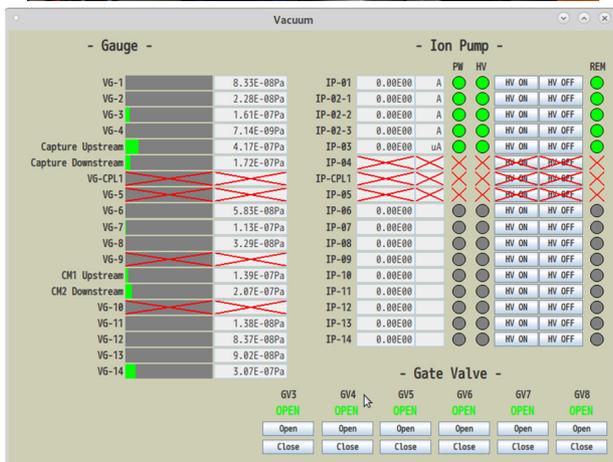


Figure 6: Gate Valve (up), Gate Valve controller panel (down).

2.5 空洞の周波数調整

空洞の周波数調整には、ワイドレンジのメカニカルチューナーと、ナローレンジのピエゾチューナーを用いる。

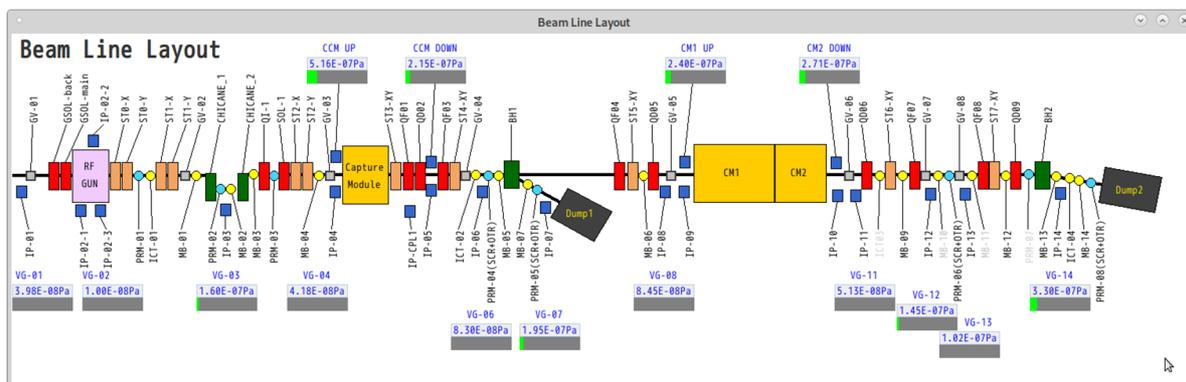


Figure 7: STF Beam Line Layout.

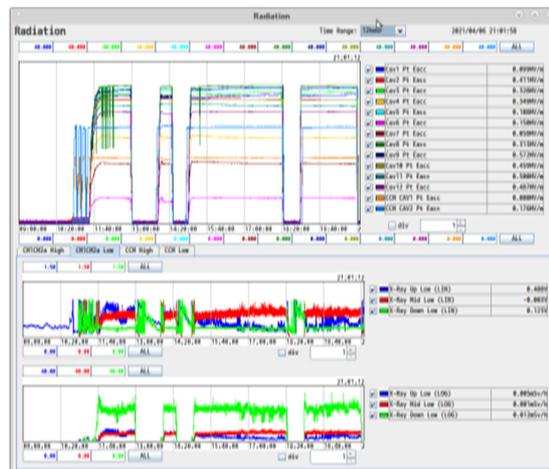


Figure 9: Radiation monitor.

まず始めに、RF パワーを少し投入し、メカニカルチューナーで空洞周波数を調整する。通常、3MV/m 辺りで各空洞を共振周波数 1.3 GHz に合わせ、入力パワーから求めた加速勾配と、透過パワーから求めた加速勾配との一致を確認する(システムに問題が無ければ、数%以内で一致する)。その後、アップダウンモジュールで RF パワーを上げていき、エージングを開始する。エージングは、各真空圧力、放射線、各部の発熱具合、カップラーの高周波窓に付けている電子プローブとアークセンサーなどをモニターしながら行う(Fig. 8-11 にモニター画面を示す)。エージング後に、全空洞を最大加速勾配にセットする。Figure 12 はメカニカルチューナーで空洞をチューニングしたときの空洞周波数の位相の様子である(上がチューニング前、下がチューニング後)。最大加速勾配付近まではメカニカルチューナーを使って大雑把に調整し、その後、ピエゾチューナーで微調する。

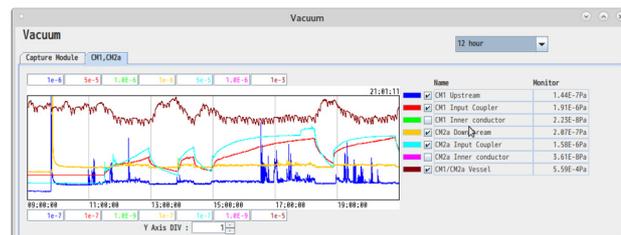


Figure 8: Vacuum trend during beam operation.

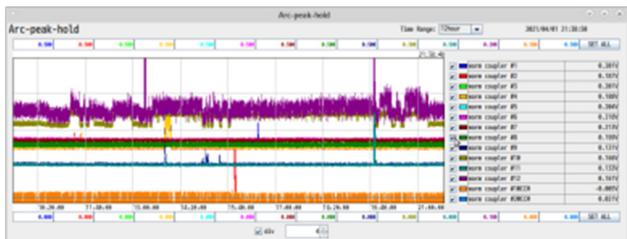


Figure 10: Arc sensor monitor.

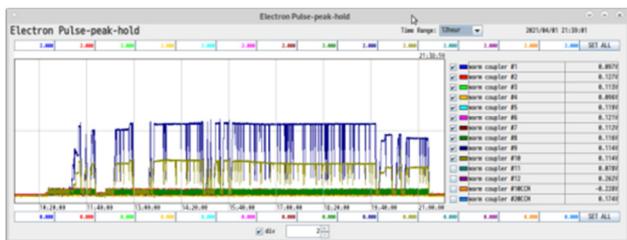


Figure 11: Electron sensor monitor.

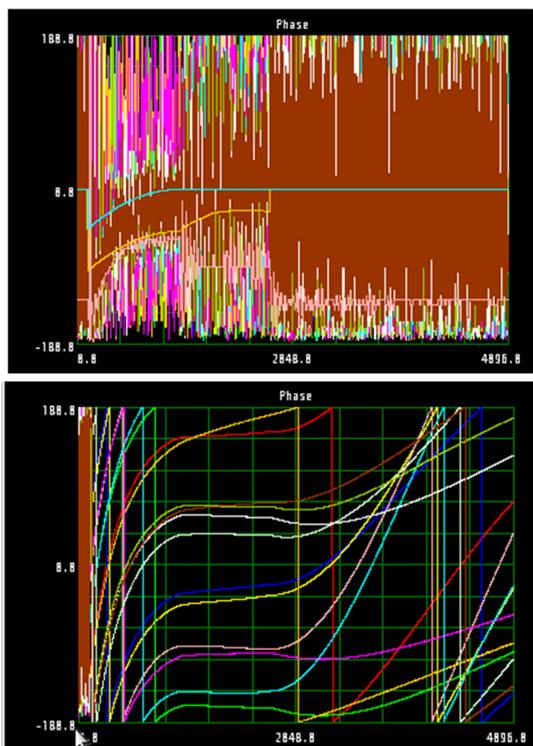


Figure 12: Waveform of the phase of the cavity frequency during tuning.

高電界でのパルス運転では、空洞内の電磁界応力により空洞変形が引き起こされ (Lorentz Force Detuning : LFD)、共振周波数のずれがパルス毎に発生する。それを補償するために高電界においてはピエゾチューナーを用いる。Figure 13 は、ピエゾチューナーでの LFD 補償前後の様子である。ピエゾ用高圧電源にファンクションジェネレータから半波長のサインカーブを入力し、RF のタイミングとピークが最大になるところのタイミングを調

整する。その後、ピエゾのオフセット電圧と振幅とを調整することで detuning curve の flat-top を 0 Hz にセットできる。

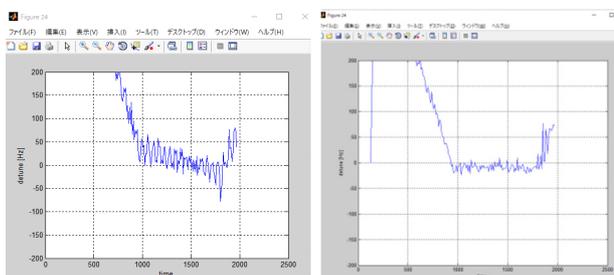


Figure 13: Phase waveform before and after LFD compensation by piezo (case of Cavity#11).

Figure 14 はパルス運転中の RF の信号の例である。全空洞に対して、こちらも観察しながらチューニングする。赤は E_{acc} (加速電界)、青は P_{in} :入射パワー、緑が P_{ref} : 反射パワーの波形である。横軸は時間である。

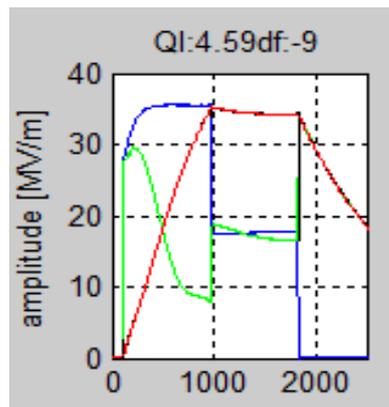


Figure 14: Waveform of RF signals during pulsed operation.

計12台の空洞が組み込まれている CM1/2a においては、各空洞へ入力される RF パワーの分配比を調整することで、安定して運転可能な最大加速勾配まで調整する。そのために Variable-hybrid (可変ハイブリッド) を用いる。Figure 15 は可変ハイブリッドの写真である。導波管は空洞4台ごと (CM1a, CM1b, CM2a) の3系統に分かれているため、4台ごとの加速勾配のバランスを取りながら調整しなければならない。

調整中に、可変ハイブリッドの調整範囲外に出てしまう空洞がいくつかあったが、こういった事例への対処は今後の要検討課題である。ILC は高エネルギー加速器であるため、各空洞の最大加速勾配 (クエンチの一步手前) まで調整する必要がある。

2.6 フィードバック運転

これまでのことを完了してから、フィードバック運転を開始する。フィードバック運転はすべての空洞のベクトル和によって制御する運転方式であり、具体的には、Fig. 9 の加速勾配のパルスの flat-top の領域が、全空洞の足し算で完全に平坦になるようにする操作のことである。Figure 16 はフィードバック運転中の位相の状態である。

上は各空洞のもので、下はベクターサムである。詳しい説明は省くが、LLRF 制御系について述べた論文を参照されたい。[2, 3]

全空洞を、フィードバック運転で維持できる状態にセットした後、ビーム運転へと引き継ぐことになる。

以上、述べたことを、毎日行っている。



Figure 15: Variable-hybrid.

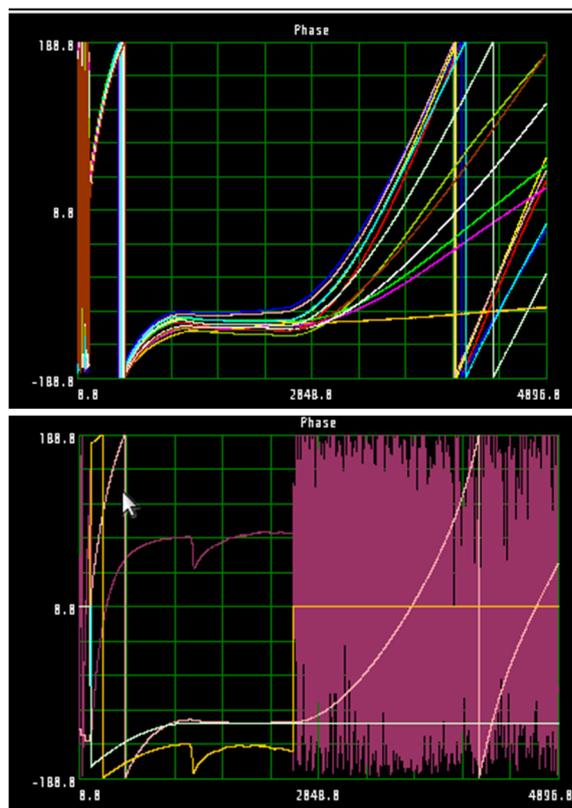


Figure 16: Phase of cavity frequency during feedback operation (each cavity (up), vector sum (down)).

3. まとめ

2021 年 4 月の STF-2 のビーム試験では初めて、クライオモジュールに組み込まれた全 12 空洞の運転を行った。全空洞の合計加速勾配を最大にする調整を行うと同時に、安定して運転可能な状態を目指した。

今回の運転では可変ハイブリッドの調整範囲に制限があったため、各空洞のポテンシャルを最大限引き出すことができなかった。空洞性能の推移は予想がつかないため、供給できる RF パワーには相当の柔軟性を持たせる必要があるものとする。導波管系については、地上部からトンネルへと降った後、すぐに二つに分岐するが、この分岐点に可変ハイブリッドを設けるべきであるとする。これで 4 空洞ずつに等分配しているパワーバランスを変更できるようになる。

また、運転中には導波管内での放電によるインターロック(アークセンサー)を設けているが、度々その誤報で運転がストップすることもあった。これも対処が必要である。

以上、ビーム運転を行うまでの立ち上げ作業・操作手順を述べた。立ち下げ手順としては立ち上げと逆順である。試験終了後の空洞の状態は、誤って RF パワーが入らないように detune する(通常、夜間は運転を行わない)。

最後に、ビーム運転の結果を簡単に Table 1 に示しておく。

Table 1: Achievements in Beam Operation (Apr/2021)

Beam energy	384 MeV
Beam power	677 W
Total charge per pulse	360 nC
Eacc from beam energy	32.9 MV/m (9 cavities)
Eacc from RF power (P_{tra})	33.0 MV/m (9 cavities)

表のうち、9 空洞としてあるのは、性能の低い 3 空洞を外したときの最大平均加速勾配での運転である。

参考文献

- [1] N. Numata *et al.*, “STF2 加速器の電力分配系の性能評価”, in Proc. of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Aug. 2021, THP045.
- [2] T. Matsumoto *et al.*, “KEK STF-2 加速器の LLRF 制御系の状況”, in Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 8-10, 2016, Chiba, Japan, WEPH011.
- [3] 三浦孝子, “マイクロ波ローレベル制御”, OHO 2017; http://accwww2.kek.jp/ofo/OHOtxt/OHO-2017/08_Miura_Takako_2.pdf